



 PETROBRAS	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA				Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006					
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS							FOLHA: 1 DE 21		
	PROJETO: INSTALAÇÕES SUBMARINAS							-		
	ÁREA: SUBMARINA									
DP/SUB/ SSUB/ISBM	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGA EM MCV									
								ISBM/SIDS		
Microsoft Word 2010 – ET-3000.00-1500-941-PMU-001-Rev.C.docx										
ÍNDICE DE REVISÕES										
REV.	DESCRIÇÃO E/OU FOLHAS ATINGIDAS									
0	Emissão original									
A	Inclusão de especificações de detalhamento de dragagem no item 8 – ações mitigatórias									
B	Alteração dos Itens 7.1 (Posicionamento de flutuadores) e 8.0 (Ações Mitigatórias)									
C	Inclusão de instruções sobre restritores de curvatura não convencionais									
	REV. 0	REV. A	REV. B	REV. C	REV. D	REV. E	REV. D	REV. E	REV. F	
DATA	19/04/2016	26/07/2019	28/08/2020	30/09/2022						
PROJETO	ISBM/EIMDS	ISBM/SIDS	ISBM/SIDS	ISBM/SIDS						
EXECUÇÃO	DANIEL	ELTON (B2QR)	P. Tavares	P. Tavares						
VERIFICAÇÃO	RAFAEL (BEJA)	FELIPE (BERQ)	E. Obrzut	E. Obrzut						
APROVAÇÃO	VIRGÍLIO (BEXQ)	CRISTIANO (CQP1)	U.Lima	D. Filho						
AS INFORMAÇÕES DESTE DOCUMENTO SÃO PROPRIEDADE DA PETROBRAS, SENDO PROIBIDA A UTILIZAÇÃO FORA DE SUA FINALIDADE.										
FORMULÁRIO PERTENCENTE A PETROBRAS N-0381-L										

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 2 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	I	ISBM/SIDS

ÍNDICE

1	OBJETIVO	3
2	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
3	NOMENCLATURAS	3
4	INTRODUÇÃO	4
5	CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	4
5.1	Dados do Solo	4
5.2	– Modelagem do duto e acessórios.....	4
5.2.1	Conector	4
5.2.2	Restritor de Curvatura (Vértebra)	5
5.2.3	Duto Flexível.....	9
5.2.4	Módulo de Conexão Vertical (MCV)	10
5.2.5	Flutuadores.....	10
5.2.6	Pesos Mortos.....	11
5.2.7	Cabo do Guindaste do MCV	11
6	METODOLOGIA	12
6.1	Caso 1 – CVD de 2ª extremidade.....	12
6.2	Caso 2 – Condição de Equilíbrio – Análise Estática.....	13
6.3	Caso 3 – MCV Conectado ao Hub	14
6.4	Caso 4 – Teste Hidrostático	16
6.5	Caso 5 - Operação	18
6.6	Sistema de Referência e tabela de esforços	18
7	DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE CONFIGURAÇÃO.....	19
7.1	Posicionamento de Flutuadores	20
7.2	Peso Morto	20
7.3	Configuração da linha.....	21
7.3.1	CVD de 1ª extremidade	21
7.3.2	CVD de 2ª extremidade	22
7.4	– Considerações Finais.....	22
8	AÇÕES MITIGATÓRIAS.....	22

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 3 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

1 OBJETIVO



A presente especificação técnica visa apresentar, detalhadamente, a metodologia de análise atualmente utilizada para o cálculo de esforços em flange de MCV, bem como fornecer um guia para elaboração de configuração de CVD, norteando assim as análises numéricas de esforços em MCV na direção das soluções adotadas em campo.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- Ref./1/ I-ET-3000.00-1500-942-PMU-001 – Installation Methods;
- Ref./2/ ET-3000.00-1500-941-PMU-005 – Diretrizes para elaboração de configuração de CVD;
- Ref./3/ CT TDUT 002/2012 – Análise de Esforços em Flanges de MCVs Durante Operações de CVDs;
- Ref./4/ RL-3000.00-1500-941-PMU-012 – Procedimento de Análise para CVD de 2ª extremidade;

3 NOMENCLATURAS

- ISBM: Interligação Submarina
- CVD: Conexão Vertical Direta
- MCV: Módulo de Conexão Vertical
- PLSV: Pipe Laying Support Vessel

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 4 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

4 INTRODUÇÃO

O presente documento será dividido em três partes principais. A primeira tratará do procedimento de análise, isto é, como modelar o MCV, a linha e seus acessórios e quais são os procedimentos para obtenção das cargas no flange. Já a segunda parte tratará das recomendações e restrições para se chegar a uma configuração de operação operacionalmente segura e eficiente. Por fim, a terceira parte trará um guia de tomada de decisões quando forem necessárias ações mitigatórias para viabilização da CVD.

5 CONSTRUÇÃO DO MODELO

5.1 Dados do Solo

A tabela I informa os parâmetros de solo a serem utilizados como padrão em todas as análises.

Tabela I: Dados de solo

Dados	Valores	Unidade
Coef. atrito longt.	0,35	-
Coef. atrito transv.	0,9	-
Rigidez normal	100	kN/m/m
Rigidez cisalh.	10000	kN/m/m
Inclinação	0,00	graus

É importante salientar que os coeficientes de atrito são propriedades que não dependem apenas do solo, mas também do duto. Especificamente no *orcaflex*, estes coeficientes são informados como propriedades do duto flexível.

5.2 – Modelagem do duto e acessórios


Após a coleta das informações necessárias para o início das análises (dados de conector, MCV, vértebra, duto, etc), deve-se efetuar a construção do modelo matemático dos elementos.

5.2.1 Conector

Os dados de rigidez flexional, axial e torcional dos conectores devem ser calculados conforme as equações 5.2.1.a, 5.2.1.b e 5.2.1.c.

$$Rigidez\ flexional = EI = E \frac{\pi(OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{64} \quad (5.2.1.a)$$

$$Rigidez\ axial = EA = E \frac{\pi(OD_{pescoço}^2 - ID_{conector}^2)}{4} \quad (5.2.1.b)$$

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 5 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	I	ISBM/SIDS

$$Rigidez\ torcional = GJ = \frac{E}{2(1 + \nu)} \frac{\pi(OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{32} \quad (5.2.1.c)$$

Onde E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson do material. Via de regra, como todos os conectores são fabricados em aço, utilizar $E = 2,07 * 10^8 \text{ kN/m}^2$ e $\nu = 0,3$.

Um diâmetro externo equivalente é utilizado para representar o conector, determinado conforme a expressão 5.2.1.d.

$$m_{conector,ar} + m_{duto,ar,vazio} = m_{conector,submerso} + m_{duto,submerso,vazio} + \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot OD_{equivalente}^2}{4} \quad (5.2.1.d)$$

Onde os coeficientes m são os pesos lineares em kgf/m, e γ_w é a densidade da água salgada ($\gamma_w = 1025 \text{ kg/m}^3$). Caso o peso submerso do conector não seja informado, o mesmo deverá ser estimado utilizando-se um valor de densidade típico para o aço, $\gamma_{aço} = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Embora não corresponda à situação real, a expressão 5.2.1.d considera 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 de 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 do conector.

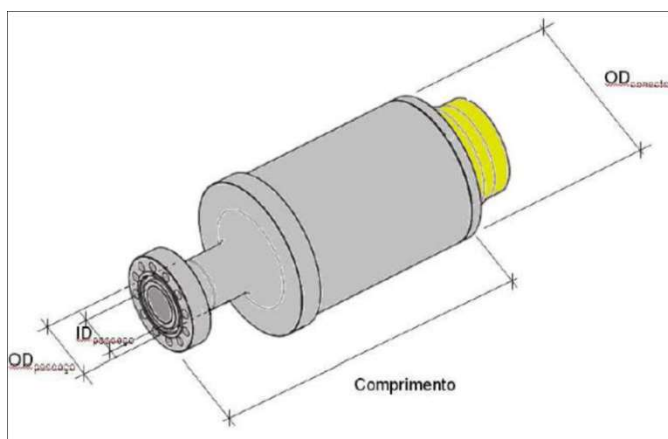




Figura 1: Conector genérico com suas principais dimensões.

5.2.2 Restritor de Curvatura (Vértebra)

a) Restritores Convencionais:

São considerados restritores (ou vértebras) convencionais os acessórios que não alteram a rigidez flexional do conjunto enquanto a sua curvatura crítica (Raio de travamento) não for atingida.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 6 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

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

- Diâmetro interno (ID) igual ao diâmetro externo do duto flexível;
- Diâmetro externo (OD) equivalente calculado de modo que o peso linear submerso da vértebra coincida com o informado no desenho, conforme equação 5.2.2.a.

$$OD_{equivalente} = \sqrt{\frac{4}{\pi \gamma_w} \left(\frac{P_{vértebraAR}}{L} - \frac{P_{vértebraÁGUA}}{L} \right) + ID^2} \quad (5.2.2.a)$$

Onde:

- $OD_{equivalente}$: diâmetro externo da vértebra a ser inserido no software (m)
- $\gamma_w = 1025 \text{ kgf/m}^3$
- $P_{vértebraAR}$: peso da vértebra no ar (kgf)
- $P_{vértebraÁGUA}$: peso da vértebra na água (kgf)
- L : comprimento da vértebra
- ID : diâmetro interno da vértebra

Ao contrário do que ocorre com conectores, nem todas as vértebras são feitas em aço. Há modelos feitos em polímero. Quando o peso submerso não for informado no desenho, verificar o material constituinte da vértebra. Em caso de aço, utilizar densidade de 7800 kg/m^3 . Em caso de outro material, a Petrobras deverá ser consultada.

- Rigidez axial e torcional por padrão assumirão o valor de 10 kN e 10 kNm^2 , respectivamente;
- Rigidez flexional de acordo com a tabela II

Tabela II: Dados de rigidez flexional a serem inseridos para a vértebra

Curvatura	Momento fletor
0	0
$\frac{1}{MBR_{vértebra}}$	0,01
$1 + \frac{1}{MBR_{vértebra}}$	$0,01 + EI_{vértebra}$
$EI_{vértebra} = 2,07 \cdot 10^8 \cdot \frac{\pi(D_{ext}^4 - D_{int}^4)}{64}$	

Onde D_{ext} e D_{int} são, respectivamente, os diâmetro externo e interno da menor seção transversal da vértebra, conforme informados no desenho do acessório, como no exemplo da figura 2.

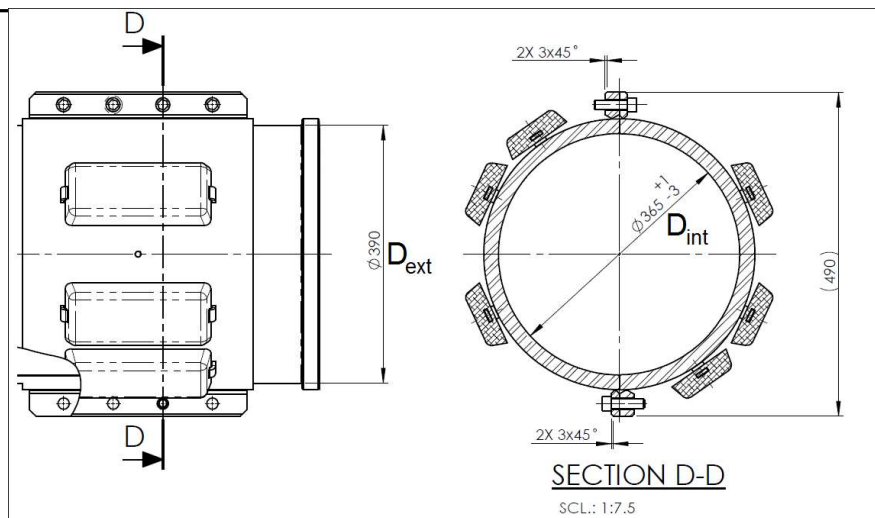


Figura 2: Diâmetros interno e externo da menor seção transversal da vértebra.

Adicionalmente, $MBR_{vértebra}$ é o raio de travamento da vértebra. A figura 3 ilustra um desenho típico de uma vértebra.

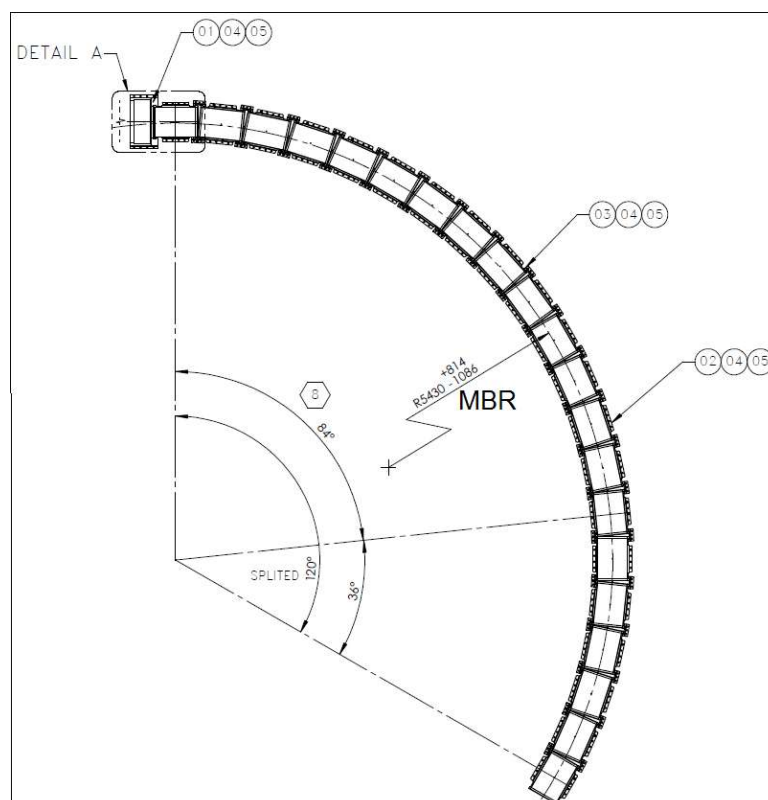


Figura 3: Vértebra típica, com indicação do MBR.

Usualmente, o raio de travamento vem informado com uma tolerância. Nas análises, deve-se usar sempre o maior valor. O mesmo ocorre com a informação do comprimento da vértebra. Assim, deve-se utilizar o comprimento máximo da vértebra sem incluir o comprimento do conector.

A modelagem da rigidez da vértebra convencional resulta num perfil de momento fletor x curvatura semelhante à mostrada na figura 4.

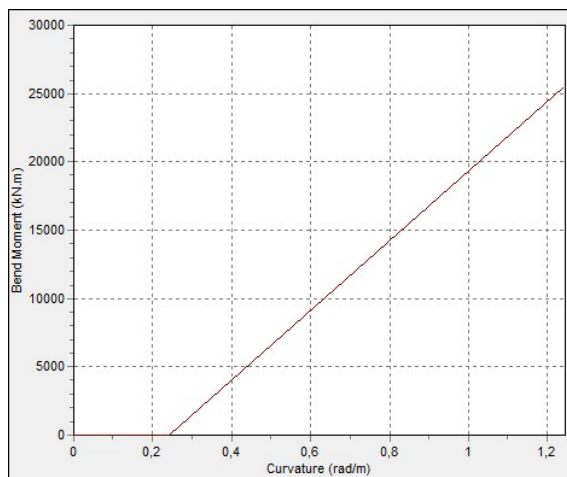


Figura 4: Gráfico momento x curvatura da vértebra.

Na figura 4, pode-se notar que a vértebra convencional não apresenta nenhuma resistência à flexão até que atinja o seu raio de travamento.

Por fim, a vértebra deverá ser modelada como elemento de linha e adicionada ao modelo como acessório (*attachment*) no *Orcaflex*.

b) **Restritores Não Convencionais:**

São considerados restritores (ou vértebras) não convencionais os acessórios que possuem qualquer característica construtiva que altere a rigidez flexional do conjunto mesmo quando a sua curvatura crítica (Raio de travamento) não é atingida.

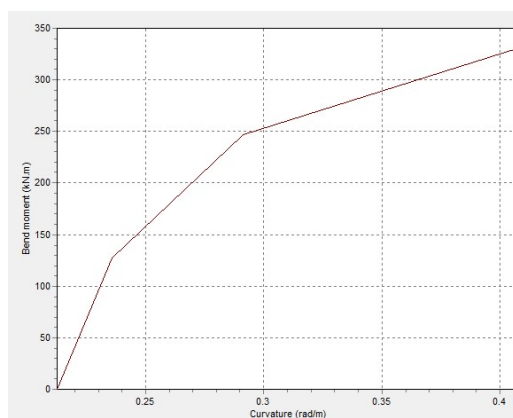




Figura 5: Exemplo de gráfico momento x curvatura de Vértebra não convencional (SlimGuard 15099-DWG-SBR-200, NOV)

Caso seja identificado que a vértebra não pode ser classificada como convencional, é mandatório que a sua curva momento fletor x curvatura seja informada pelo fornecedor do acessório, em formato de tabela numérica.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 9 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

5.2.3 Duto Flexível

O duto deverá ser modelado como elemento de linha da categoria “General” com as seguintes características:

- Diâmetros interno e externo calculados de modo a atender os pesos lineares informados na folha de dados da estrutura, conforme equações 5.2.3.a a 5.2.3.b.

$$D_{out} = \sqrt{\frac{4}{\pi \rho_w} (w_1 - w_2)} \quad (5.2.3.a)$$

$$D_{in} = \sqrt{\frac{4}{\pi \rho_w} (w_3 - w_2)} \quad (5.2.3.b)$$

Onde:



- $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$
- w_1 : peso linear do duto flexível vazio no ar (kg/m)
- w_2 : peso linear do duto flexível vazio na água (kg/m)
- w_3 : peso linear do duto flexível cheio d'água na água (kg/m)
- Rigidez flexional variável conforme as curvas de rigidez fornecidas conforme descrito na tabela III:

Tabela III: Descrição dos casos de medição da rigidez à flexão.

Casos de Carregamento
Caso 1: Rigidez Flexional (EI) na temperatura da máxima LDA de projeto, pressão interna igual a pressão atmosférica e pressão externa equivalente a máxima pressão da LDA de projeto (kN.m2)
Caso 2: Rigidez Flexional (EI) na temperatura da máxima LDA de projeto, pressão interna e externa ao duto equivalente a máxima pressão da LDA de projeto (kN.m2);
Caso 3: Rigidez Flexional (EI) na temperatura da máxima LDA de projeto, pressão interna igual a pressão de projeto acrescida da pressão devido a coluna de fluido (considerar linha cheia de água do mar) e pressão externa equivalente a máxima pressão da LDA de projeto (kN.m2);
Caso 4: Rigidez Flexional (EI) na temperatura da máxima LDA de projeto, 110% da pressão de projeto interna ao duto e pressão externa equivalente a máxima pressão da LDA de projeto (kN.m2); Atentar para o fato de que a pressão de teste é medida no topo, ou seja, deverá ser acrescentada a pressão hidrostática do fluido de teste no interior do duto (pior caso: água do mar)

Mais adiante será detalhado qual curva deverá ser escolhida para cada caso de simulação.

- Raio mínimo igual ao MBR operacional. Quando não informado, o MBR operacional deverá ser considerado equivalente ao MBR de armazenamento multiplicado por 1,5;
- Demais dados conforme informados na folha de dados;
- Uma extremidade conectada ao MCV, alinhada com o flange do *goose neck* e outra presa a um guincho, que será utilizado para movimentar verticalmente à extremidade superior da linha;

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 10 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

- Amortecimento estrutural proporcional à rigidez de 5% no período de 8,6s.

5.2.4 Módulo de Conexão Vertical (MCV)

O MCV deverá ser modelado como uma boia 6D, isto é, com 6 graus de liberdade: 3 de translação e 3 de rotação. Os dados de entrada para determinação dos pontos chave do MCV virão conforme ilustra a figura 6.

DADOS PARA ANÁLISE DE CARGAS DOS MCVs - FASE DE INSTALAÇÃO				
COTA (mm)	DESCRIÇÃO	INFORMAÇÃO		
		MCVP	MCVA	MCVU
CI	Ângulo do gooseneck	60°	60°	45°
A (0m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4807	4114	3443
A (4m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4547	4374	3733
A (8m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4797	4614	4053
A (12m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	5027	4894	4153
B	Distância vertical do olhal ao flange	833	833	985
C	Distância horizontal do olhal ao flange	1491	1491	1051
D	Distância vertical do flange ao centro de gravidade	601	615	305
E	Distância horizontal do flange ao centro de gravidade	1564	1679	1142
F	Distância vertical do flange a base do MCV	1964	1956	1197
G	Distância horizontal do flange ao centro do hub do MCV	1866	1851	1242
H	Posição do centro de gravidade em relação ao Eixo Y	50	50	7
	Peso do MCV submerso [kg]	5648	6752	3276

Figura 6: Exemplo de folha de dados de um MCV.



O analista tem liberdade para desenhar o MCV conforme achar adequado, devendo respeitar as coordenadas do olhal, flange e centro de gravidade. A linha deverá ser fixada ao flange com rigidez flexional e torcional infinitas e ângulo de inclinação α conforme modelo do MCV.

5.2.5 Flutuadores

Os flutuadores deverão ser modelados utilizando-se a ferramenta “3Dbuoy”. Isto é, com apenas os 3 graus de liberdade de translação. As propriedades de massa, volume, altura, áreas e coeficientes hidrodinâmicos deverão ser definidos conforme a tabela IV.

Tabela IV: Propriedades dos flutuadores.

Tabela IV.1 Propriedades do flutuador:													
MODELAGEM ORCAFLEX: FLUTUADORES 3D													
RELAÇÃO: EMPUXO X MASSA X VOLUME X ÁREA													
EMPUXO	MASSA	VOLUME	BULK MODULUS	ALTURA	ÁREA DE ARRASTO [m^2]			COEFICIENTES DE ARRASTO			COEFICIENTES DE MASSA ADICIONADA		
					X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
[ton]	[ton]	[m^3]	(kPa)	[m]									
0,1000	0,1429	0,2369	Infinity	0,8788	0,5149	0,5149	0,2696	1,0000	1,0000	0,8800	0,6570	0,6570	0,6370
0,2000	0,2857	0,4739	Infinity	1,1073	0,8174	0,8174	0,4280	1,0000	1,0000	0,8800	0,6570	0,6570	0,6370
<u>0,5000</u>	0,7143	1,1847	Infinity	1,5028	1,5056	1,5056	0,7883	1,0000	1,0000	0,8800	0,6570	0,6570	0,6370
1,0000	1,4286	2,3693	Infinity	1,8934	2,3899	2,3899	1,2514	1,0000	1,0000	0,8800	0,6570	0,6570	0,6370
2,0000	2,8571	4,7387	Infinity	2,3855	3,7938	3,7938	1,9864	1,0000	1,0000	0,8800	0,6570	0,6570	0,6370

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 11 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	 ISBM/SIDS	

Os flutuadores deverão ser conectados aos dutos através de elementos de *link* com as seguintes propriedades:

- Comprimento: 3m
- Rigidez axial: 1000kN

5.2.6 Pesos Mortos

O peso morto, assim como o flutuador, deverá ser modelado utilizando-se a ferramenta *3Dbuoy*. Neste caso, no entanto, não há preocupação com forças hidrodinâmicas. O volume informado para o peso morto é nulo e a massa igual ao peso do mesmo na água.

O peso morto deverá ser conectado ao duto através de elementos de *link* assim como feito com os flutuadores.

5.2.7 Cabo do Guindaste do MCV

O cabo do guindaste que sustenta o MCV deverá ter as seguintes propriedades:

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

A figura 7 ilustra o conjunto final formado por duto flexível, conector, vértebra, MCV, flutuadores e cabo do guindaste do MCV.

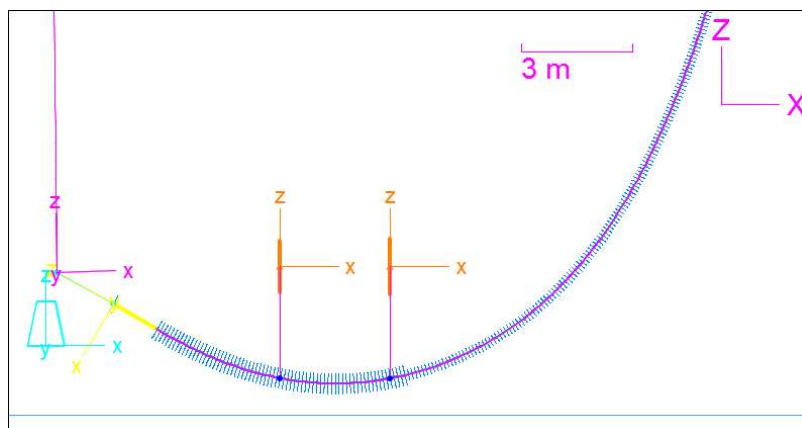



Figura 7: Exemplo de modelo para análise de CVD.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 12 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	I	ISBM/SIDS

6 METODOLOGIA

De posse do modelo numérico, contemplando todos os dados de entrada, segue-se agora para os casos de carregamento a serem analisados. Cada caso de carregamento irá fornecer um conjunto de esforços no MCV, composto por tração, força cortante e momento fletor. Por sua vez, cada combinação de carregamentos será submetida à avaliação do fabricante do equipamento para a verificação de sua integridade estrutural quando submetido a estes esforços.

A tabela V resume os casos de carregamento a serem considerados.

Tabela V: Casos de carregamento

Condição de carregamento	Caso de carregamento	Descrição	
Instalação	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 na posição vertical	
	Caso 3	MCV conectado ao HUB do equipamento submarino:	
		(i)	Linha suspensa com aplicação de movimento vertical do PLSV
		(ii)	Lançamento do duto flexível, momento em que ele toca o fundo do mar
Teste offshore	Caso 4.F	Teste hidrostático, 110% da pressão de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado. Flutuadores (ou pesos mortos) ainda presos ao duto.	
	Caso 4.SF	Teste hidrostático, 110% da pressão de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado. Flutuadores (ou pesos mortos) removidos.	
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. Flutuadores (ou pesos mortos) removidos.	

6.1 Caso 1 – CVD de 2ª extremidade

Os esforços para este caso são determinados por meio de um cálculo analítico simplificado, que considera a ELT (*estimated laying tension*) para definir a máxima carga de tração que atua no flange do MCV.



$$ELT = (LDA + 10) * FC * FAD * w \quad (6.1.a)$$

Onde:

LDA: Lâmina d'água;

FC: Fator de catenária;

FAD: Fator de amplificação dinâmica;

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 13 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

w: Peso linear do duto flexível na condição de instalação (submerso, e cheio d'água do mar ou vazio).

6.2 Caso 2 – Condição de Equilíbrio – Análise Estática

Esse caso visa representar a situação de conexão vertical de 1ª extremidade em que o MCV está bem próximo do HUB no instante a ser assentado. Deve ser criada uma configuração em que o ângulo de inclinação do MCV seja igual a zero com tolerância de $\pm 0,5^\circ$.

A partir deste caso de análise, é necessária a consideração da histerese no comportamento do duto flexível. No *Orcaflex*, dada a curva momento x curvatura, o comportamento histerético do duto flexível é inserido na caixa de diálogo aberta através do seguinte caminho: *Model Browser > Variable Data > Bending Stiffness* e, com a rigidez da linha selecionada, marcar a opção *histeretic*. É necessário também marcar a opção *Statics Model: Pressurized* na mesma janela.

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 à torção para infinita na extremidade da linha conectada ao MCV. A figura 8 mostra as janelas a serem abertas para que sejam feitas estas configurações.

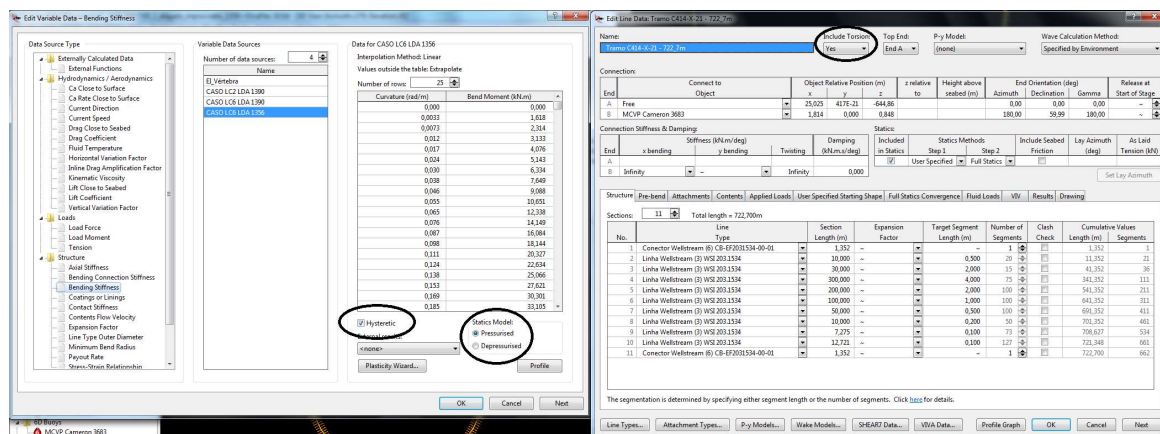




Figura 8: Inserção da histerese na rigidez à flexão do duto flexível no *Orcaflex*.

Outra especificidade do modelo que deve ficar a cargo do analista é a distância horizontal considerada entre o ponto de içamento do MCV e o ponto de saída da linha do PLSV, que pode variar de 13m a 70m. Os atuais modelos utilizam a distância de 30m, como mostra a figura 9.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 14 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	 ISBM/SIDS	

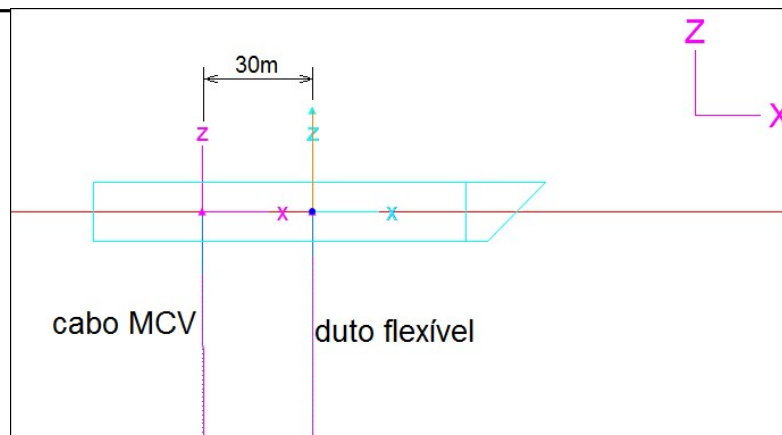


Figura 9. Esquemático representando a distância entre o ponto de lançamento da linha e o ponto de içamento do MCV.

Ao término da execução deste caso de carregamento, com o MCV devidamente verticalizado, deve-se obter os esforços de tração, cortante e momento fletor no flange do MCV bem como o menor raio de curvatura ao longo de toda a linha. A configuração final é utilizada para se proceder com a simulação dinâmica para as outras condições de carregamento.

6.3 Caso 3 – MCV Conectado ao Hub

Levando em conta a configuração obtida para a situação de equilíbrio com MCV verticalizado, deve-se efetuar uma análise dinâmica onde o duto é submetido a um deslocamento vertical ascendente (*heave up*) simulando uma passagem de uma onda de superfície, e em seguida é assentado no leito marinho até que os esforços no flange não sofram mais alteração. Para esta análise, o modelo deverá sofrer uma modificação na sua condição de contorno. A extremidade da linha conectada ao MCV deverá ter sua posição preservada, porém deverá ser engastada, simulando assim uma restrição de movimento do MCV devida ao seu assentamento no HUB. Isto pode ser feito utilizando-se a opção *Model > Use Specified Starting Shape for Lines* e em seguida excluindo-se o MCV do modelo. O *Orcaflex* irá automaticamente engastar a extremidade da linha na mesma posição em que foi salva.

A tabela VI fornece uma sugestão de como proceder com a análise. O analista poderá fazer alterações caso julgue necessário, a depender das características do modelo. O movimento vertical de 2,5m em 2,15s foi determinado baseado no período crítico de movimentos do PLSV Sunrise e, portanto, não deve ser alterado sem o consentimento da Petrobras.



	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 15 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

Tabela VI: Estágios da simulação dinâmica

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

O caso 3 é subdividido em dois momentos:

- Heave up*, logo após o MCV ser assentado no HUB, simulando uma onda passando pelo PLSV, com o propósito de determinar o momento máximo no flange do MCV no sentido de suspendê-lo;
- Primeiro contato entre o duto e o leito marinho durante o seu lançamento, com o objetivo de determinar os esforços no flange do MCV no instante em que ocorre o primeiro contato do duto com o fundo do mar.

Há ainda o momento final da simulação, onde, após o completo assentamento do duto no leito marinho, os esforços no flange se estabilizam, mas estes esforços finais não são contabilizados no caso 3 e sim nos casos 4 e 5, como será mostrado adiante.

A fim de que os resultados obtidos considerem a dinâmica do duto, o *heave up* deve ser aplicado 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 0,1 m/s (360 m/h) a 0,12 m/s (432 m/h) e uma velocidade de avanço do PLSV entre 0,1 m/s (0,195 nós) e 0,2 m/s (0,39 nós).

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:

- Altura do flange ao solo marinho nominal +52cm
- 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 da figura 10 exemplifica o comportamento do momento fletor no flange do MCV ao longo do tempo, onde são mostrados os três instantes mais importantes para a coleta de resultados.



	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 16 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	 ISBM/SIDS	



Figura 10: Curva típica de momento fletor ao longo do tempo

Para cada instante assinalado na figura 8, deve-se obter os esforços de tração e cortante associados. O pico de momento fletor devido ao movimento vertical do navio, juntamente com seus esforços associados, constituem os esforços a serem informados no caso 3i. Adicionalmente, também deverá ser informado para o caso 3i o menor raio de curvatura ao longo de todo o comprimento da linha durante toda a simulação.

Da mesma forma, o momento fletor correspondente ao instante em que o duto toca o solo marinho e seus respectivos esforços associados comporão o conjunto de esforços do caso 3ii.

Por fim, os esforços correspondentes à situação de duto completamente lançado não serão computados nos casos 3i e 3ii, porém deverão ser armazenados para serem utilizados nos casos 4 e 5.

Após a obtenção dos resultados, a configuração final da linha lançada sobre o solo deverá ser salva para que possa ser utilizada em outras simulações dinâmicas. Pode-se fazer isso utilizando novamente a opção *Model > Use Specified Starting Shape for Lines*.

6.4 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 distinta para o duto:

- Curva momento x curvatura de lançamento (CASO 3), sem consideração da histerese;
- Curva momento x curvatura de teste hidrostático, sem consideração da histerese.

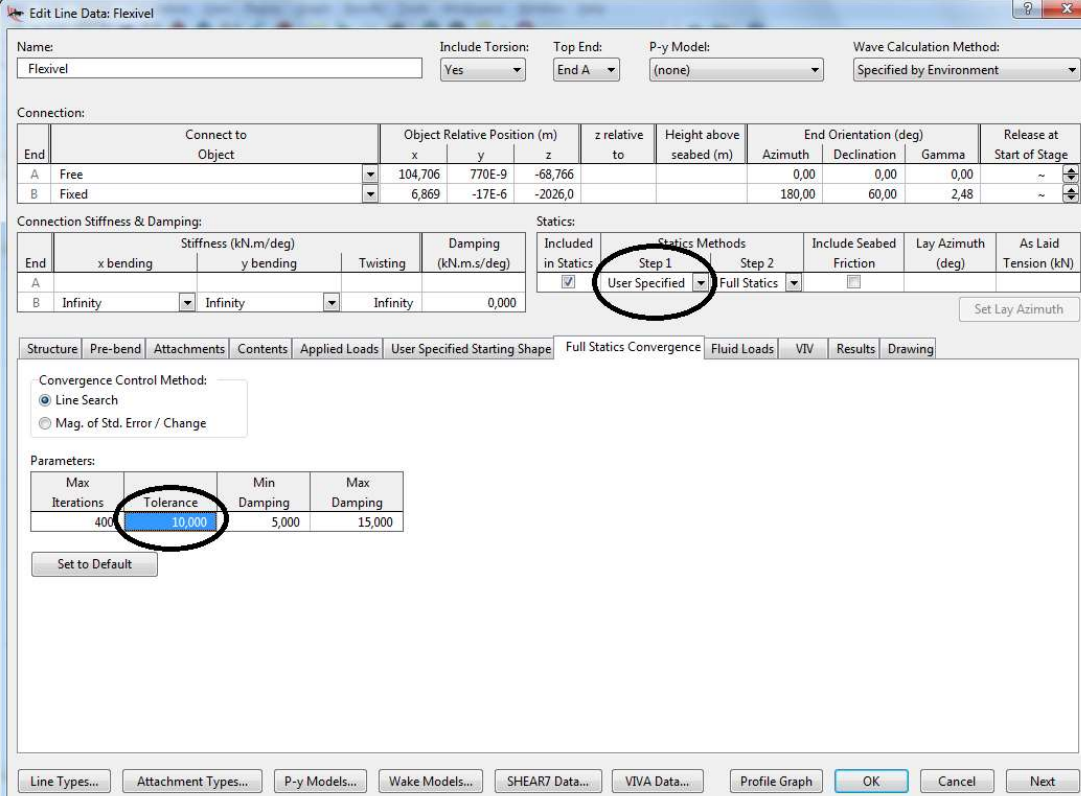
Ambas as análises devem ser executadas partindo da configuração final obtida na etapa de lançamento executada para o caso 3.

Para fazer a alteração da curva de rigidez, mantendo-se a configuração conforme obtida ao final da simulação do caso 3 deve-se seguir os seguintes passos:

- Após salvar os resultados da simulação do caso 3, salvar a configuração final do duto através da opção *Model > Use Specified Starting Shape for Lines*.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 17 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

- Feito isto, a simulação irá voltar ao arquivo .dat que a gerou. A diferença agora é que o primeiro passo do método cálculo de estática da linha terá mudado de *Catenary* para *User Specified*, conforme figura 11.



The screenshot shows the 'Edit Line Data: Flexivel' window. The 'Statics' tab is selected. In the 'Statics Methods' section, 'Step 1' is set to 'User Specified' (circled in red). In the 'Parameters' section, 'Tolerance' is set to '10,000' (circled in red). The 'Convergence Control Method' is set to 'Line Search'.



Figura 11: Janela *Line Data*, com detalhe da mudança do passo inicial da estática, e para o procedimento de mudança da tolerância.

- Salvar o arquivo com outro nome, selecionar a linha, selecionar a aba *Full Statics Convergence* (ver figura 11), e alterar a tolerância para 10.
- Fazer o mesmo com a tolerância de estática geral do modelo, selecionando *General* e em seguida a aba *Statics*.
- Alterar a curva de rigidez do duto para a curva de rigidez desejada. Isto deve ser feito para a curva de instalação sem histerese e para a curva de rigidez de teste hidrostático também sem histerese, gerando assim dois arquivos de simulação.

Esse procedimento irá fazer com que a análise estática convirja na primeira iteração, sem gerar alterações no modelo.

De posse dos dois modelos alterados conforme passo-a-passo descrito acima, deverá ser executada simulação de 50 segundos. O duto irá se reconfigurar devido à nova rigidez imposta. Uma vez estabilizados os esforços no flange, colher os resultados.

É importante lembrar que o valor do comprimento inicial do guincho deve ser alterado para equivaler ao valor final obtido na simulação do caso 3. Caso contrário o duto será abruptamente puxado para cima no início da simulação dinâmica.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 18 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			 ISBM/SIDS

De posse de todos os resultados, os esforços do caso 4 serão computados conforme as equações 6.4.a, 6.4.b e 6.4.c.

$$T_{Caso4} = T_2 - T_1 + T_0 \quad (6.4.a)$$

$$V_{Caso4} = V_2 - V_1 + V_0 \quad (6.4.b)$$

$$M_{Caso4} = M_2 - M_1 + M_0 \quad (6.4.c)$$

Onde:

T_0 , V_0 e M_0 correspondem aos esforços no flange ao fim da simulação do caso 3 (curva de lançamento com histerese);

T_1 , V_1 e M_1 correspondem aos esforços no flange ao fim da simulação dinâmica de 50 segundos com a curva de lançamento sem histerese;

T_2 , V_2 e M_2 correspondem aos esforços no flange ao fim da simulação dinâmica de 50 segundos com a curva de teste hidrostático sem histerese;

Quando houver flutuador ou peso morto, o caso de teste hidrostático deverá ser avaliado antes e depois da remoção destes acessórios.

6.5 Caso 5 - Operação

O procedimento para obtenção dos carregamentos de operação é idêntico ao do caso 4, substituindo-se a curva de rigidez de teste hidrostático pela curva de operação. Este caso é avaliado apenas para o instante final da simulação, após a remoção dos flutuadores ou pesos mortos, caso houver.

6.6 Sistema de Referência e tabela de esforços

O sistema de referência para a representação dos esforços no flange do MCV está representado na figura 12.

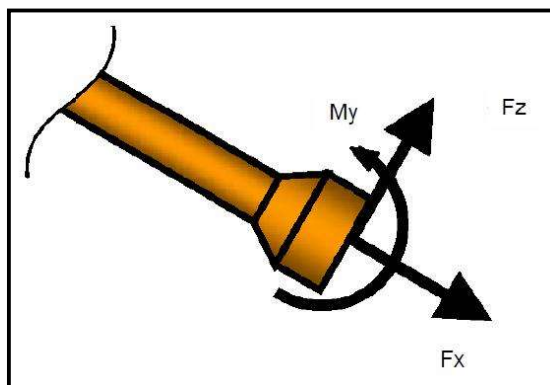



Figura 12: Sistema de referência para os esforços no flange do MCV.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 19 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	I	ISBM/SIDS

O conjunto de valores de esforços a serem extraídos das simulações de todos os casos resultará em uma tabela semelhante à tabela VII.



Tabela VII. Exemplo de resultados de uma análise de CVD

CASO DE CARREGAMENTO		ESFORÇO	VALOR
CVD 2ª - Topo (Caso 1)		Tração (Fx)	3337,79 kN
CVD 1ª - Equilíbrio (Caso 2 - Flutuadores)		Tração (Fx)	17,07 kN
		Força Cortante (Fz)	-28,98 kN
		Momento Fletor (My)	50,50 kN.m
		MBR	8,48 m
CVD 1ª -MCV no Hub com linha suspensa (Caso 3i - Flutuadores)		Tração (Fx)	-4,43 kN
		Força Cortante (Fz)	-14,77 kN
		Momento Fletor (My)	104,68 kN.m
		MBR	6,52 m
CVD 1ª -MCV no Hub (Caso 3ii - Flutuadores)	(a)	Tração (Fx)	20,90 kN
		Força Cortante (Fz)	-37,38 kN
		Momento Fletor (My)	-187,74 kN.m
	(b)	Tração (Fx)	19,25 kN
		Força Cortante (Fz)	-36,53 kN
		Momento Fletor (My)	-167,75 kN.m
CVD 1ª -MCV no Hub (Caso 3ii - Após retirada dos Flutuadores)	(a)	Tração (Fx)	16,17 kN
		Força Cortante (Fz)	-31,56 kN
		Momento Fletor (My)	-162,32 kN.m
	(b)	Tração (Fx)	17,41 kN
		Força Cortante (Fz)	-28,99 kN
		Momento Fletor (My)	-139,67 kN.m
CVD 1ª - Teste Offshore (Caso 4 - Flutuadores)	(a)	Tração (Fx)	20,64 kN
		Força Cortante (Fz)	-21,36 kN
		Momento Fletor (My)	-37,44 kN.m
	(b)	Tração (Fx)	17,43 kN
		Força Cortante (Fz)	-21,40 kN
		Momento Fletor (My)	-30,34 kN.m
CVD 1ª - Teste Offshore (Caso 4 - Após retirada dos Flutuadores)	(a)	Tração (Fx)	9,08 kN
		Força Cortante (Fz)	-32,94 kN
		Momento Fletor (My)	-145,55 kN.m
	(b)	Tração (Fx)	5,23 kN
		Força Cortante (Fz)	-31,79 kN
		Momento Fletor (My)	-126,06 kN.m
CVD 1ª - Operação (Caso 5 - Após retirada dos Flutuadores)	(a)	Tração (Fx)	9,86 kN
		Força Cortante (Fz)	-32,77 kN
		Momento Fletor (My)	-146,81 kN.m
	(b)	Tração (Fx)	6,39 kN
		Força Cortante (Fz)	-31,52 kN
		Momento Fletor (My)	-127,22 kN.m

Notar que todos os casos a partir do 3ii possuem os conjuntos de resultados (a) e (b), referentes à altura do flange ao solo +0,52m e -0,52m respectivamente.

7 DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE CONFIGURAÇÃO

Esta seção traz algumas recomendações e restrições quanto à elaboração das configurações de linha para verticalização do MCV. Estes parâmetros são fruto de experiência operacional e visam adequar os modelos computacionais ao que se pratica em campo, com foco na segurança e eficiência operacional.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE:	SUB/SSUB/ISBM/SIDS		FOLHA: 20 DE 21
	TÍTULO:	METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV		 ISBM/SIDS

7.1 Posicionamento de Flutuadores


- **Proximidade do MCV:** Deve-se posicionar o primeiro conjunto de flutuadores, a contar do flange do equipamento, a uma distância mínima de 3 metros do mesmo. Esta precaução minimiza o risco de colisão com o equipamento e/ou seu painel de instrumentação.
- **Valores de empuxo líquido:** Buscar minimizar a quantidade de flutuadores por conjunto, compondo-os por unidades de 1000 kgf, 500 kgf, 200 kgf e 100 kgf. O valor de empuxo máximo recomendado por conjunto é de 2000 kgf.
- **Espaçamento:** Qualquer conjunto de flutuadores deverá estar a uma distância mínima de 3 metros dos conjuntos adjacentes.

Obs1: O termo “conjunto de flutuadores” refere-se ao arranjo de flutuadores ligado a um único ponto da linha. Na figura 7, por exemplo, tem-se 2 conjuntos de flutuadores.

Obs2: Os flutuadores devem ser liberados um conjunto de cada vez. Não há preferência na sequência de liberação.

7.2 Peso Morto

- Quantidade máxima em um único ponto: 300 kgf;
- Espaçamento mínimo entre pesos mortos: 1m.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS			FOLHA: 21 DE 21
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV			<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 30px; height: 30px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">I</div> ISBM/SIDS

7.3 Configuração da linha

7.3.1 CVD de 1ª extremidade

- Evitar configurações como a da figura 13, visto que a experiência em campo mostra que estas formas não são reproduzidas. O aspecto geral da configuração deve assemelhar-se ao da figura 14, onde a linha apresenta curvatura mais uniforme, com variação suave ao longo de todo o seu comprimento.

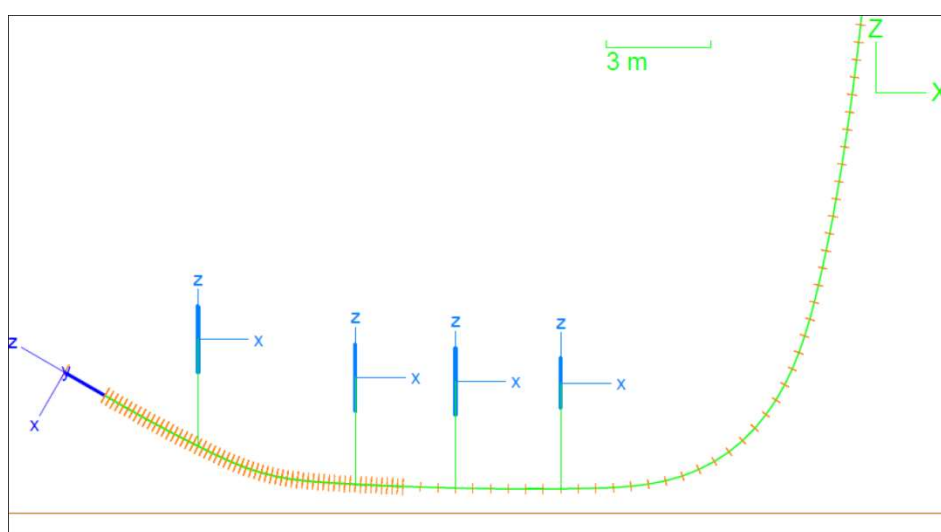


Figura 13: Exemplo de configuração a ser evitada

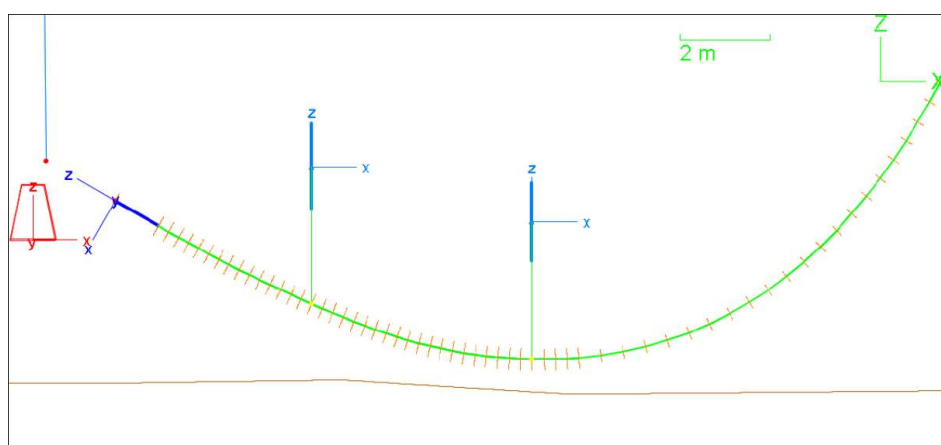




Figura 14: Exemplo de configuração adequada.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS	FOLHA: 22 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIRETRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV	 ISBM/SIDS	

7.3.2 CVD de 2ª extremidade

- Recomendação de posicionamento de alças para corcova segundo feedback operacional: Alças a mais de 20 metros do flange do MCV não tem se mostrado efetivas para verticalização. Posições relatadas como mais efetivas estão entre 10 e 13 metros do flange do MCV.
- Utilizar alças de 3 metros de comprimento espaçadas de 3m entre si.
- É obrigatório haver corcova bem formada. Ver exemplo na figura 15.

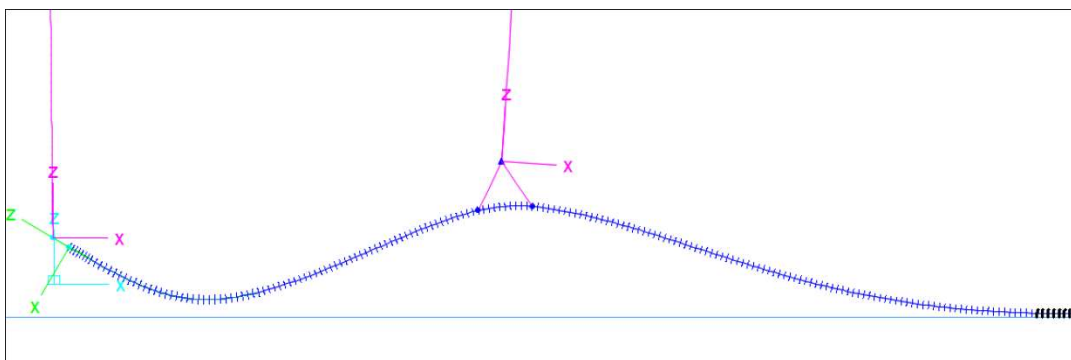


Figura 15: Exemplo de configuração para CVD de 2ª extremidade.

7.4 – Considerações Finais

Ao seguir as diretrizes acima, o analista estará alinhando seu modelo numérico com as práticas de instalação adotadas atualmente, tornando-o mais fidedigno. Vale ressaltar que, embora se deva buscar ao máximo atender às recomendações aqui expostas, haverá casos em que isto não será possível. É competência do analista identificar tais casos e adotar a solução mais eficaz, visando sempre a praticidade e a segurança operacional.

8 AÇÕES MITIGATÓRIAS

Em alguns casos, nem mesmo a utilização de flutuadores ou de pesos mortos irá viabilizar a verticalização do MCV sem que ocorra travamento do restritor de curvatura e/ou sem que a configuração toque no solo marinho ainda na fase do equilíbrio. Nestes casos, algumas ações podem ser tomadas para viabilizar a operação. São elas :

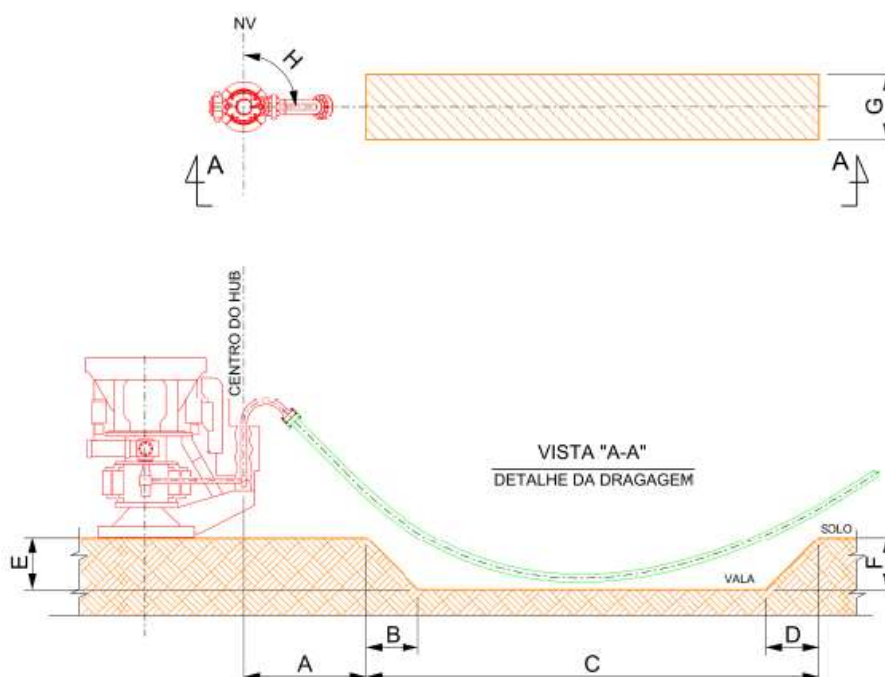
- **Admissão de travamento da vértebra:** Aceitação de travamento parcial da vértebra durante a simulação, quando não for possível evitar o travamento da vértebra mesmo com uso de flutuadores. Neste caso, o momento fletor máximo admissível na vertebra deve ser respeitado.

- **Redução do heave up:** A redução do movimento vertical imposto à linha deve ser aplicada quando as tentativas de respeitar o momento admissível da vértebra com o uso de flutuadores estiverem esgotadas, ou quando for necessário reduzir as cargas no flange do MCV.

Obs: O movimento vertical mínimo é de 1,8 m



- **Dragagem do solo marinho:** Remoção de parte do solo marinho abaixo da linha para aumentar a altura entre o flange do equipamento e o solo. Esta ação somente deve ser adotada quando as duas anteriores não puderem viabilizar a instalação, ou quando não há possibilidade de verticalizar o MCV sem que a linha toque o solo marinho.

Caso esta alternativa venha a ser adotada, a dragagem deverá ser realizada de modo que a linha passe centralizada longitudinalmente pela vala. As medidas da vala deverão ser informadas no relatório, de acordo com o desenho da figura 16, e do arquivo "dragagem.dgn", em anexo.



DADOS DA DRAGAGEM		
A	DISTÂNCIA DO CENTRO DO HUB AO INÍCIO DA VALA	
B	DISTÂNCIA HORIZONTAL DO DECLÍNIO 1	
C	COMPRIMENTO TOTAL DA VALA	
D	DISTÂNCIA HORIZONTAL DO DECLÍNIO 2	
E	PROFUNDIDADE 1	
F	PROFUNDIDADE 2	
G	LARGURA DA VALA	
H	AZIMUTE DA LINHA FLEXÍVEL	

Figura 16: Detalhamento de dragagem.

	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA		Nº: ET-3000.00-1500-941-PMU-006	REV C
	CLIENTE: SUB/SSUB/ISBM/SIDS		FOLHA: 24 DE 21	
	TÍTULO: METODOLOGIA E DIREITRIZES PARA ANÁLISE DE CARGAS EM MCV		 ISBM/SIDS	

A profundidade informada refere-se à profundidade máxima da vala.

O analista deverá esgotar todas as possibilidades antes de partir para uma das opções acima, pois todas elas causam impacto negativo na operação, seja por restrição da condição de mar, aumento do risco de dano a equipamentos ou necessidade de disponibilizar recursos adicionais, como embarcações auxiliares.