

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Avaliação da flambagem local e verificação do
colapso no lançamento de dutos rígidos submarinos**

Daniel Fabião Setti
Luis Felipe Gomes Barbosa
Thais Abrahão Lucas da Silva

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Maio de 2014**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Avaliação da flambagem local e verificação do
colapso no lançamento de dutos rígidos submarinos**

Daniel Fabião Setti
Luis Felipe Gomes Barbosa
Thais Abrahão Lucas da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Industrial Mecânica

Prof. Orientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Maio de 2014**

DEDICATÓRIA

Dedicamos este projeto aos nossos pais por sempre acreditarem em nosso potencial. E por terem nos apoiado nos momentos mais difíceis da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio, confiança e total suporte dos nossos pais e familiares durante o curso e essencialmente durante a elaboração do projeto.

Agradecemos ao nosso orientador por todo o tempo e atenção dedicados à nós durante o desenvolvimento do projeto.

Agradecemos aos engenheiros mecânicos Marcelo Hertz e Fabiana Mayworm sempre dispostos a nos ajudar quando solicitados.

Agradecemos a instituição CEFET-RJ pela estrutura e aos professores pelo conhecimento adquirido ao longo do curso.

RESUMO

O rápido crescimento da indústria de óleo e gás e a descoberta do Pré-Sal no Brasil tem resultado em novas pesquisas para superar os desafios tecnológicos da extração de óleo e gás em águas ultraprofundas. Para estes ambientes severos a melhor alternativa é utilizar dutos rígidos, pois estes possuem estrutura simples que reduzem o custo de fabricação e possuem maior resitência à falha em águas ultraprofundas. Este projeto propõe a verificação de flambagem local e colapso de um duto rígido com especificação DNV LSAW 450 durante a fase de instalação em águas ultra profundas pelo método *S-Lay*. Este cálculo será realizado de acordo com a norma DNV-OS-F101. Os resultados obtidos pela norma serão comparados com o modelo analítico proposto com base na mecânica dos sólidos, relacionando força e deslocamento.

Palavras Chave: Dutos rígidos, Flambagem local, Colapso.

ABSTRACT

The fast growth of the oil industry and the discovery of the pre salt fields in Brazil have been resulting in new approaches to overcome the technological challenges of oil extraction at several thousand meters of water depth. In such a harsh environment, the best alternative is the rigid pipeline utilization, because it has a simple structure which reduces the manufacturing cost and has a higher resistance to failure in ultra-deep waters. This project proposes a verification of local buckling and collapse of a rigid pipeline, with specification DNV LSAW 450, during the installation phase in ultra-deep water by the S-Lay method. It will be calculated according to DNV-OS-F101 standard. The standard's results have been compared with the proposed mechanics of solids analytical models, which relate forces and displacements.

Keywords: Rigid pipeline, Local Buckling, Collapse

SUMÁRIO

1.Introdução	1
1.1 Motivação e Justificativa	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia e Trabalho Realizado.....	2
1.4 Organização do Trabalho.....	3
2.Descrição dos métodos de instalação	4
2.1 Método de instalação por <i>S-Lay</i>	4
2.1.1 Introdução ao Método <i>S-Lay</i>	4
2.1.2 <i>Stinger</i>	5
2.2 Atividades durante a instalação de dutos rígidos pelo método <i>S-Lay</i>	6
2.2.1 Inicialização.....	6
2.2.2 Procedimento de inicialização	7
2.3 Método de Instalação por <i>J-Lay</i>	9
2.4 Método <i>S-Lay</i> para águas ultraprofundas	10
2.5 Método de instalação por " <i>Reeling</i> "	11
2.6 Comparação entre os principais métodos de lançamento	14
3.Embarcações de lançamento.....	15
3.1 Embarcação <i>Deep Blue</i> para o método de <i>Reeling</i> e <i>J-lay</i>	15
3.2 Embarcação FDS2 para os métodos <i>J-lay</i> e <i>S-lay</i> (opcional).....	16
3.3 Embarcação <i>Allseas Solitaire</i> para o método <i>S-lay</i>	17
3.4 Embarcações tipo DLB (<i>derrick lay barge</i>) para o método <i>S-lay</i>	19
3.5 Comparação entre os embarcações e métodos utilizados.....	20
4.Duto Rígido Submarino.....	21
4.1 Classificação da linha	21
4.2 Processo de fabricação.....	22
4.2.1. Tubos com costura.....	22
4.2.2. Tubos sem costura	24
5.Modos de falha	25
5.1 Efeito Brazier.....	25
5.2 Ruptura por pressão interna.....	26
5.3 Fadiga	26
5.4 Flambagem Local	26
5.4.1. Flambagem seca	29
5.4.2. Flambagem molhada.....	29
5.4.3 Bifurcação.....	30
5.5 Colapso	31
6.Estudo de caso: A análise do método <i>S-Lay</i> para águas ultraprofundas	33
6.1 Análise da Catenária.....	33
6.1.1 Formulação do comprimento da catenária.....	33
6.1.2 Parâmetros envolvidos.....	34

6.2. Cálculo das solicitações no duto.....	36
6.2.1 Equilíbrio Estático	39
6.2.2 Análise de Gráficos para Tração Efetiva e Tração no Tensionador.	41
6.3. Cálculo dos deslocamentos radiais	43
6.3.1. Teorema de Castigliano	44
6.3.2. Método da Superposição	46
6.3.3 Análise de tensões pelo critério de von Mises.....	47
6.3.2. Deslocamento radial e Ovalização na seção transversal localizada no TDP.....	50
6.3.3. Deslocamento radial e Ovalização na seção transversal localizada no Tensionador	53
7. Metodologia utilizada pela Norma DNV-OS-F101.....	56
7.1 Flambagem Localizada.....	56
7.1.1 Colapso do sistema	56
7.1.2 Propagação de Colapso.....	58
7.2 Critério de Carregamento Combinado.....	59
7.2.1 Condição de carregamento controlado	59
7.3 Condição de deslocamento controlado	61
7.4 Aplicação da norma para o modelo	62
8. Conclusão	64
Referências Bibliográficas.....	65
ANEXOS	68
ANEXO A: Equilíbrio estático	
ANEXO B: Análise de tensões no TDP	
ANEXO C: Análise de tensões no Tensionador	
ANEXO D: Ovalização no TDP	
ANEXO E: Ovalização no Tensionador	
ANEXO F: Verificação do colapso e flambagem local pela DNV OS F101	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do lançamento do Método <i>S-Lay</i> (modificado) [1].	5
Figura 2: Balsa de apoio para transporte de tubos de 12 m [2].	5
Figura 3: Representação do <i>stinger</i> na embarcação (modificada) [3].	6
Figura 4: DMA iniciando lançamento [14].	7
Figura 5: Configuração para início de instalação (modificada) [15].	7
Figura 6: Etapa de finalização de lançamento (modificada) [15].	8
Figura 7: Esquema do lançamento do Método <i>J-Lay</i> [4].	9
Figura 8: Verticalização na saída do <i>stinger</i> [5].	10
Figura 9: Base em terra (<i>Spool base</i>)[6].	11
Figura 10: Atividade de bobinamento (<i>spooling</i>)[7].	12
Figura 11: Embarcações com carretel na horizontal [9].	13
Figura 12: Embarcação com carretel na vertical [9].	13
Figura 13: <i>Deep Blue</i> (Technip) Vista real [10].	15
Figura 14: Embarcação FDS2 Saipem [11].	16
Figura 15: Torre de lançamento ajustável [11].	17
Figura 16: Embarcação <i>Allseas Solitaire</i> [12].	18
Figura 17: Embarcação <i>Allseas Solitaire</i> com <i>stinger</i> [12].	18
Figura 18: Tensionador da embarcação <i>Allseas Solitaire</i> [12].	19
Figura 19: Embarcação DLB (<i>Iroquois</i>) Vista real [13].	19
Figura 20: Duto rígido submarino [16].	21
Figura 21: <i>Flowlines</i> conectados às terminações fixas [17].	22
Figura 22: Desenho esquemático do processo de fabricação UOE (modificado) [3].	23
Figura 23: Seção transversal do duto imperfeito aumentada [3].	23
Figura 24: Processo de fabricação de tubos por extrusão (modificada) [3].	24
Figura 25: Efeito Brazier [18].	25
Figura 26: Flambagem Local [20].	26
Figura 27: Razão alta D/t [3].	27
Figura 28: Razão moderada D/t [3].	27
Figura 29: Razão baixa D/t [3].	28
Figura 30: Modo de falha tipo diamante [18].	28
Figura 31: Modo de falha tipo barril [18].	29
Figura 32: Deslocamento radial de um duto submetido a pressão externa não linear [3].	30
Figura 33: Colapso no duto [3].	31
Figura 34: Ponto de Bifurcação. [19]	32
Figura 35: Representação dos parâmetros (modificada) [22].	35
Figura 36: Tração efetiva e peso aparente (modificada) [17].	37
Figura 37: Solicitações atuantes no equilíbrio estático (modificado).[25].	39
Figura 38: Força de reação do <i>stinger</i> (modificado) [3].	40
Figura 39: Força X Profundidade.	41
Figura 40: Força X Profundidade da catenária.	42
Figura 41: Momento fletor X raio de curvatura	43

Figura 42: Força pontual (P) e diagrama de equilíbrio da seção transversal.....	44
Figura 43: Disposição das sapatas na seção transversal.	46
Figura 44: Método da superposição.....	47
Figura 45: Força Normal com relação ao ângulo.	48
Figura 46: Momento fletor em relação ao ângulo	48
Figura 47: Tensão referente ao ângulo no quadrante.	49
Figura 48: Comportamento do deslocamento em relação ao ângulo.....	51
Figura 49: Simplificação das cargas no TDP.	51
Figura 50: Força em relação ao deslocamento radial no ponto A.	52
Figura 51: Força em relação ao deslocamento radial no ponto C.	52
Figura 52: Ovalização - Diâmetro máximo e mínimo [3].	53
Figura 53: Deslocamento radial em relação ao ângulo.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicabilidade [1, 3, 8, 9].	14
Tabela 2: Dados das embarcações [10, 11, 12 , 13].	20
Tabela 3: Dados de projeto	36
Tabela 4: Resultados da análise de tensões no Tensionador	50
Tabela 5: Resultado da análise de tensões no TDP	50
Tabela 6: Deslocamentos radiais e ovalização no tensionador e no TDP.	55

LISTA DE TERMOS E SÍMBOLOS

Águas ultraprofundas (*ultra deep water*)- profundidades maiores ou iguais a 2000 m

S-Lay – método de lançamento no qual o perfil do duto assemelha-se a um “S”

J-Lay- método de lançamento no qual o perfil do duto assemelha-se a um “J”

Reeling- método de lançamento com fabricação do duto em terra e enrolamento em um carretel

Stinger- rampa de lançamento utilizada no método *S-Lay*

J-Lay Tower- torre de lançamento utilizada no método *J-Lay*

Spool base- Base em terra utilizada para fabricação e bobinamento do duto no método *Reeling*

Overbend- região de curvatura no duto na rampa de lançamento

Sagbend- região de curvatura do duto na região próxima ao ponto de contato com o solo

Touchdown Point (TDP)- Primeiro ponto de contato do duto com o leito marinho

Dinamic Positioning (DP) – Posicionamento dinâmico da embarcação

Dead Man Anchor (DMA) – Âncora utilizada para início da fase de lançamento

Lay down- lançamento da segunda extremidade do duto

Joint - Tubos de 12 m de comprimento

Riser - duto posicionado verticalmente, ou em catenária, conectando o poço à plataforma.

Flowlines - duto com a maior parte do seu comprimento apoiado no leito marinho, que se conecta às unidades fixas ou aos *risers*

UOE – Processo de fabricação do duto

Efeito Brazier- Ovalização devido à flexão pura

Flambagem local (*local buckling*) – Ovalização excessiva da seção transversal do duto

Colapso (Collapse) – Falha que inutiliza o duto sendo necessária sua troca

SMYS – Tensão de escoamento

SMTS – Tensão de resistência

DNV LSAW 450 – Duto certificado pela DNV fabricado através de soldagem longitudinal e com limite de escoamento de 450 MPa

L_c – Comprimento da catenária

θ_{SS} – Ângulo de inclinação do *stinger* com a horizontal

x_c – Distância do TDP até saída do *stinger*

x_{TDP} – Distância entre TDP e a embarcação

T_{ef} – Tração efetiva

w – Peso submerso por unidade de comprimento

P_{ad} – Peso aparente da catenária

R_C - Raio de curvatura

N_{T_r} – Força Normal de contato de uma sapata com o duto

Sapata – Ponto de contato do duto com o tensionador

Tensionador – Equipamento utilizado para manter a tração do duto. Possui a função de manter o formato da catenária

δ – Deslocamento Radial da seção transversal

f_0 – Ovalização

Capítulo 1

1.Introdução

As últimas décadas destacaram-se pela crescente atividade de exploração de petróleo e gás no Brasil e no mundo. Os combustíveis fósseis passaram a ser vistos como a principal fonte de energia, tornando-se assim de grande importância para o desenvolvimento econômico e tecnológico. O Brasil encontra-se em uma posição privilegiada com relação à oferta de petróleo e de gás natural.

Recentes descobertas na área do pré-sal demandarão grandes quantidades de recursos financeiros, humanos e tecnológicos e deverão levar o Brasil a sua auto-suficiência na produção desses combustíveis e conduzir o país a uma posição relevante como exportador no mercado internacional.

A descoberta da área do Pré-Sal vem ratificar o Brasil como país explorador de combustíveis fósseis a grandes profundidades (*ultra deep water*) a qual nos leva a constantes pesquisas e desenvolvimentos de novas técnicas a fim de aperfeiçoar a exploração final desses produtos.

Dentro deste contexto no qual tecnologias inovadoras são aplicadas, destaca-se a necessidade de embarcações de instalação de dutos rígidos cada vez maiores, a fim de conseguir vencer as barreiras impostas pelas grandes profundidades existentes.

O Brasil deverá demandar a instalação de 8 mil km de dutos submarinos em águas ultraprofundas entre 2012 e 2017. O volume representará 19% da demanda global projetada para o período. A previsão faz parte de um estudo de mercado produzido pela consultoria norte-americana *Quest Offshore*, especializada na área de óleo e gás. A instalação destes dutos submarinos aumentará a malha dutoviária nacional.

Segundo o plano de negócios da Petrobras (petrolífera detentora da maior parte do mercado de exploração e produção de combustíveis fósseis do país), até 2017, serão produzidos diariamente mais de 1 milhão de barris de petróleo só no Pré-Sal. Para atingir essa meta, o Plano de Negócios e Gestão 2013-2017 foca na área de Exploração e Produção.

Conforme mencionado anteriormente, a instalação de dutos submarinos em águas profundas envolve métodos caros e de alta complexidade tecnológica, requerendo embarcações especializadas com custo diário elevado e análises que garantem a integridade estrutural do duto durante toda a vida útil do projeto (instalação, testes e operação).

Estas avaliações são feitas baseadas em dados oriundos da região na qual esses dutos serão instalados, bem como, baseados em normas internacionais e especificações técnicas desenvolvidas para suprir a necessidade dessas avaliações.

1.1 Motivação e Justificativa

Com base nas análises a serem desenvolvidas para instalação desses dutos, destaca-se a necessidade da análise de falhas dos mesmos.

Esta avaliação se faz necessária uma vez que a perda de dutos por flambagem local e posterior colapso trarão prejuízos de custo e prazo não previstos.

Assim, de forma a evitar tais impactos essa avaliação deve ser feita em toda e qualquer atividade de instalação de dutos submarinos, seja ela em águas rasas ou em águas profundas, a fim de reduzir o risco de dano aos dutos.

1.2 Objetivos

Serão apresentados dentro deste projeto as modalidades de instalação dos dutos submarinos rígidos, suas embarcações e a aplicabilidade de cada um dos métodos.

O objetivo principal é análise da seção transversal nas regiões críticas afim de evitar a flambagem local e colapso.

1.3 Metodologia e Trabalho Realizado

Para as análises apresentadas neste projeto serão realizados cálculos utilizando os conceitos da mecânica dos sólidos e critérios estabelecidos pela norma DNV-OS-F101.

Será utilizado o software MATHCAD 14.0 para a realização dos cálculos do modelo analítico proposto e critérios baseados na norma. Todas as análises a serem

realizadas serão com base na bibliografia do projeto, nos conhecimentos adquiridos no curso de graduação de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ e também na consulta e nivelamento de conhecimentos com o professor orientador e profissionais da indústria *offshore*.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado em oito capítulos.

No Capítulo 1 apresenta-se o tema selecionado e a metodologia a ser desenvolvida no projeto.

No Capítulo 2 são apresentados e descritos os principais métodos de instalação de dutos rígidos no leito marinho e as atividades realizadas como inicialização, *Lay Down*, recuperação e abandono.

O Capítulo 3 aborda as principais embarcações utilizadas para a realização das atividades de lançamento, em conjunto, são apresentados dados técnicos, suas principais características e uma breve comparação entre elas.

O Capítulo 4 apresenta o duto rígido, o processo de fabricação e a classificação das linhas após o lançamento.

No Capítulo 5 são abordados os principais modos de falha com ênfase no tema proposto pelo trabalho: flambagem e colapso.

No Capítulo 6 são apresentados os cálculos das solicitações na catenária através do equilíbrio estático, além dos deslocamentos radiais e ovalizações.

O Capítulo 7 é apresentado a metodologia utilizada pela norma DNV-OS-F101 para a verificação do colapso e da flambagem local.

No Capítulo 8, Conclusão, é realizada a comparação entre os resultados obtidos por mecânica dos sólidos e pela norma.

Capítulo 2

2. Descrição dos métodos de instalação

A instalação de dutos submarinos constitui algumas das mais desafiadoras operações na área *offshore*. Os desafios tecnológicos trouxeram grandes pesquisas no setor, estudos relacionados aos diferentes métodos de instalação, bem como, novas ferramentas computacionais para execução das simulações numéricas.

Os métodos mais comuns de instalação são:

- Método *S-Lay*;
- Método *J-Lay*;
- *Reeling*.

Nos tópicos a seguir os métodos serão descritos, assim como, sua aplicabilidade nas atividades de instalação.

2.1 Método de instalação por *S-Lay*

O método tradicional de instalação de dutos *offshore* em águas relativamente rasas é referido basicamente como método *S-Lay*. O perfil do duto assemelha-se a um “S” durante a sua instalação até tocar o leito marinho. Durante o lançamento do duto através da popa da embarcação de instalação e antes do mesmo alcançar o leito marinho, sua suportação   feita através de uma estrutura met lica treliçada equipada com roletes mais conhecida como “*stinger*”, ilustrado na Figura 3. Esta região   conhecida como *overbend*. Assim que o duto toca o leito marinho   formada uma segunda região conhecida como *sagbend*.

2.1.1 Introdu o ao Método *S-Lay*

O método *S-Lay* consiste na constru o e montagem de dutos em uma embarca o de instala o e seu posterior lançamento, formando a catenária em forma de “S”.

O projeto de lançamento define a curvatura estabelecida até o apoio total do duto no solo marinho.

A Figura 1 retrata o esquema do lançamento do método *S-lay*. Ao iniciar a atividade, tubos de 12 m são aproximados por uma balsa de apoio, representado na Figura 2.

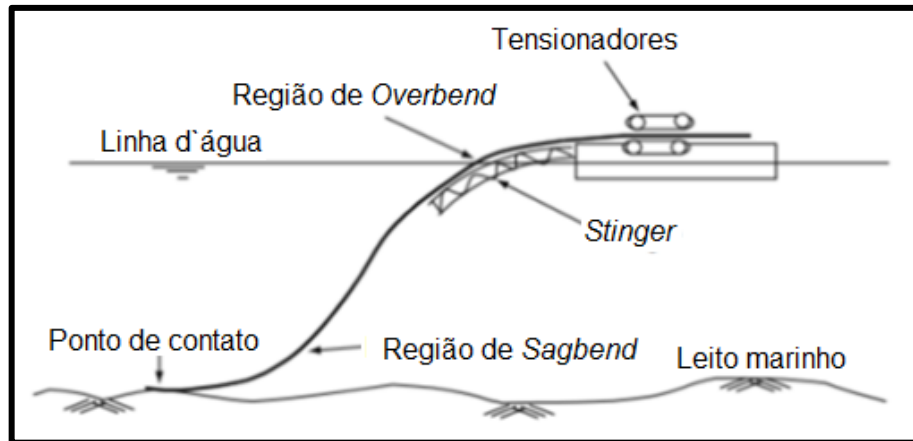


Figura 1: Esquema do lançamento do Método *S-Lay* (modificado) [1].

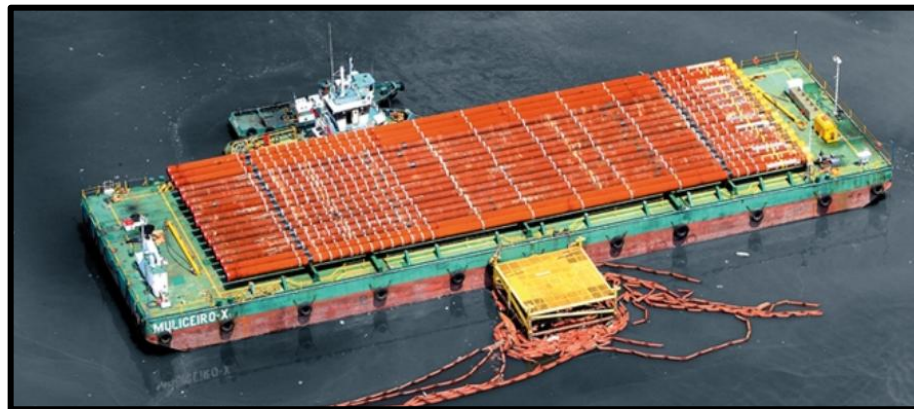


Figura 2: Balsa de apoio para transporte de tubos de 12 m [2].

2.1.2 *Stinger*

O *stinger* realiza o controle da deflexão do duto na área de *overbend* (região localizada acima do ponto de inflexão do duto). Ele é utilizado para suavizar ou eliminar a forte variação angular que o duto sofre ao deixar a embarcação a fim de evitar picos de momento fletor (*bending moment*) no último rolete do *stinger* os quais podem causar a flambagem localizada.

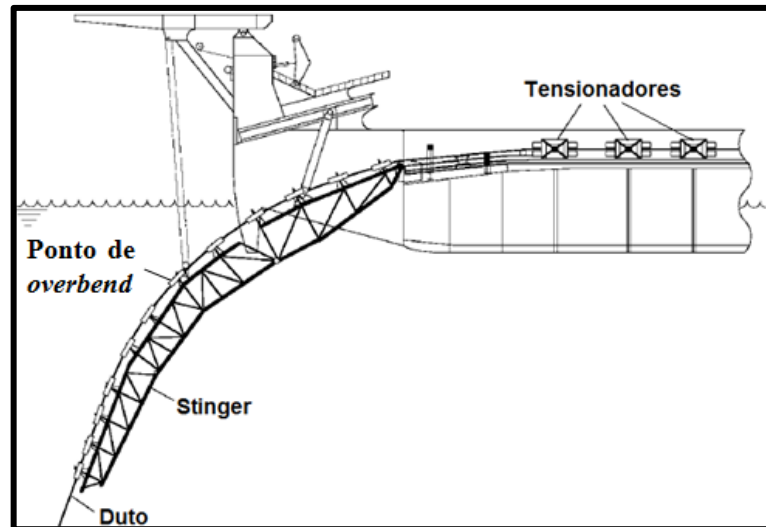


Figura 3: Representação do *stinger* na embarcação (modificada) [3].

2.2 Atividades durante a instalação de dutos rígidos pelo método *S-Lay*.

A instalação de dutos rígidos é dividida nas seguintes operações: inicialização, finalização da operação, eventuais abandonos e recuperações. Todas estas operações devem ser simuladas e analisadas antes do lançamento.

2.2.1 Inicialização

No início da operação de lançamento é necessário que a extremidade livre do duto esteja presa a um ponto fixo. O controle do comportamento do duto permite a redução da tração imposta à linha, evitando assim, que a mesma sofra uma severa flexão. Normalmente, este ponto fixo é representado por âncoras, pernas de plataformas ou embarcações com posicionamento dinâmico (DP).

Após a definição do posicionamento, é iniciado o lançamento de uma âncora denominada *Dead man anchor* (DMA), mostrada na Figura 4. Uma vez a âncora posicionada corretamente a embarcação irá arrastá-la e enterrá-la no leito marinho para evitar escorregamento durante o lançamento do duto. Normalmente para essa operação utiliza-se âncoras modelo *Delta Fliper*.



Figura 4: DMA iniciando lançamento [14].

2.2.2 Procedimento de inicialização

Inicialmente posiciona-se a âncora *Dead Man Anchor* a uma distância igual a requerida para o comprimento do cabo afastado do local de destino do duto. Em seguida o cabo de âncora é tensionado até a tensão especificada para verificar que não há escorregamento do mesmo.

Em seguida, o cabo da âncora é cortado de acordo com a distância especificada pelo projeto e fixado na cabeça de instalação que é guiado pela âncora até o assentamento no leito marinho, conforme representa a Figura 5.

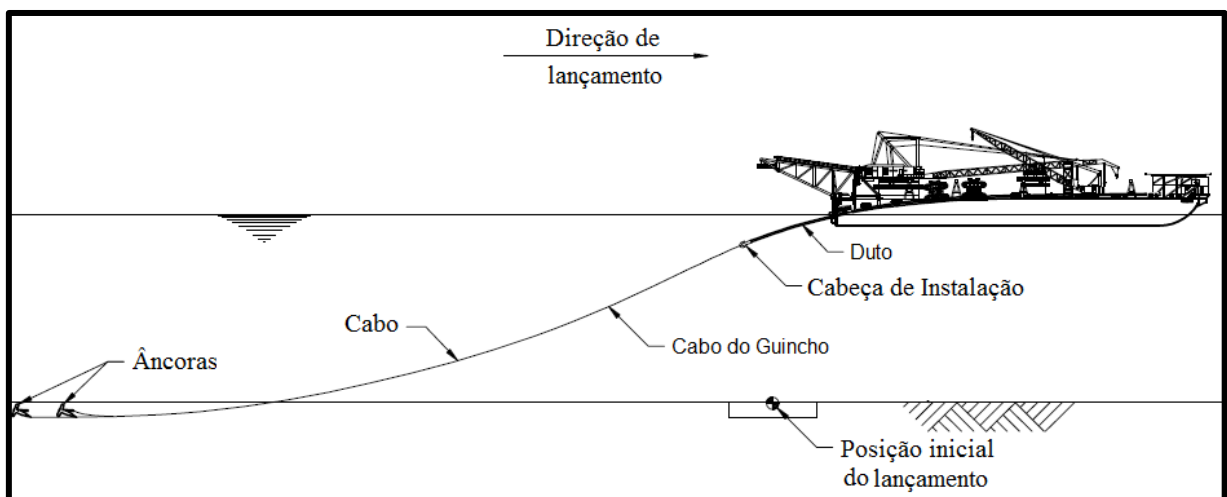


Figura 5: Configuração para início de instalação (modificada) [15].

Na medida em que a soldagem dos tubos é executada, o lançamento é sincronizado a essa operação e ao deslocamento da embarcação.

Em seguida inicia-se a operação chamada *Lay Down*. Nesta operação a primeira ponta do duto é guiada por um cabo que é ancorado ao fundo do mar. O duto pode ser lançado livre até uma determinada profundidade e então um cabo é conectado à extremidade livre.

Ao término da etapa de linha de montagem, inicia-se o *lay down* também conhecido como lançamento de segunda extremidade, que consiste no lançamento da segunda ponta da linha podendo ser conectada ou não a um equipamento. O guincho da embarcação é responsável por auxiliar o lançamento suportando toda carga da catenária e do equipamento, até a linha alcançar o leito marinho. Neste momento, a tração anteriormente exercida pelo tensionador, é aplicada pelo guincho para finalização do lançamento, conforme a Figura 6.

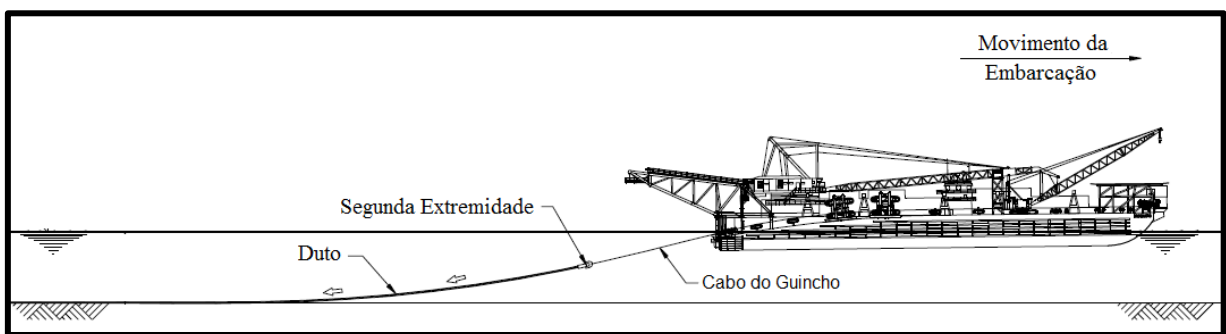


Figura 6: Etapa de finalização de lançamento (modificada) [15].

Todas as situações passíveis de acontecer durante a instalação do duto devem ser simuladas e analisadas. Estas incluem não só o lançamento propriamente dito, mas também a inicialização e a finalização da operação, além de eventuais abandonos e recuperações que caracterizam-se de forma planejada ou não.

Uma operação não planejada ocorre por motivo de emergência, devido às condições climáticas e marítimas, nesses casos é preciso abandonar o duto no mar.

Quando as operações de lançamento forem interrompidas, a extremidade do duto abandonado deve ser bem tamponada, não devendo ser reaberta até o reinício das atividades.

2.3 Método de Instalação por *J-Lay*

O método *J-lay* é uma variação do método *S-lay*, pois a rampa de lançamento é construída em uma posição quase vertical, sendo transformada em uma torre de lançamento conhecida como *J-Lay Tower*. Este arranjo não necessita da utilização de *stinger* e, conseqüentemente, o duto não possui uma curvatura *overbend* próximo à saída da embarcação. Todo o comprimento da linha fica suspenso na forma de uma catenária em J, como mostra a Figura 7.

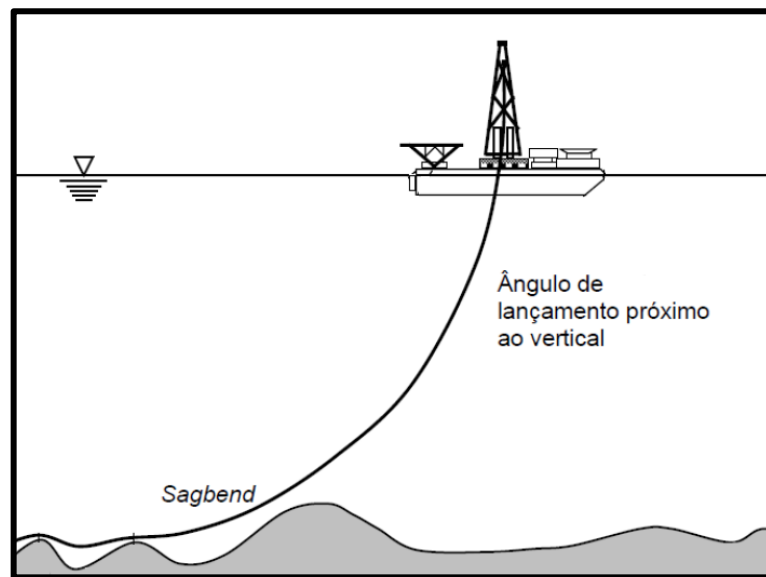


Figura 7: Esquema do lançamento do Método J-Lay [4].

O duto deixa a embarcação em ângulo quase vertical, as maiores tensões estão na curvatura no *sagbend*. Não há a necessidade de limitar a catenária suspensa em função do comprimento de *stinger*. Desta forma, as tensões de lançamento são mais baixas que as relacionadas aos outros métodos. Conseqüentemente, o *touchdown point* (TDP) não é tão afastado da embarcação como no método *S-Lay*. Esta característica ajuda no posicionamento da embarcação e torna o lançamento mais preciso.

A torre que suporta a rampa de lançamento possui elevada altura, afetando significativamente a estabilidade da embarcação. Caso seja adotado em águas muito rasas, o lançamento em *J-Lay* pode acarretar em curvaturas muito acentuadas no *sagbend*, ocasionando o aumento de tensões, podendo ocorrer falhas.

O processo de montagem do duto é realizado na embarcação com o abastecimento de material proveniente de balsas de apoio, ilustrada na Figura 2.

No primeiro momento, ocorrem as fases de pré-fabricação de dutos, na qual os tubos de 12 m são soldados, formando um *double joint* (união de dois tubos com 12 m cada totalizando 24 m) ou *quad joint* (união de quatro tubos com 12 m cada, totalizando 48 m). No segundo momento, o duto passa pelos sistemas de elevação que o posiciona na vertical e de transferência para a torre de lançamento, onde é feita a montagem através de alinhamento, soldagem, inspeção por ultrassom e revestimento. Concluídas estas operações o duto está preparado para ser lançado.

2.4 Método *S-Lay* para águas ultraprofundas

As tecnologias de lançamento de dutos rígidos têm sido aprimoradas constantemente e atualmente é possível utilizar o método em *S-Lay* não apenas em águas rasas, mas também em águas ultraprofundas. Utilizados em profundidades de 1000 até 3000 m, fazendo com que esse novo método atinja lâminas d'água antes apenas alcançadas pelo método em *J-Lay*.

Essa nova forma de lançar apresenta as mesmas características do método convencional *S-Lay* com relação à construção e fabricação da linha rígida. Diferindo principalmente pela configuração adotada da rampa, de maneira a obter-se maior verticalização na saída do *stinger*, conforme apresentado na Figura 8. As demais diferenças são atribuídas a necessidade de altos valores de tração nos tensionadores e o alto nível de deformação do duto na região de *sagbend*.



Figura 8: Verticalização na saída do *stinger* [5].

Com relação aos aspectos econômicos, o lançamento em *S-Lay* para águas ultra profundas é preferido ao método *J-Lay* por reduzir o tempo de operação, pois permite um grande número de estações de trabalho para soldagem e revestimento, o que configura maior produtividade nas operações.

Contudo, em águas ultraprofundas, o *S-Lay* necessita de uma curvatura elevada na região do *stinger* de maneira a adquirir um ângulo de saída próximo da vertical, o que pode gerar deformações plásticas nas paredes do duto. Além de requerer maior capacidade dos tensionadores para manter o duto suspenso.

A sequência de fabricação nas embarcações de *S-Lay* para águas profundas segue basicamente a configuração proposta para o *S-Lay* tradicional.

2.5 Método de instalação por "*Reeling*"

No método de lançamento *Reel-Lay*, a fabricação da linha é realizada em uma base *onshore* (*Spool Base*), ilustrada na Figura 9, e bobinada em um carretel, como mostra a Figura 10, que pode possuir até 30 m de diâmetro [8]. Em seguida a bobina é estocada no convés de uma embarcação que é responsável pelo transporte e instalação.



Figura 9: Base em terra (*Spool base*)[6].



Figura 10: Atividade de bobinamento (*spooling*)[7].

Esse método de instalação propicia um ambiente de trabalho mais seguro e estável. A instalação por *reeling* pode ser até 10 vezes mais rápida do que outros métodos convencionais. Isto permite que o lançamento ocorra quando as boas condições climáticas possuem um curto período de tempo [1].

Os custos dos trabalhos neste método são reduzidos, pois permitem operações como soldagem, ensaios não destrutivos, revestimentos anti-corrosão sejam executadas *onshore*, em comparação com os mesmos procedimentos realizados *offshore*.

Na maioria das vezes esta forma de instalação utiliza dutos de até 18” (457 mm) de diâmetro. Os dutos bobinados não podem ser revestidos por concreto, pois este é um material com dureza elevada e frágil, assim ocorrendo a ruptura ao ser enrolado. Esta deformação plástica seguida pelo tensionamento do duto pode causar perda de espessura de parede e resistência do material em determinadas áreas do duto [8]. Motivo pelo qual a espessura de parede precisa ser maior do que as usadas nos outros métodos.

Depois de enrolada a bobina é colocada na embarcação e levada para o local de instalação. O duto bobinado pode ser instalado pelo método *S-Lay* ou *J-Lay* dependendo da posição da bobina (horizontal ou vertical) na embarcação e da profundidade.

O método *S-Lay* é aplicado quando a bobina encontra-se na posição horizontal, ilustrado na Figura 11 e a profundidade é intermediária. A embarcação pode ser estaticamente (uso de âncoras) ou dinamicamente posicionada (posicionamento via GPS).



Figura 11: Embarcações com carretel na horizontal [9].

O método *J-Lay* é utilizado quando a bobina encontra-se na vertical, ilustrado na Figura 12 e a profundidade é intermediária ou ultraprofunda. Neste caso, para essa configuração, a embarcação é sempre dinamicamente posicionada.



Figura 12: Embarcação com carretel na vertical [9].

O carregamento imposto ao duto no método *reeling*, está relacionado a dois modos de falha: *local buckling* (flambagem localizada) e *plastic collapse* (colapso plástico). Os outros modos de falha nos dutos lançados pelo método *reeling* são: ovalização, deformação plástica acumulada e crescimento de trincas (fratura).

2.6 Comparação entre os principais métodos de lançamento

A Tabela 1 a seguir faz uma comparação entre as profundidades de utilização, vantagens e desvantagens de cada método de lançamento.

Tabela 1: Aplicabilidade [1, 3, 8, 9].

Método	Utilização	Vantagem (s)	Desvantagem (s)
<i>J-Lay</i>	Adequado para a instalação em águas profundas e ultraprofundas.	-Apropriado para instalar dutos de grande diâmetro e revestido com concreto. - Tensões menores pois não há <i>overbend</i>	- Não é apropriado para a instalação de dutos em águas rasas; - Baixa taxa de produção devido à soldagem em uma única estação.
<i>S-Lay</i> Convencional	Utilizado para fazer o lançamento de dutos rígidos em lâminas d'água rasas e intermediárias.	-Alta taxa de produção devido a várias estações de trabalho; -Apropriado para instalar duto revestido com concreto.	- Necessidade de controlar a curvatura imposta pelo <i>stinger</i> (<i>overbend</i>).
<i>S-Lay</i> para águas ultraprofundas	Esse método é utilizado em águas ultraprofundas (1000 até 3000 m) com o auxílio de embarcações capazes de posicionar o <i>stinger</i> em um ângulo com aproximadamente 90°.	- Reduz o tempo de operação garantindo maior produtividade em relação ao método <i>J-Lay</i> .	- Necessita de uma curvatura elevada na região do <i>stinger</i> ; - Requer maior capacidade dos tensionadores.
<i>Reel-Lay</i>	Adequado para águas rasas e ultraprofundas	- Instalação 10 vezes mais rápida; - Custos menores nos trabalhos devido à fabricação do duto <i>Onshore</i> .	- Comprimento limitado implicando no retorno à base para recarregar o carretel; - Não é adequado para instalação de duto revestido com concreto; - Limitação de diâmetro do duto em até 18" e necessidade de maior espessura de parede.

Capítulo 3

3. Embarcações de lançamento

Nos tópicos a seguir são descritas as embarcações utilizadas nos seguintes métodos de lançamentos: *S-Lay*, *J-Lay* e *Reeling*. Assim como, suas características, capacidade e dados operacionais.

3.1 Embarcação *Deep Blue* para o método de *Reeling* e *J-lay*

A embarcação *Deep Blue*, ilustrada na Figura 13, é uma estação de construção e lançamento de dutos. A embarcação combina os métodos *Reel-Lay* (diâmetros de 4” a 18”) e *J-Lay* (diâmetros de 4” a 28”) permitindo a instalação de dutos flexíveis e rígidos em águas profundas e ultraprofundas (até 3000 m), além de acomodar cerca de 160 tripulantes [10].



Figura 13: *Deep Blue* (Technip) Vista real [10].

Os tensionadores do *Deep Blue* são capazes de sustentar uma carga de 550 toneladas e são projetados para dutos rígidos ou flexíveis. A embarcação pode carregar até 10.000 toneladas de duto em uma mesma viagem [10].

3.2 Embarcação FDS2 para os métodos *J-lay* e *S-lay* (opcional)

A embarcação FDS2, ilustrada na Figura 14, é apta para fazer o lançamento de dutos com 4” a 36” de diâmetro e de transportar até 325 trabalhadores a bordo. Sua torre de lançamento (*J-Lay Tower*) é capaz de implantar *quad joints* em tensões de linha de até 1.500t e de suportar tensões na catenária de até 2.000t [11].



Figura 14: Embarcação FDS2 Saipem [11].

Seu sistema versátil e funcional permite o ajuste do ângulo da torre de lançamento entre 0 e 96 graus e uma faixa de trabalho entre 45 e 96 graus, como mostra a Figura 15, admitindo que o mesmo faça lançamentos tanto em águas ultraprofundas (até 3.000 m) quanto em águas rasas. Além disso, a embarcação possui também uma rampa de lançamento (*stinger*) ajustável o que permite lançamentos no modo *S-Lay* [12].



Figura 15: Torre de lançamento ajustável [11].

3.3 Embarcação *Allseas Solitaire* para o método *S-lay*

A embarcação *Allseas Solitaire*, representada pela Figura 16, utiliza o método de lançamento *S-lay* sendo considerada uma das melhores do mundo, pois possui o recorde mundial de capacidade de lançamento atingindo 2.775 m de lâmina d'água em águas ultraprofundas. Esta embarcação possui um stinger de 97 m, ilustrada na Figura 17, que pode ser ajustado até ângulos próximos de 90° o que possibilita o lançamento *S-Lay* em águas ultraprofundas.

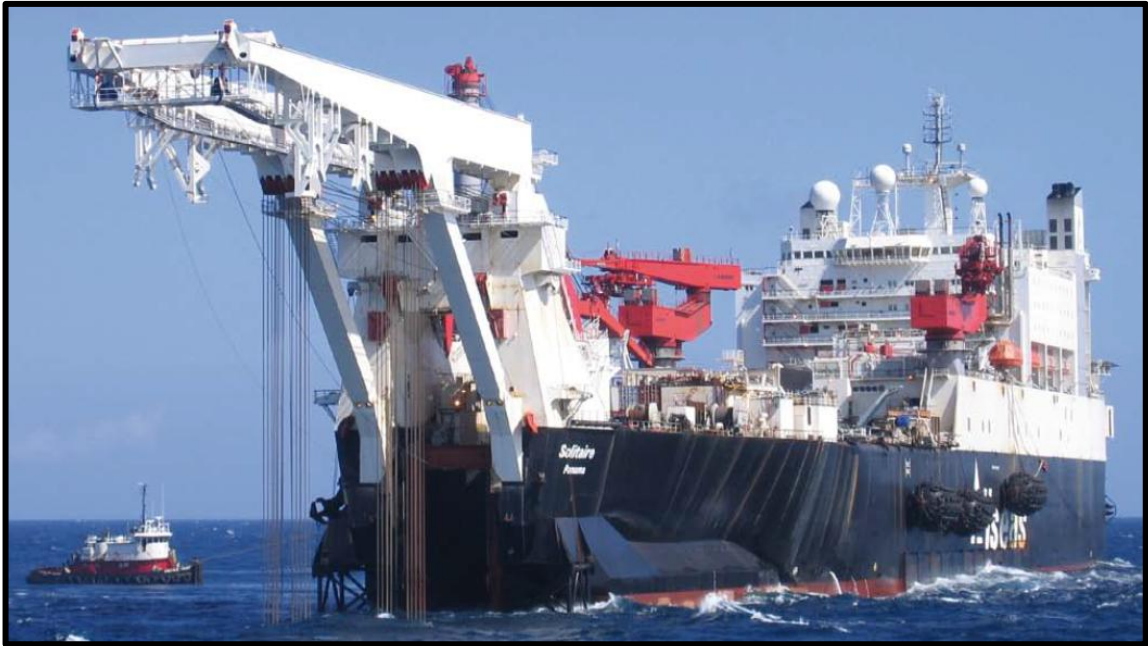


Figura 16: Embarcação *Allseas Solitaire* [12].

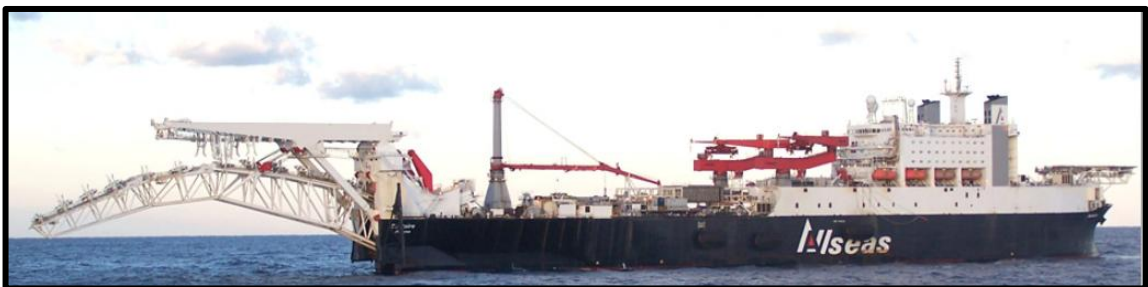


Figura 17: Embarcação *Allseas Solitaire* com *stinger* [12].

Esta embarcação possui comprimento total de 397 m (incluindo *stinger*) e largura de 41 m. Permite acomodação de até 420 pessoas e instala dutos de 2" a 60" de diâmetro no método *S-lay*. Os 3 tensionadores da embarcação possuem capacidade de 350t cada, com velocidade de lançamento de 30 m/min, conforme Figura 18 [12].



Figura 18: Tensionador da embarcação *Allseas Solitaire* [12].

3.4 Embarcações tipo DLB (*derrick lay barge*) para o método *S-lay*

Esta embarcação, mostrada na Figura 19, possui 122 m de comprimento e 30 m de largura. Ela acomoda 256 pessoas, possui 8 estações de trabalho e instala dutos de 4” a 48” de diâmetro através do método *S-Lay*. Seus tensionadores possuem a capacidade de suportar de 99 t até 199 t. Possui *stinger* e um guindaste de alta capacidade [13].



Figura 19: Embarcação DLB (*Iroquois*) Vista real [13].

3.5 Comparação entre os embarcações e métodos utilizados

A Tabela 2 a seguir faz uma comparação entre as embarcações utilizadas e seus respectivos métodos de lançamento.

Tabela 2: Dados das embarcações [10, 11, 12 , 13].

Embarcação	Método(s)	Profundidade	Diâmetro do duto	Capacidade Tensionador	Comprimento x Largura	Tripulação
<i>Deep Blue</i>	<i>Reeling/J-Lay</i>	3000 m	<i>Reeling: 4" a 18" J-Lay: 4" a 28"</i>	<i>Reeling: 550t J-Lay: 770t</i>	206,5 x 32 m	160 pessoas
FDS2	<i>J-Lay/S-Lay</i>	<i>J-Lay: 3000 m</i>	4" a 36"	<i>J-Lay: 2000t S-Lay 2 x 90t</i>	183 x 32 m	325 pessoas
<i>Allseas Solitaire</i>	<i>S-Lay</i>	2775 m	2" a 60"	3 x 350t	397 x 41m	420 pessoas
<i>DLB Iroquois</i>	<i>S-Lay</i>	700 m	4" a 48"	99t até 199t	122 x 30 m	256 pessoas

Capítulo 4

4.Duto Rígido Submarino

Os dutos, conforme a Figura 20, instalados pelas embarcações citadas no capítulo anterior tem sido amplamente utilizado nas últimas décadas para transportar fluidos derivados do petróleo. Em relação ao lançamento para águas profundas, o conceito de duto rígido é cada vez mais adequado para atender às necessidades, preferindo-se a sua utilização em comparação aos dutos flexíveis devido ao custo de fabricação e sua vida útil.



Figura 20: Duto rígido submarino [16].

4.1 Classificação da linha

Após o lançamento, o duto pode ser denominado *riser* e *flowlines* dependendo da sua disposição na linha.

- *Riser*: duto posicionado verticalmente, ou em catenária, conectando o poço à plataforma.

- *Flowlines*: duto com a maior parte do seu comprimento apoiado no leito marinho, que se conecta às unidades fixas ou aos *risers*, ilustrado na Figura 21.

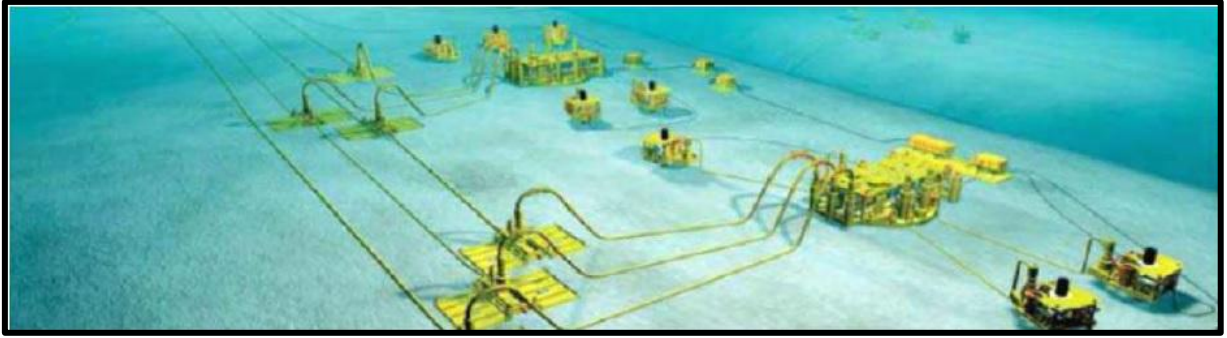


Figura 21: *Flowlines* conectados às terminações fixas [17].

4.2 Processo de fabricação

Os processos de fabricação podem resultar em tubos com união soldada (tubo com costura) ou sem união soldada (sem costura). A seguir serão apresentados os processos mais utilizados.

4.2.1. Tubos com costura

Segundo Kyriakides *et al* (2007) tubos com diâmetro externo maior do que 16” normalmente são fabricados através do processo chamado UOE.

Neste processo o tubo passa por uma prensa que faz com que a chapa de aço fique com o formato da letra “U” e em seguida passa por outra prensa que deixa a chapa no formato da letra “O”, como ilustrado na Figura 22. Após o tubo é soldado de forma automática longitudinalmente, interna e externamente por arco submerso e expandido a frio (etapa “E”). Após estas etapas o tubo passa por teste hidrostático, ultrasom, raio-X e inspeção de solda entre outros [3].

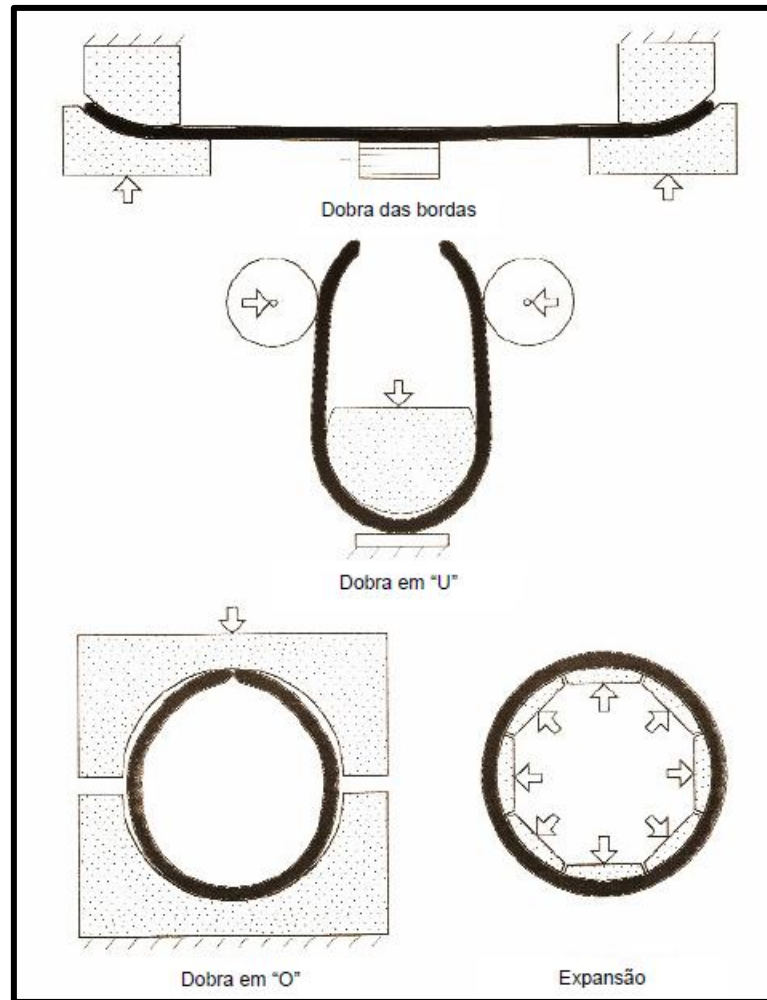


Figura 22: Desenho esquemático do processo de fabricação UOE (modificado) [3].

Após o processo de fabricação, a seção transversal é caracterizada como imperfeita, visto que com o procedimento de alterações e conformações das formas geométricas, as seções do duto não formam uma circunferência perfeita, conforme ilustra a Figura 23.

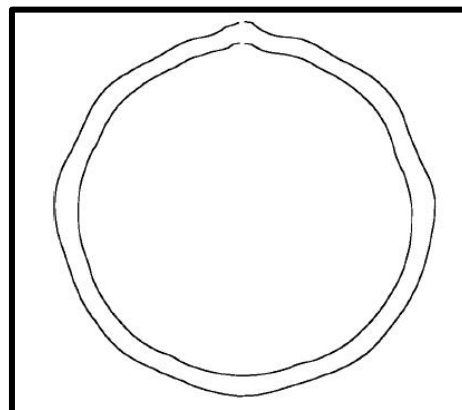


Figura 23: Seção transversal do duto imperfeita aumentada [3].

4.2.2. Tubos sem costura

Tubos sem costura são gerados a partir de barras de aço laminadas. Em uma primeira etapa a barra é aquecida, posicionada e pressionada contra um mandril para abrir a cavidade interna do tubo. Em seguida, com o diâmetro interno gerado, o tubo é expandido radialmente e laminado para melhorar a tolerância dimensional da parede e diminuir a ovalização imposta ao longo do processo. A Figura 24 ilustra o processo.

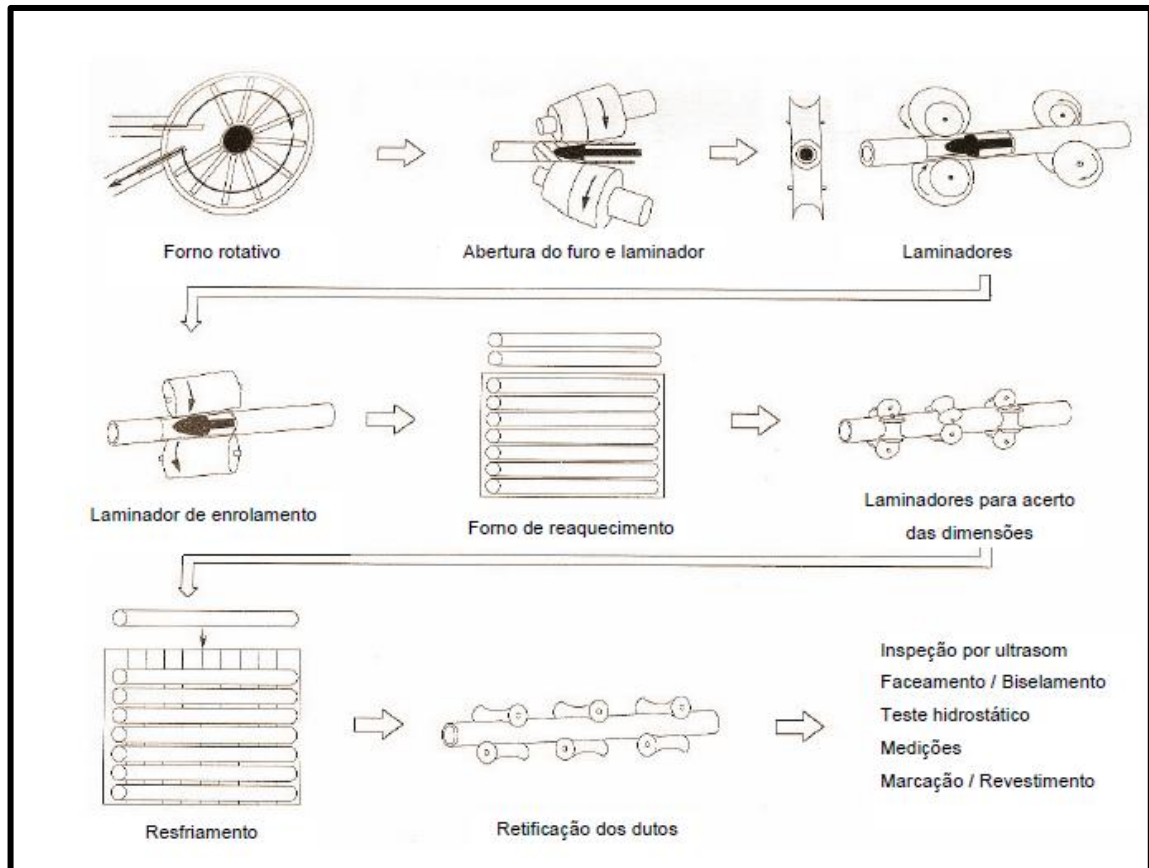


Figura 24: Processo de fabricação de tubos por extrusão (modificada) [3].

Capítulo 5

5.Modos de falha

Neste capítulo serão descritos os principais modos de falha que podem ocorrer no lançamento de dutos rígidos.

5.1 Efeito Brazier

A ovalização da seção transversal, estágio que antecede a flambagem do duto, na literatura é chamada de Efeito Brazier, e é estudado o efeito de deformação plástica localizada devido ao seu curvamento no lançamento, ocorrendo assim a falha pelos diferentes modos da relação D/t .

Quando um duto com seção transversal passível de deformação é submetido a flexão pura, ocorre uma alteração no estado de equilíbrio na forma geométrica da seção transversal. Esta alteração proporcionada por um achatamento, é chamada de ovalização. Esta mudança diminui a resistência e a rigidez à flexão. É importante destacar que este comportamento é não linear. A Figura 25 ilustra o efeito.

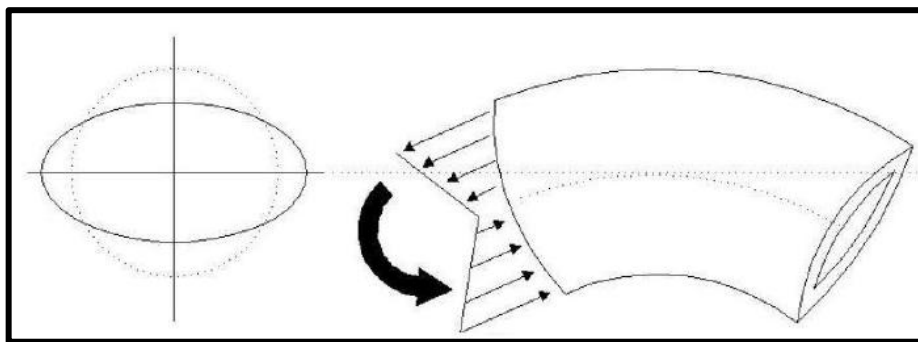


Figura 25: Efeito Brazier [18].

5.2 Ruptura por pressão interna

Este modo de falha também pode ser conhecido por ruptura estática. Consiste na ruptura de um segmento do duto quando este é submetido aos incrementos de pressão interna. A ruptura acontece quando o limite de tração do material é alcançado.

Para evitar que este tipo de falha ocorra, realiza-se o teste hidrostático. Neste teste o material é submetido à uma pressão maior do que a pressão de projeto.

5.3 Fadiga

Ocorre quando cargas ou deformações inferiores ao limite de escoamento podem resultar na fratura do material quando aplicadas ciclicamente ou com variação no tempo. A fadiga resulta de um esforço alternado que induz a formação de trincas e a propagação das mesmas.

5.4 Flambagem Local

O tipo de falha característico devido ao comportamento de flexão do duto é a flambagem localizada (*local buckling*) conforme representa a Figura 26, este tipo de flambagem ocorre devido à instabilidade da parede do duto. A flambagem localizada pode ser identificada como o excesso de ovalização em relação ao valor aceitável, o qual pode ser calculado. A flambagem localizada avaliada neste projeto refere-se somente à fase de instalação da linha, portanto não será considerada à fase de operação.

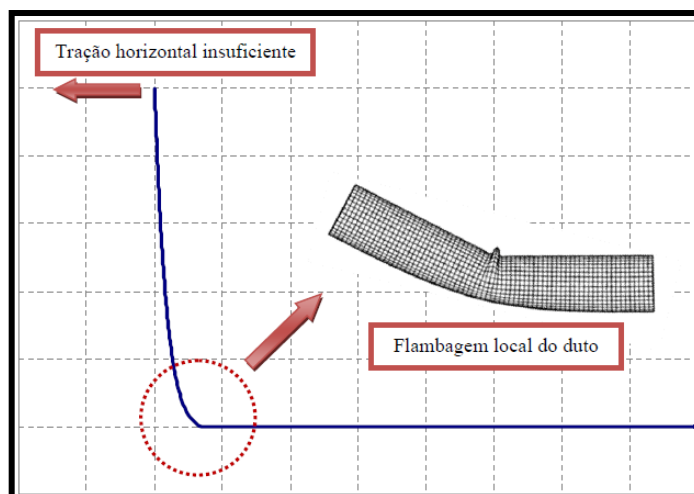


Figura 26: Flambagem Local [20].

A falha por flambagem local é caracterizada pela alteração da geometria na seção transversal e esta é necessariamente influenciada pela razão diâmetro espessura (D/t).

A relação de diâmetro espessura (D/t) é classificada como alta, na Figura 27, média, na Figura 28 ou baixa, conforme ilustra a Figura 29, e é apresentada de forma qualitativa para cada tipo de modo de falha dessa natureza.

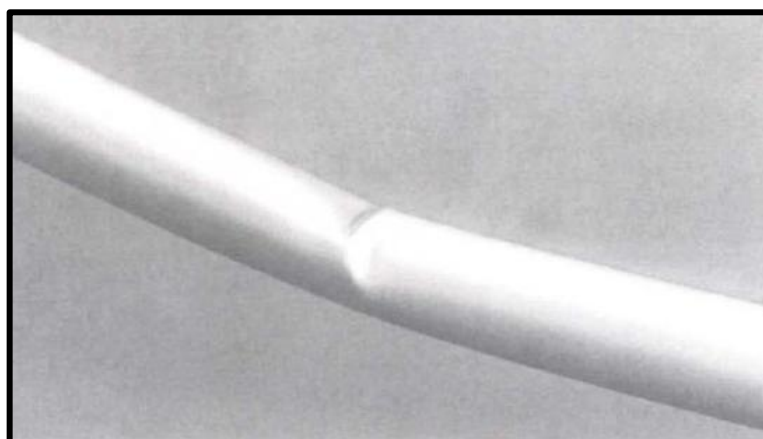


Figura 27: Razão alta D/t [3].

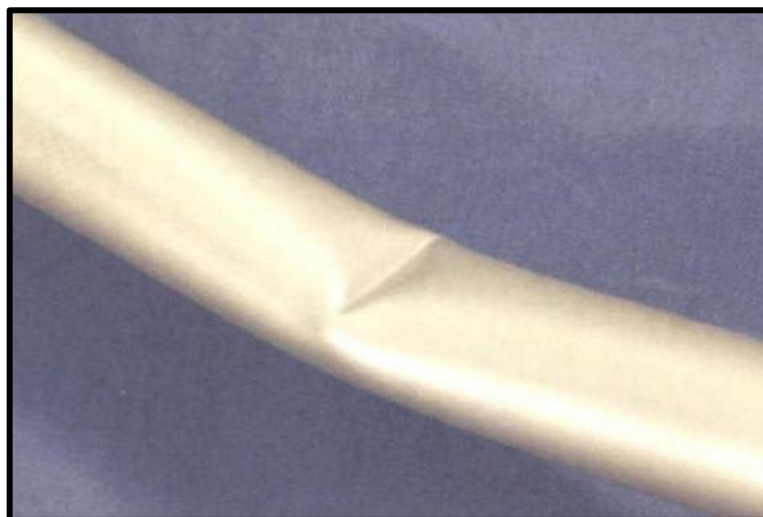


Figura 28: Razão moderada D/t [3].

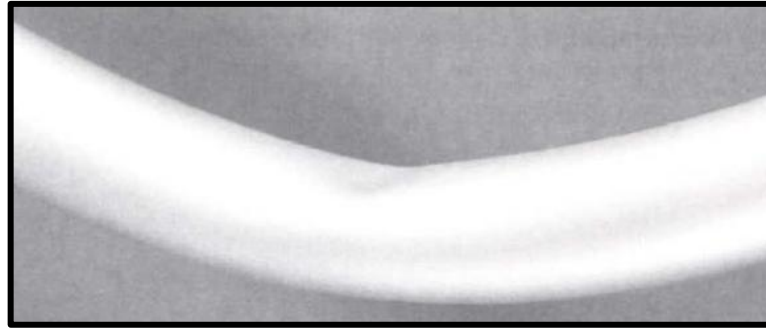


Figura 29: Razão baixa D/t [3].

A geometria da seção transversal pós-flambagem pode ser agrupada em dois tipos, modo diamante (*diamond*) e modo barril (*bulging*). As falhas pelo modo diamante são provenientes da alta relação D/t para cargas compressivas axiais.

O modo diamante típico é representado pela Figura 30 e consiste na presença de depressões na superfície do duto analisado, as mesmas possuem o formato de losangos e o deslocamento da parte superior/inferior da parede tende a se aproximar do centróide da seção transversal.

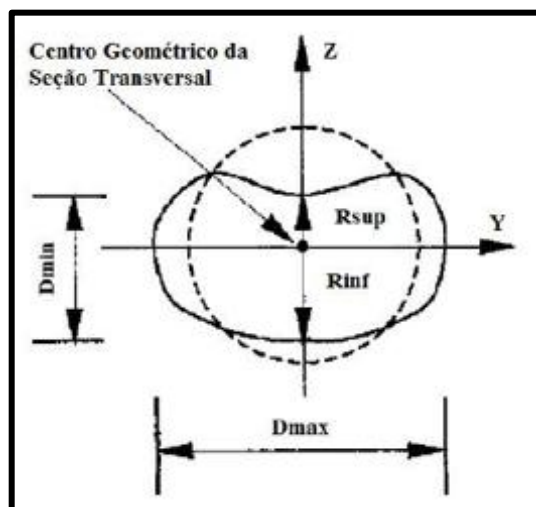


Figura 30: Modo de falha tipo diamante [18].

O modo barril é ilustrado pela Figura 31 e ocorre em sua superfície um deslocamento da parede do duto de modo a se afastar do centróide, o que justifica o formato barril movendo-se para fora.

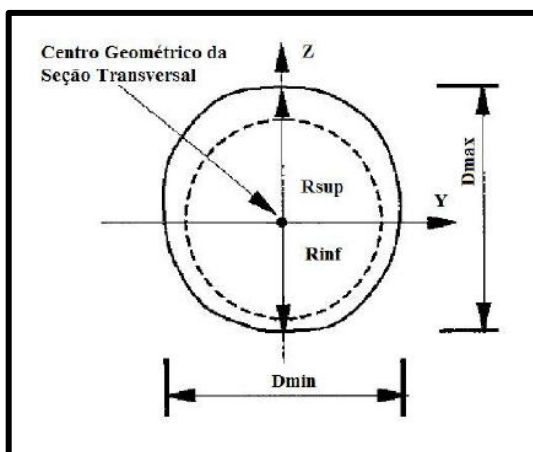


Figura 31: Modo de falha tipo barril [18].

5.4.1. Flambagem seca

A flambagem seca ocorre normalmente pela compressão da seção transversal do duto no *touchdown point* (TDP) ou na região do *stinger*, devido à perda de posição da embarcação ou por perda de capacidade trativa pelos tensionadores. Verificam-se as altas cargas nos roletes da rampa de lançamento (roletes da embarcação e do *stinger*) e a alteração na forma geométrica do duto, diferindo significativamente do lançamento normal.

A falha por flambagem seca ocorre quando a pressão externa é maior que a interna. Após o acontecimento desta, o duto é recolhido para embarcação para que o trecho seja cortado no local da falha.

5.4.2. Flambagem molhada

Na flambagem molhada ocorre uma fratura no duto abaixo da linha d'água e o duto é inundado. Para que o lançamento continue, é necessário colocar o duto no leito marinho, recolher o duto de volta para embarcação e remover a parte danificada.

Em águas ultraprofundas o alagamento da linha configura uma das piores adversidades para o lançamento, uma vez que desperta altos níveis de tração na linha rígida. Dependendo do diâmetro e espessura de parede, o alagamento pode representar um significativo aumento de peso, podendo chegar ao dobro do mesmo [20].

Normas como a DNV-OS-F101, preconizam como a questão do alagamento deve ser tratada. Conforme a norma, quando ocorre um alagamento acidental a embarcação deve ser

capaz de sustentar todo o peso gerado pela geometria do duto. Tais interpretações são contestáveis, quando se considera um lançamento não-convencional (dutos de grandes diâmetros em altas profundidades).

A integridade do duto, para o caso de alagamento, deve ser garantida através da verificação de colapso do sistema, da norma DNV-OS-F101, considerando uma situação ALS (*Accidental Limit State*) [20].

5.4.3 Bifurcação

É o fenômeno que ocorre nos tubos sob a forma de rugas, no qual precede a carga limite natural induzida pelo efeito Brazier sobre flexão. A medida em que o duto é submetido ao curvamento, podem surgir rugas na parte que sofre a compressão.

O termo bifurcação é usado para descrever o comportamento do duto ao atingir a pressão crítica de flambagem P_c . A partir deste ponto duas soluções são possíveis: uma seria a resposta trivial e a outra seria o colapso do duto a uma determinada pressão P_{CO} . A Figura 32 mostra a pressão crítica de flambagem e a pressão de colapso para um duto perfeito e imperfeito em função do deslocamento [3].

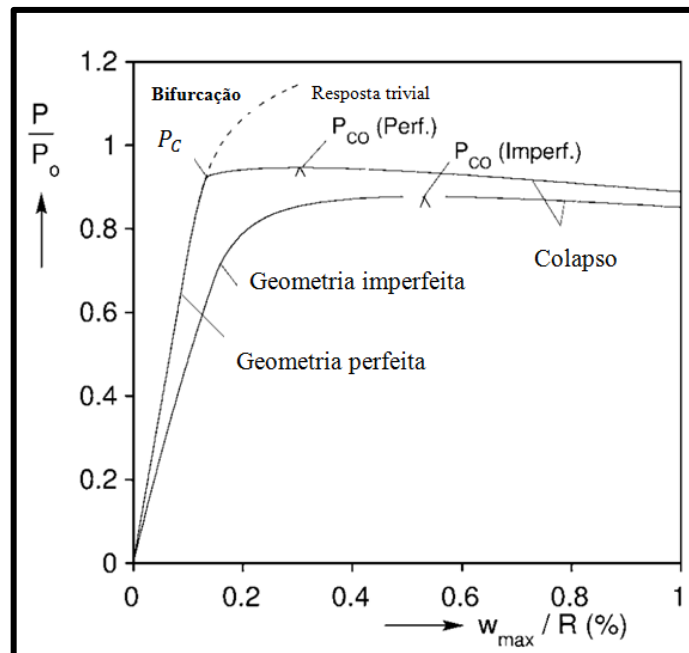


Figura 32: Deslocamento radial de um duto submetido à pressão externa não linear [3]

Onde,

P = Pressão crítica;

P_0 = Pressão inicial;

w_{max} = Deslocamento radial máximo;

R = Raio externo.

5.5 Colapso

O colapso do duto pode acontecer de duas formas: pela carga limite (linear) ou pela bifurcação (não linear), como ilustra a Figura 33. A ruptura do material ocorre quando a estrutura atinge a carga limite de resistência do material. Já o colapso por bifurcação ocorre devido à instabilidade da estrutura ocasionada pela formação de rugas na qual reduzem a rigidez da seção transversal.

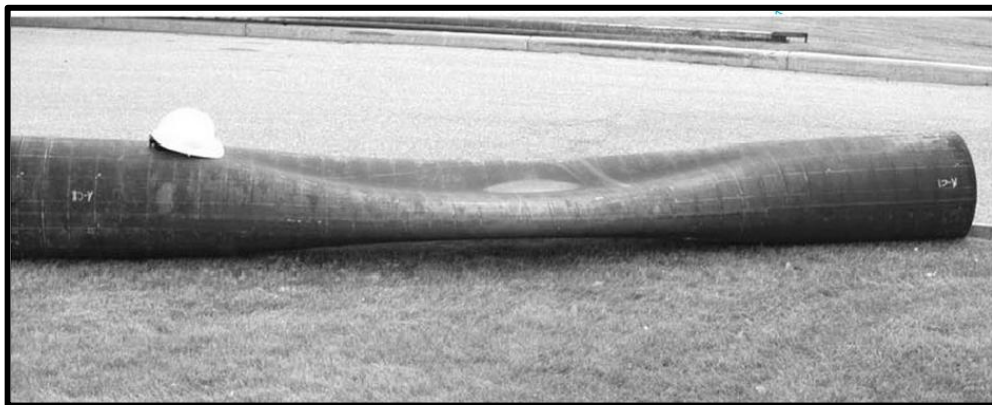


Figura 33: Colapso no duto [3].

Segundo Souza (1994), existem duas possibilidades de um duto submarino entrar em colapso devido a flexão, descritas a seguir:

- Colapso por Carga Limite

Inicialmente, o momento aplicado ao longo do comprimento do duto gera pequenas variações de curvatura caracterizando uma fase linear elástica. Com o aumento do momento, as imperfeições geométricas e a plastificação do material produzem um comportamento não linear e quando o momento máximo é alcançado ocorre uma grande variação da curvatura até que o duto colapse por carga limite.

- Colapso por Bifurcação

Existem situações que o colapso ocorre sem que o momento máximo tenha sido alcançado. Este comportamento deve-se às pequenas ondulações que surgem no lado comprimido do duto ao sofrer a flexão. O modo de colapso recebe esta denominação, pois a curva de carregamento do momento por curvatura sofre uma brusca mudança de comportamento provocado por cargas secundárias (devido às ondulações) de modo que a trajetória da curva de colapso por carga limite é desviada para uma trajetória secundária através de um ponto, chamado ponto de bifurcação, conforme a Figura 34.

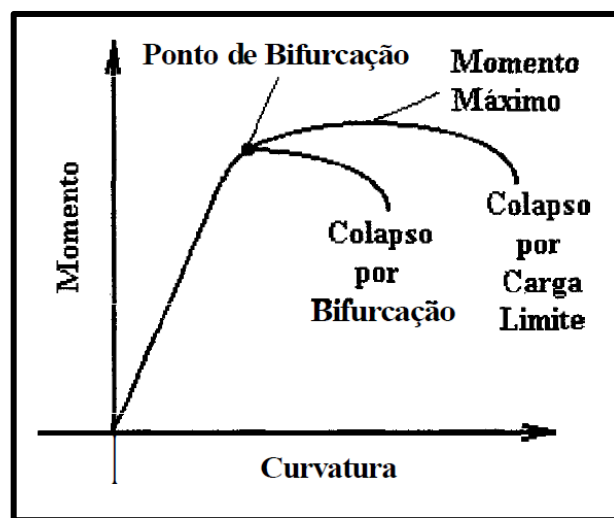


Figura 34: Ponto de Bifurcação. [19]

Capítulo 6

6. Estudo de caso: A análise do método *S-Lay* para águas ultraprofundas

A análise realizada neste projeto utiliza o método *S-Lay* em águas ultraprofundas, diferenciando-se do método tradicional pelo fato de ser adotada em águas com profundidades superiores a 2000 m. Sendo assim justificado pela exigência de embarcações especiais.

A embarcação *Allseas Solitaire* se adequa às condições da atividade envolvida, contendo adaptações no lançamento como a utilização do *stinger* em angulações superiores às utilizadas no método tradicional, tornando a posição da rampa de lançamento quase vertical. Além de permitir grandes solicitações durante a instalação do duto por possuir três tensionadores de grande capacidade.

O duto selecionado para a análise foi o DNV LSAW 450 com 20” de diâmetro externo e 1,2” de espessura. Conforme sua especificação, este é um duto com costura soldado longitudinalmente por arco submerso e possui tensão de escoamento (SMYS) de 450 MPa.

6.1 Análise da Catenária

No lançamento pelo método *S-lay* em águas ultraprofundas, a forma em “S” do duto no decorrer da instalação, é caracterizada pelas curvaturas das regiões de *overbend* e *sagbend*.

A configuração da curvatura na catenária é caracterizada pelo formato do *stinger* que permite suavizar as solicitações envolvidas, reduzindo assim a tração exercida pelos tensionadores, conforme ilustra a Figura 3.

6.1.1 Formulação do comprimento da catenária

A equação geral da catenária foi desenvolvida para encontrar o comportamento da curva de um cabo em suspensão com massa uniforme proposta por Jacques Bernoulli (1691).

$$a \frac{d^2z}{dx^2} = \left[1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.1)$$

Onde:

a = Constante;

x = Projeção na horizontal da catenária;

z = Projeção na vertical da catenária.

Tendo em vista o comportamento da catenária, na qual é calculado o comprimento (L_c) segundo a equação (6.2) de Bridge (2005).

$$L_c(z) = (z) \frac{\tan(\theta_{SS})}{\left[\sqrt{(\tan(\theta_{SS})^2) + 1} - 1 \right]} \quad (6.2)$$

Onde,

z = Profundidade em m;

θ_{SS} = Ângulo de inclinação do *stinger* com a horizontal.

6.1.2 Parâmetros envolvidos

A Figura 35 mostra a análise da catenária considerando: profundidade máxima (z_{max}) conhecida, angulação ($\theta_{SS} = 80^\circ$) e comprimento submerso do *stinger* ($L_s = 97m$) como parâmetros iniciais.

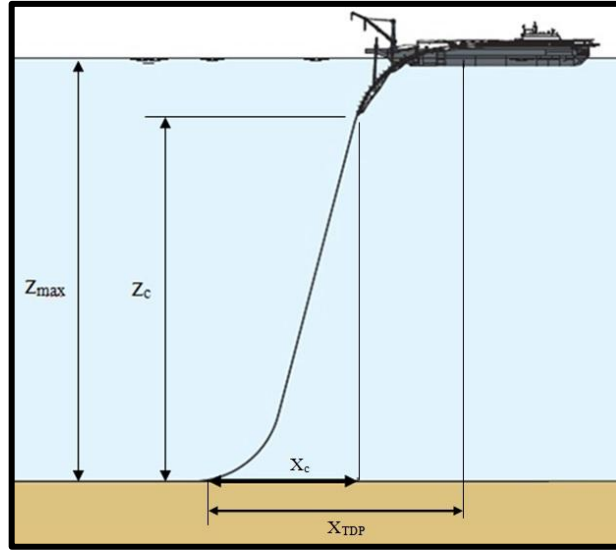


Figura 35: Representação dos parâmetros (modificada) [22].

A partir da análise do comportamento da catenária (L_c), obtém-se a distância na direção x representada por (x_c), de acordo com a equação (6.3), que indica a distância do TDP ao *stinger*. de Bridge (2005).

$$x_c = z_c \frac{\ln[\tan(\theta_{SS}) + \sqrt{(\tan(\theta_{SS}))^2 + 1}]}{\sqrt{(\tan(\theta_{SS}))^2 + 1} - 1} \quad (6.3)$$

Adotando: $z_c = z_{max} - L_s$

Sendo, L_s o comprimento do *stinger*.

Através da equação (6.4), calcula-se a distância do TDP à embarcação:

$$x_{TDP} = x_c + L_s \cos(\theta_{SS}) \quad (6.4)$$

A distância x_{TDP} deverá ser respeitada, pois limita a curvatura nas regiões de *sagbend* e *overbend* evitando maiores solicitações que podem ocasionar falhas no lançamento do duto.

Segundo Amarante (2010), a abordagem para determinar a forma exata da catenária consiste em estabelecer as condições de equilíbrio estático da linha a partir de alguns parâmetros físicos e geométricos, cujo desenvolvimento será abordado no decorrer do projeto.

6.2. Cálculo das solicitações no duto

Para a análise do equilíbrio estático da linha, é necessário:

- Desconsiderar o movimento da embarcação durante a fase de instalação;
- Desconsiderar os efeitos dinâmicos de correnteza e ondas (para maiores e menores profundidades respectivamente);
- Considerar o solo *flat* (plano).

Para análise serão considerados os dados de entrada apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dados de projeto

Parâmetro	Valor
Especificação do aço do duto	DNV LSAW 450
Massa específica do aço ($d_{aço}$)	7850 kg/m ³
Diâmetro externo (D_e)	20" (508 mm)
Espessura (t)	1,2" (30,48 mm)
Diâmetro interno (D_i)	17,60" (447,04 mm)
SMYS	450 MPa
SMTS	535 MPa
Módulo de Young (E)	2,07 . 10¹¹ Pa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Ovalização máxima permitida (f_0)	3,0 %
Densidade específica da água do mar (γ)	1025 kg/m ³
Coefficiente de atrito estático solo-aço (μ_S)	0,7
Coefficiente de atrito estático borracha-aço (μ_T)	0,9
Pressão atmosférica (P_{atm})	1,0 . 10⁵ Pa
Gravidade (g)	9,81 m/s ²
Angulação do stinger (θ_{SS})	80°
Comprimento submerso do stinger (L_s)	97 m
Profundidade máxima (Z_{max})	2000 m
Comprimento da catenária na direção X (x_c)	974 m
Distância do TDP à embarcação (x_{TDP})	991 m
Comprimento da catenária (L_c) para profundidade máxima	2384 m

Área da seção transversal (A_s):

$$A_s = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \quad (6.5)$$

$$A_s = 0,045 \text{ m}^2$$

Área da água deslocada (A_a):

$$A_a = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (6.6)$$

$$A_a = 0,203 \text{ m}^2$$

Força de tração máxima exercida pelos tensionadores (T_{max}):

A embarcação selecionada *Allseas Solitaire* possui 3 tensionadores com capacidade de 350 t cada, totalizando uma carga (C_T) de 1050 t. Portanto na equação (6.7), temos:

$$T_{max} = C_T \cdot g \quad (6.7)$$

$$T_{max} = 1,03 \cdot 10^7 \text{ N}$$

Empuxo (E) e tração efetiva (T_{ef}):

Segundo o princípio de Arquimedes [29], um corpo imerso num meio fluido é submetido a uma força de empuxo igual, em magnitude, ao peso do volume do fluido deslocado.

Para aplicação desse princípio é necessário que o trecho infinitesimal de comprimento (δL) de duto esteja totalmente submerso e que a pressão externa ($p_{externa}$) atue em toda a sua superfície. Além disso, a fim de equilibrar o campo de pressão atuante é necessário considerar que as extremidades possuem fechamentos imaginários, como mostra a Figura 36[23].

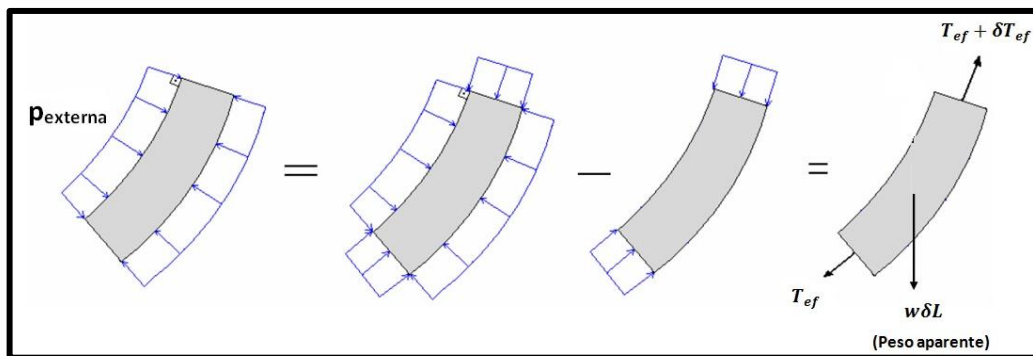


Figura 36: Tração efetiva e peso aparente (modificada) [17].

Durante a fase de instalação o empuxo varia de acordo com a massa submersa do duto que esta sendo lançado. Conforme ocorre o lançamento maior é o peso submerso e por consequência maior é o peso deslocado de fluido.

Peso submerso por unidade de comprimento ($w(z)$):

$$w(z) = (A_s \cdot d_{aço} - A_a \cdot \rho_{ext}) \cdot g \cdot (z) \quad (6.8)$$

Peso aparente da catenária ($P_{ad}(z)$):

$$P_{ad}(z) = w(z) \cdot L_c(z) \quad (6.9)$$

$$P_{ad}(z_{max}) = 3,41 \cdot 10^6 N$$

Cálculo da tração efetiva (T_{ef}):

De acordo com Pesce (1997), “é a tração efetiva, e não a tração solicitante que determina, do ponto de vista estrutural, a configuração de equilíbrio estático e rege a rigidez geométrica da linha a deslocamentos transversais, esta última a principal condicionante de sua resposta dinâmica”, ou seja, a tração efetiva é determinante para o cálculo da tensão longitudinal. Logo, para os cálculos de equilíbrio estático do sistema é preponderante a utilização da tração solicitante.

A equação (6.10) da tração efetiva é definida por Galgoul (2009). Então:

$$T_{ef} = N_r + p_e \cdot A_e - p_i \cdot A_i \quad (6.10)$$

Onde:

T_{ef} = Tração Efetiva;

N_r = Tração real atuante na face inferior do duto;

p_e = Pressão externa;

A_e = Área externa;

p_i = Pressão interna;

A_i = Área interna.

Assim, tem-se:

O valor da tração efetiva no tensinador ($z = 0$).

$$T_{ef}(0) = 4,95 \cdot 10^6 N$$

6.2.1 Equilíbrio Estático

O modelo adotado, ilustrado na Figura 37, consiste no equilíbrio de forças atuantes na instalação do duto a fim de manter a geometria e a integridade estrutural do mesmo, evitando a ocorrência de falhas.

Fatores como a densidade do material utilizada na fabricação do duto, coeficiente de atrito estático do duto com o solo marinho, inclinação do *stinger*, tração no tensionador e coluna d'água interferem na análise do equilíbrio e comportamento da catenária.

No estudo de caso apresentado neste projeto, a análise será realizada considerando o lançamento de duto seco com 100 m de duto já lançado, ou seja, em contato com o solo marinho. Os cálculos foram realizados utilizando o *software Mathcad 14.0* e são explicitados no anexo A (Equilíbrio Estático).

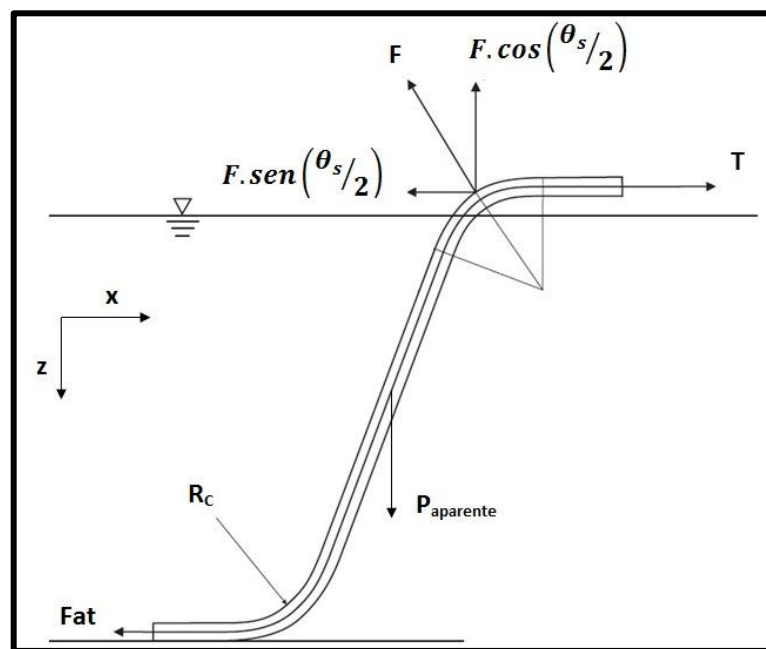


Figura 37: Solicitações atuantes no equilíbrio estático (modificado).[25]

Considerando a força F no ponto de reação do *stinger*, conforme representa a Figura 38.

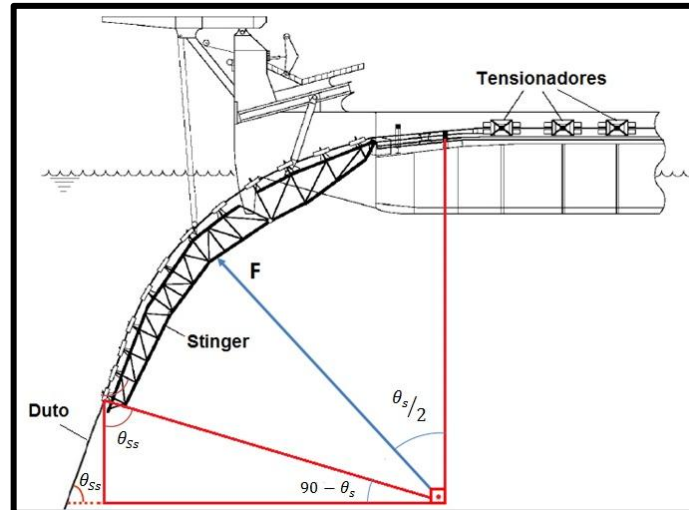


Figura 38: Força de reação do *stinger* (modificado) [3].

$$\sum F_z = 0$$

$$F(z, \theta) = \frac{P_{apC}}{\cos(\theta)} \quad (6.11)$$

$$\sum F_x = 0$$

Para o somatório, foi considerado um trecho de 100 m de duto em contato com o solo marinho (L_{ds}), Portanto tem-se:

Força normal do duto assentado:

$$Fat(x) = N(x) \cdot \mu_s \quad (6.12)$$

$$Fat(L_{ds}) = 1,002 \cdot 10^5 N$$

Peso aparente do duto na catenária:

$$P_{apC}(z) = (A_s \cdot d_{aço} - A_a \cdot \rho_{ext}) \cdot L_c(z) \cdot g \quad (6.13)$$

Tração exercida pelo Tensionador ($T = 0$):

$$T(z) = Fat(L_{ds}) + \tan(\theta_s) \cdot (P_{apC}(z_{max} - z)) \quad (6.14)$$

$$T(0) = 2,962 \cdot 10^6 N$$

6.2.2 Análise de Gráficos para Tração Efetiva e Tração no Tensionador.

A análise do gráfico apresentado na Figura 39 representa o comportamento das forças com relação a profundidade (z).

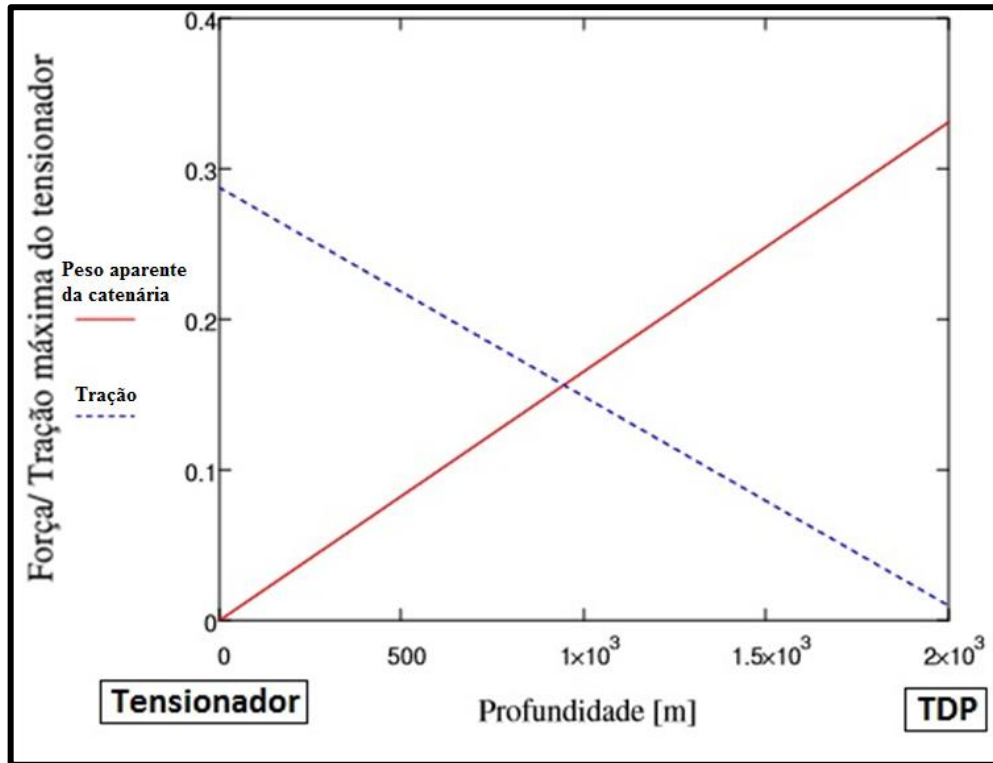


Figura 39: Força X Profundidade.

Através desta análise, é possível observar que a tração no tensionador equivale aproximadamente a 30% da capacidade máxima disponível no próprio e possui comportamento linearmente decrescente até atingir o seu valor mínimo (Fat) no TDP.

Por outro lado, o comportamento do peso aparente da catenária é linearmente crescente do tensionador ao TDP.

A análise do gráfico apresentado na do Figura 40, representa o comportamento das forças com relação a profundidade (z), partindo do início da catenária ao TDP.

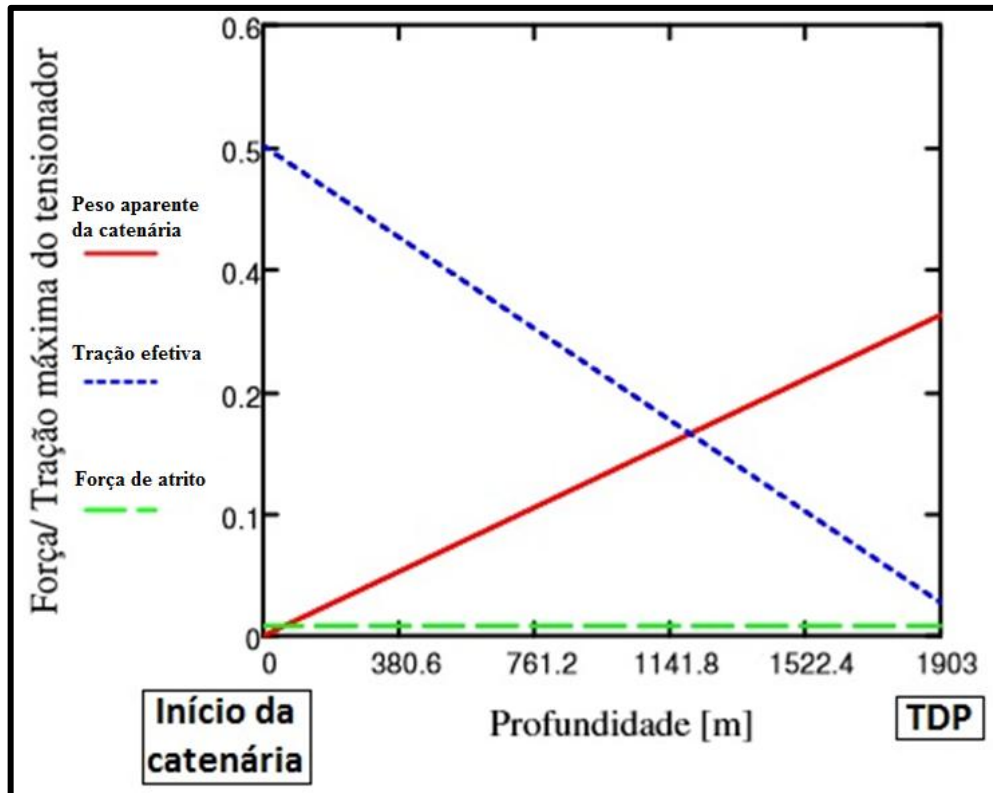


Figura 40: Força X Profundidade da catenária.

A tração efetiva utilizada para os cálculos estruturais é máxima no início da catenária, onde equivale a 50% da capacidade dos tensionadores, pois é influenciada pela pressão externa ao longo de toda a catenária.

A força de atrito é constante devido à condição de análise inicial para o trecho de 100 m já lançados.

6.2.3 Momento Fletor devido à curvatura

Segundo Jensen (2010) o momentor fletor devido à curvatura é calculado de acordo com a equação (6.15).

$$M = \frac{1}{R_C} \cdot E \cdot I \quad (6.15)$$

Onde:

M= Momento fletor devido à curvatura

R_C = Raio de curvatura calculado de acordo com a equação (6.16)

$$R_C = \frac{\text{Tração exercida pelo tensionador}}{\text{Peso submerso por unidade de comprimento}} \quad (6.16)$$

O gráfico apresentado na Figura 41 mostra o comportamento do momento em função do raio de curvatura. Pode-se concluir que o comportamento do raio de curvatura varia exponencialmente em relação ao momento fletor. A partir de aproximadamente 500 m de raio de curvatura, o momento fletor tenderá ao infinito.

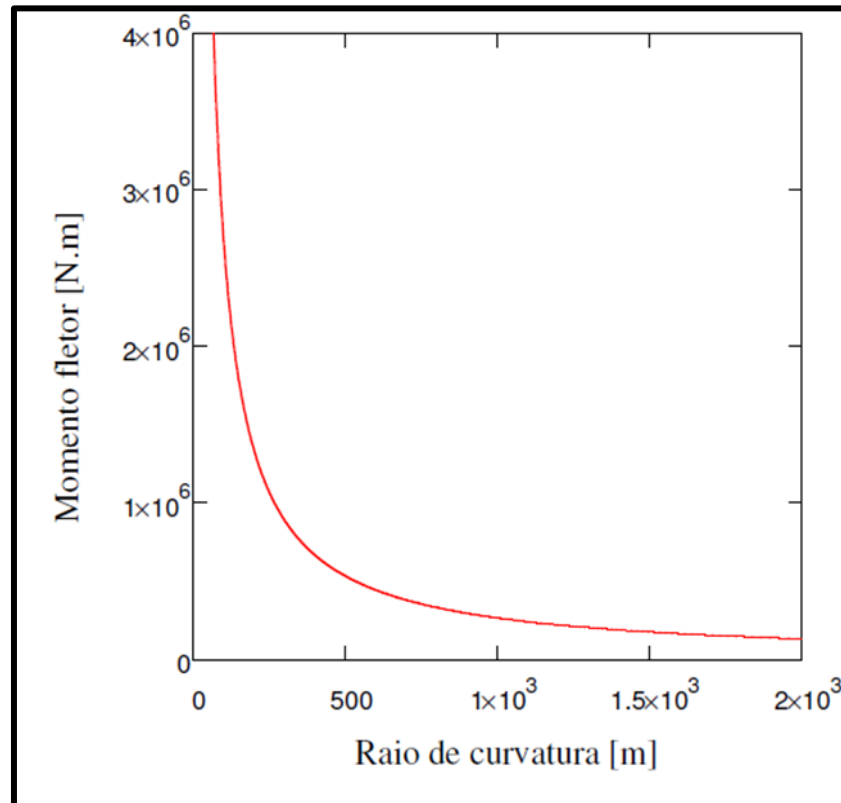


Figura 41: Momento fletor X raio de curvatura

No modelo proposto o raio de curvatura é controlado pela tração exercida pelo tensionador. De acordo com a equação (6.16) quanto maior a tração, maior o raio de curvatura suavizando as tensões no *sagbend*.

6.3.Cálculo dos deslocamentos radiais

Para calcular a ovalização da seção transversal é necessário obter os deslocamentos radiais na seção transversal do duto. Foram calculados os deslocamentos radiais nas seções transversais localizadas no tensionador e no TDP. Com base na norma utilizada foi feita uma verificação para constatar se as ovalizações encontradas estavam dentro do limite permitido.

6.3.1. Teorema de Castigliano

Para o cálculo dos deslocamentos radiais nos pontos críticos das seções transversais do duto localizadas no TDP e no tensionador, analisou-se a configuração representada na Figura 42, para $0 \leq \theta \leq \pi/2$.

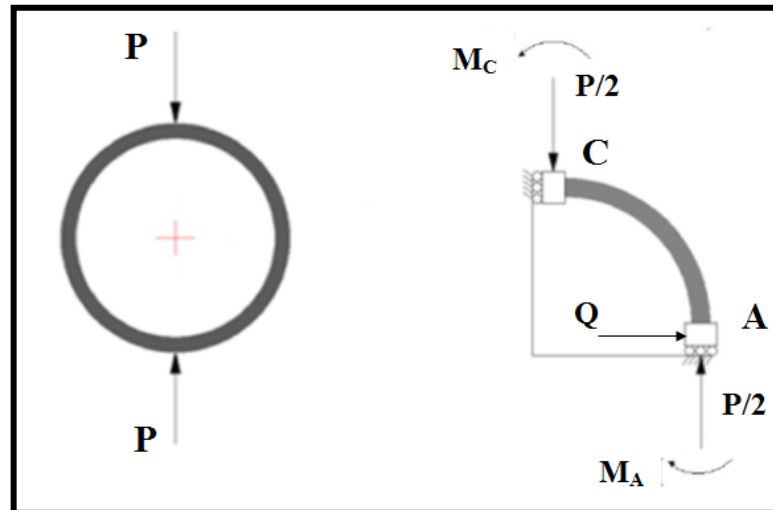


Figura 42: Força pontual (P) e diagrama de equilíbrio da seção transversal.

Através do diagrama de equilíbrio e do Teorema de Castigliano [26], equação (6.17), encontra-se o momento para o ponto A (M_A), ponto C (M_C) e a normal (N) para qualquer ângulo de 0 a $\pi/2$ de acordo com as equações (6.22), (6.24) e (6.19).

$$U = \int_0^{\pi/2} \frac{N^2 R}{2AE} d\theta + \int_0^{\pi/2} \frac{M^2 R}{2EI} d\theta \quad (6.17)$$

Onde:

U = Trabalho de deformação da estrutura;

N = Força Normal;

R = Raio externo do duto;

A = Área da seção transversal;

E = Módulo de Young;

I = Momento de Inércia;

M = Momento fletor.

- Cálculo do momento para o ponto A (M_A):

Após a análise do diagrama de equilíbrio, temos as equações (6.18) e (6.19), onde Q é o carregamento horizontal fictício no ponto A [26].

$$M = -M_A + [R(1 - \cos\theta)] \frac{P}{2} + (R \cdot \sin\theta) \cdot Q \quad (6.18)$$

$$N = -\frac{P}{2} \cos\theta + Q \cdot \sin\theta \quad (6.19)$$

Para calcular o momento em A, adota-se o deslocamento angular desse ponto igual a zero conforme a equação (6.20).

$$\frac{\partial U}{\partial M_A} = \theta_A = 0 \quad (6.20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial M_A} = \frac{1}{AE} \int_0^{\pi/2} N \frac{\partial N}{\partial M_A} R d\theta + \frac{1}{EI} \int_0^{\pi/2} M \frac{\partial M}{\partial M_A} R d\theta = 0 \quad (6.21)$$

Logo,

$$M_A = \frac{PR}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right) \quad (6.22)$$

Substituindo a equação (6.22) na (6.18), temos a equação do momento fletor para $0 \leq \theta \leq \pi/2$:

$$M = PR \left(\frac{1}{\pi} - \frac{\cos\theta}{2} \right) + (R \cdot \sin\theta) \cdot Q \quad (6.23)$$

- Cálculo do momento para o ponto C (M_C):

Para $\theta = \pi/2$ na equação (6.23), tem-se o momento para o ponto C:

$$M_C = \frac{PR}{\pi} \quad (6.24)$$

- Deslocamento radial horizontal no ponto A (δ_h):

Através da derivada parcial do trabalho de deformação em relação ao carregamento horizontal fictício na equação (6.23), tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = \delta_h \quad (6.25)$$

$$\delta_h = \frac{PR}{E} \left(\frac{R^2}{I} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) - \frac{1}{4A} \right) \quad (6.26)$$

- Deslocamento radial vertical no ponto C (δ_v):

Através da derivada parcial do trabalho de deformação em relação à carga aplicada no ponto C na equação (6.27), tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial P/2} = \delta_v \quad (6.27)$$

$$\delta_v = \frac{PR}{E} \left(\frac{\pi}{8A} + \frac{R^2}{I} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) \right) \quad (6.28)$$

6.3.2. Método da Superposição

O método da superposição pode ser utilizado caso a configuração de carregamento ocorra de acordo com a Figura 43, pois permite a soma das forças normais, momentos e deslocamentos que ocorrem na seção transversal.

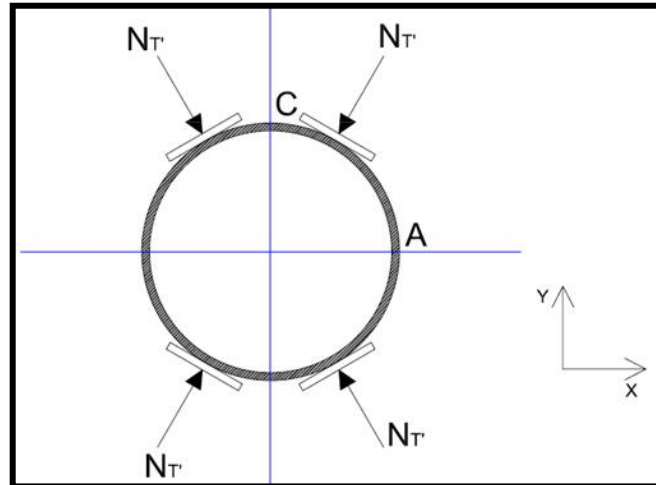


Figura 43: Disposição das sapatas na seção transversal.

A fim de modelar a posição das sapatas do tensionador, os sistemas de coordenadas X-Y foram deslocados em 15° positivos para os quadrantes pares e 15° negativos para os quadrantes ímpares em relação ao eixo principal na cor azul, como representado na Figura 44.

Considerando a simetria entre os quadrantes e as cargas, dividiu-se a configuração da Figura 43 em duas parcelas. A primeira representa o comportamento das forças atuantes nos quadrantes pares e a segunda nos quadrantes ímpares.

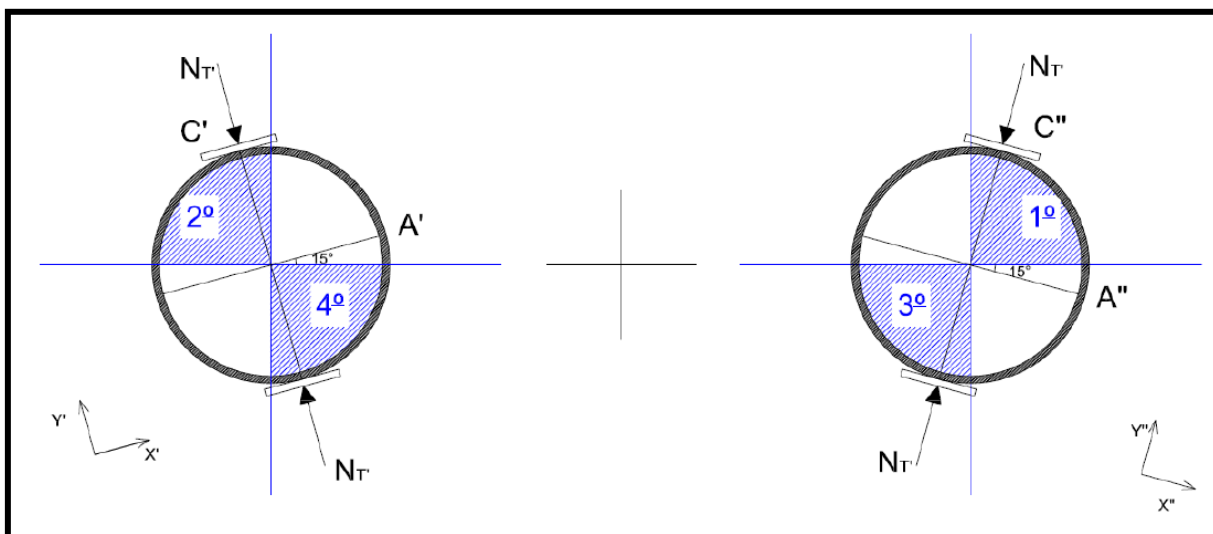


Figura 44: Método da superposição.

6.3.3 Análise de tensões pelo critério de von Mises

Nesta análise é importante verificar se a estrutura irá resistir aos carregamentos sem que as tensões ultrapassem a tensão de escoamento (SMYS). Os locais onde serão realizadas as análises serão as seções transversais do duto no TDP e no tensionador.

A análise detalhada foi realizada e apresentada em planilha no *Mathcad* 14.0, nos Anexos B e C, utilizando a tensão de von Mises [26].

Para calcular a tensão circunferencial e a equivalente na região do *sagbend*, no TDP, utilizou-se o momento fletor para o ponto C por este ser maior que no ponto A, visto que a força atua diretamente no ponto C, conforme demonstra a Figura 42.

Para o tensionador utilizou-se o método da superposição para obter os valores máximos da normal e do momento que ocorrem nos quadrantes pares e ímpares conforme os gráficos X e Y. A partir destes valores calculou-se a tensão equivalente para o ponto C pois este é o mais crítico.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 45, a força normal atuante no ponto A é maior que no ponto C. Através da variação de θ , a força tem comportamento variável do ponto A ($\theta = 0^\circ$) até o ponto C ($\theta = 90^\circ$).

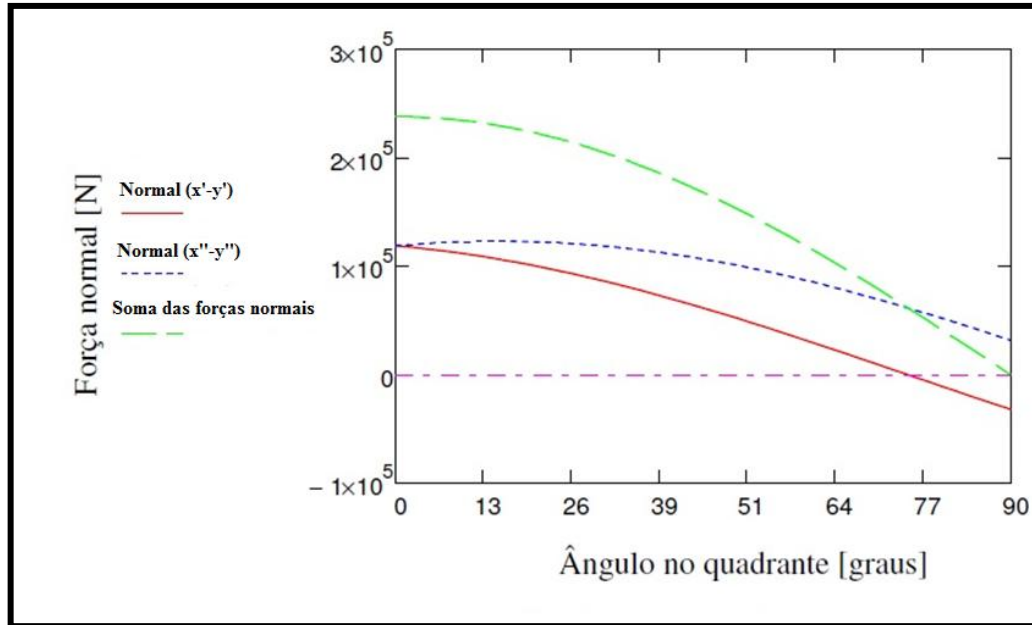


Figura 45: Força Normal com relação ao ângulo.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 46, a atuação do momento fletor no ponto C é maior que no ponto A, visto que a solicitação atuante está localizada no próprio ponto.

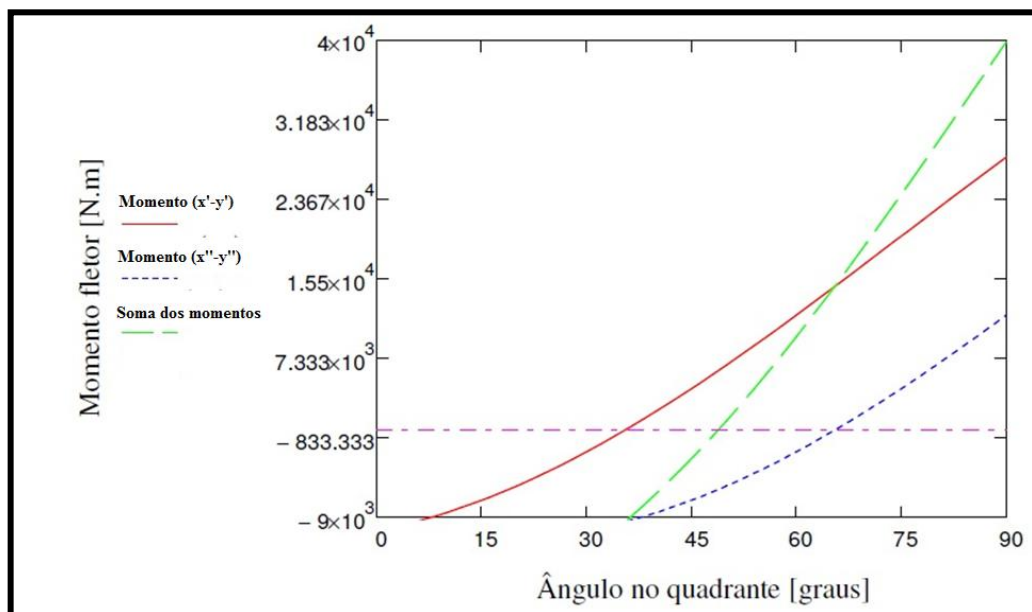


Figura 46: Momento fletor em relação ao ângulo

O cálculo da tensão circunferencial é realizado pelos efeitos das forças normais e dos momentos fletores dos pontos A e C na seção transversal, representado no Gráfico 8. As equações (6.29) e (6.30) representam esta análise.

Para o ponto A, tem-se:

$$\sigma_{circunfA}(r) = \frac{M_A \cdot r}{I_S} + \frac{N_A}{A_S} \quad (6.29)$$

Para o ponto C, tem-se:

$$\sigma_{circunfC}(r) = \frac{M_C \cdot r}{I_S} + \frac{N_C}{A_S} \quad (6.30)$$

Onde:

M = Momento fletor referente ao ponto;

r = Raio;

N = Força Normal referente ao ponto;

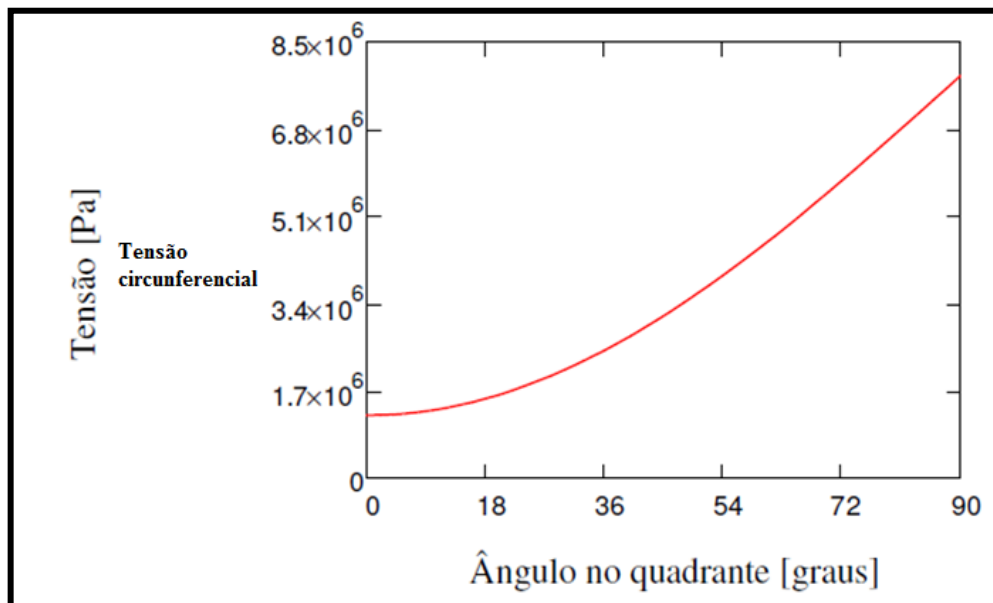


Figura 47: Tensão referente ao ângulo no quadrante.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 47 em conjunto com as considerações encontradas nos momentos e nas forças normais para os pontos nos gráficos apresentados nas Figura 45 e Figura 46, conclui-se que a tensão circunferencial é superior no ponto C.

A Tabela 4 e a Tabela 5 resumem os resultados da análise. A cor azul sinaliza que o duto não falhará (a tensão referente é menor do que a tensão de escoamento do material).

Tabela 4: Resultados da análise de tensões no Tensionador

TENSÃO DE VON MISES - TENSIONADOR							
Raio do tubo	Tensão circunferencial (MPa)	Tensão Radial (Mpa)	Tensão Longitudinal (MPa)	Tensão von Mises (MPa)	$ \sigma_{\text{circunt}} /\text{SMYS}$	$ \sigma_{\text{LONG}} /\text{SMYS}$	$\sigma_{\text{MISES}}/\text{SMYS}$
Interno	7,85	0,0	110	106,00	0,02	0,24	0,24
Médio	7,38	0,0	110	107,00	0,02	0,24	0,24
Externo	6,92	0,0	110	107,00	0,02	0,24	0,24

Tabela 5: Resultado da análise de tensões no TDP

TENSÃO DE VON MISES - TDP							
Raio do tubo	Tensão circunferencial (MPa)	Tensão Radial (Mpa)	Tensão Longitudinal (MPa)	Tensão von Mises (MPa)	$ \sigma_{\text{circunt}} /\text{SMYS}$	$ \sigma_{\text{LONG}} /\text{SMYS}$	$\sigma_{\text{MISES}}/\text{SMYS}$
Interno	54,20	0,0	27,60	47,00	0,12	0,06	0,10
Médio	51,00	0,0	27,60	44,20	0,11	0,06	0,10
Externo	47,80	0,0	27,60	41,60	0,11	0,06	0,09

6.3.2. Deslocamento radial e Ovalização na seção transversal localizada no TDP

Para calcular o deslocamento radial e a ovalização da seção transversal no TDP serão utilizados dois métodos: o Teorema de Castigliano, equações (6.26) e (6.28), e a equação de Timoshenko *et al.* (6.31) [27]. As análises são explicitadas no Anexo D.

$$\delta(\theta) = \frac{PR^3}{4EI} \left(\cos\theta + \theta \operatorname{sen}\theta - \frac{4}{\pi} \right) \quad (6.31)$$

Onde:

P = Carregamento pontual;

R = Raio externo;

E = Modulo de Young;

I = Momento de inércia.

O deslocamento em relação ao ângulo configura a representação do comportamento periódico, apresentado na Figura 48.

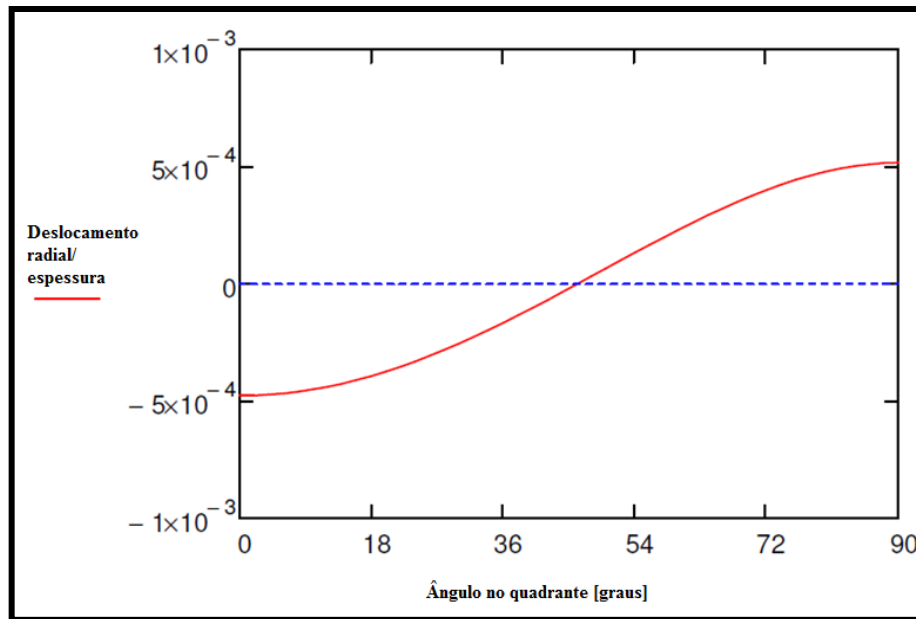


Figura 48: Comportamento do deslocamento em relação ao ângulo.

Para os valores obtidos no gráfico da Figura 48, os valores máximo e mínimo representam os deslocamentos dos pontos A e C, respectivamente.

Simplificou-se a situação de acordo com a Figura 49. Essa simplificação é possível por ser mais crítica do que a real distribuída na seção transversal (pressão externa), pois a carga é aplicada a um único ponto.

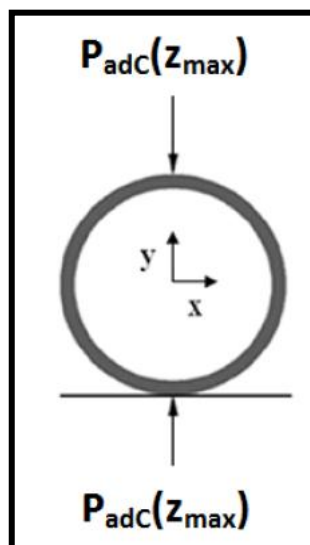


Figura 49: Simplificação das cargas no TDP.

Os valores encontrados para os deslocamentos utilizando as equações do método de Castigliano (6.26) e (6.28) foram: $\delta_{h_C} = 9,0 \mu m$ e $\delta_{v_C} = 0,5 \mu m$ e utilizando a equação (6.31) [24] foram: $\delta_{h_T} = 0,1 \mu m$ e $\delta_{v_T} = 0,2 \mu m$.

A Figura 50 e Figura 51, representam o comportamento linear da força em relação ao deslocamento radial.

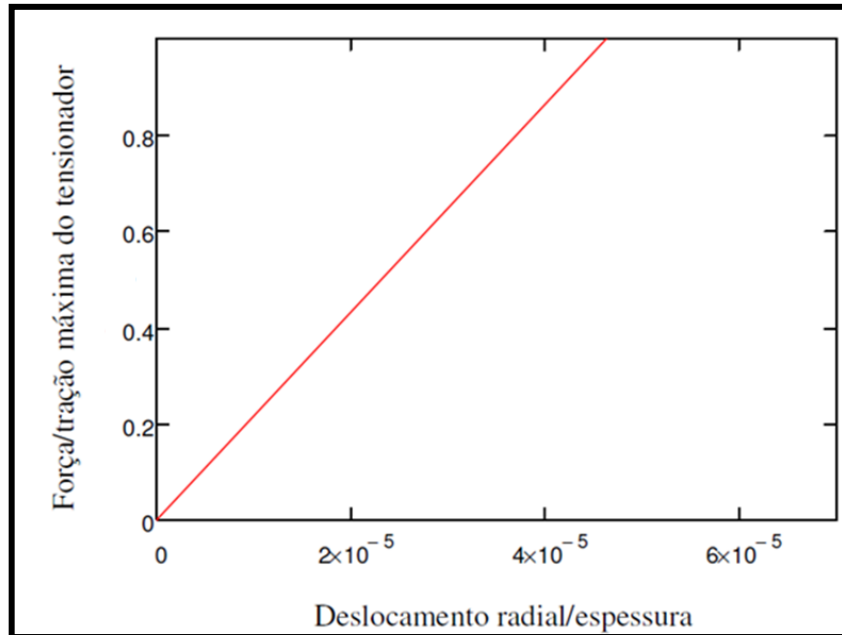


Figura 50: Força em relação ao deslocamento radial no ponto A.

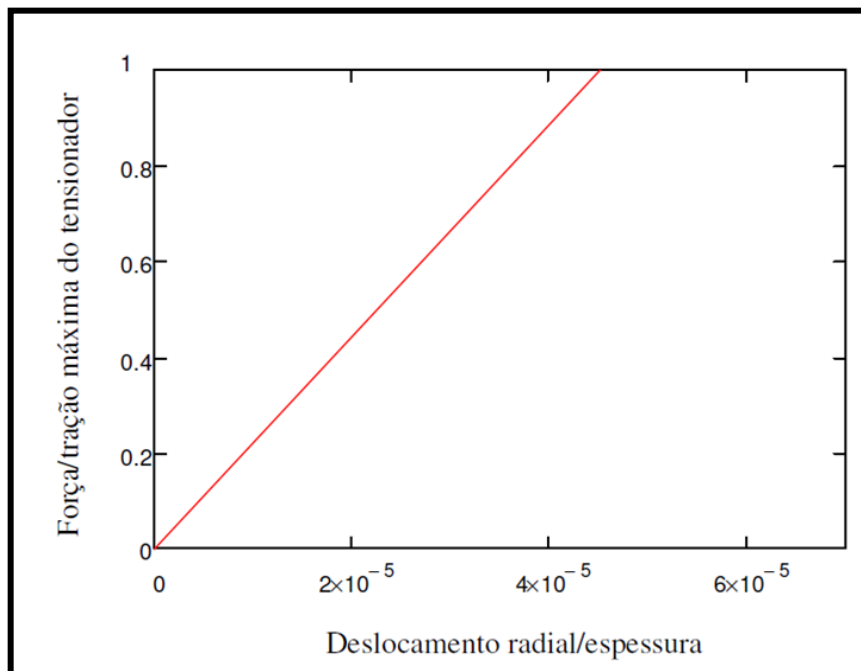


Figura 51: Força em relação ao deslocamento radial no ponto C.

Ao comparar os gráficos, conclui-se que o ponto C possui maior rigidez (K) devido a sua inclinação, sendo assim o deslocamento radial é maior utilizando uma menor sollicitação de força.

Para evitar a ocorrência do evento de flambagem local na estrutura, a ovalização não poderá exceder a 3 %, segundo a norma DNV-OS F101[28]. A Figura 52 mostra o diâmetro máximo e o diâmetro mínimo usado para calcular a ovalização através da equação (6.32).

$$f_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_0} \leq 0,03 \quad (6.32)$$

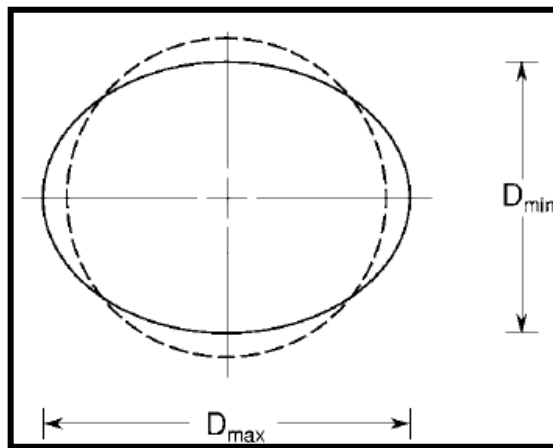


Figura 52: Ovalização - Diâmetro máximo e mínimo [3].

Diante dos valores encontrados anteriormente, conclui-se que o método adotado por Castigliano para os deslocamentos radiais resultam em uma ovalização ($f_{o_{Castigliano}} = 0,024\%$) maior do que a obtida pela equação (6.31) ($f_{o_{Timoshenko}} = 0,012\%$).

6.3.3. Deslocamento radial e Ovalização na seção transversal localizada no Tensionador

Os tensionadores da embarcação *AllSeas Solitaire*, Figura 18, possuem 4 sapatas cada (pontos de contato simétricos na seção transversal). A distribuição de forças que atuam na seção transversal do duto é representada na Figura 43 e na Figura 44. As análises encontram-se explicitadas no Anexo E.

Tendo em vista que a força normal (N_T) calculada no item anterior é a soma dos três tensionadores e como estes possuem 12 pontos de contato no total, o cálculo é realizado

dividindo-se a força (N_T) pelo número total de pontos. Portanto, o valor utilizado para cálculo foi $N_{T'} = 2,5 \cdot 10^5 N$.

Devido a angulação dos pontos de contato das sapatas com o duto, utilizou-se o conceito da superposição junto à equação (6.32) abordada por Timoshenko *et al.* (1961) para calcular os deslocamentos radiais.

Desta forma, calcula-se o deslocamento radial na horizontal (ponto A, δ_h) e na vertical (ponto C, δ_v) de acordo com as equações (6.33) e (6.34) cujo o comportamento é representado na Figura 53.

$$\delta_h = \delta_{A \rightarrow X'Y'}(0) + \delta_{A \rightarrow X''Y''}(0) \quad (6.33)$$

$$\delta_v = \delta_{C \rightarrow X'Y'}\left(\frac{\pi}{2}\right) + \delta_{C \rightarrow X''Y''}\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (6.34)$$

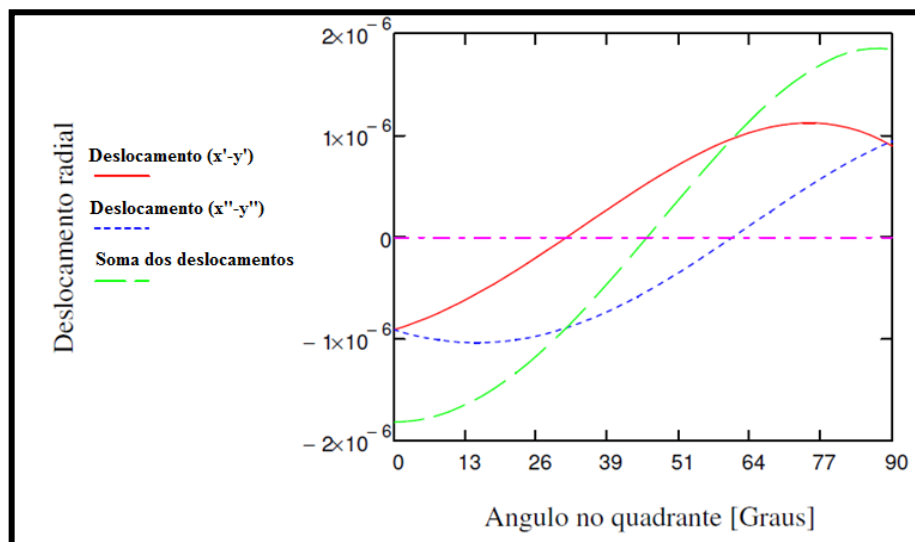


Figura 53: Deslocamento radial em relação ao ângulo.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 53, o deslocamento radial em relação ao ângulo é caracterizado pelo comportamento periódico com os valores mínimo e máximo em 0° e 90° referentes aos pontos A e C respectivamente.

A Tabela 6 resume os valores encontrados para os deslocamentos radiais e ovalização no tensionador e no TDP.

Tabela 6: Deslocamentos radiais e ovalização no tensionador e no TDP.

	δ_v [μm]	δ_h [μm]	f_o sem ovalização inicial [%]
Tensionador	2	2	$1,34 \cdot 10^{-5}$
TDP	9	0,5	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Os valores apresentados para ovalização da seção transversal tanto no tensionador quanto no TDP são menores que o máximo permitido pela norma, portanto os parâmetros estão de acordo com o referente projeto.

É importante ressaltar que, por ter desconsiderado os carregamentos ambientais e a movimentação da embarcação atuando no lançamento, os valores encontrados para a ovalização no TDP e no tensionador foram mais baixos do que o esperado.

Capítulo 7

7. Metodologia utilizada pela Norma DNV-OS-F101

A DNV (*Det Norske Veritas*) apresenta o código OS-F101, cujo objetivo é prover um padrão de aceitação internacional de segurança para dutos submarinos. Com o intuito de garantir a confiabilidade, são definidos requisitos mínimos para projeto como: tipos de fabricação e materiais, incluindo as fases de instalação, teste e operação, além de comissionamento, manutenção e operação de recuperação e abandono de linha.

A norma divide os modos de falha em dois tipos de Estado Limite: Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. Os modos de falha abordados neste projeto (flambagem local e colapso) são classificados como Estado Limite Último.

As seções seguintes visam apresentar e avaliar alguns dos critérios desta norma. Elaborou-se uma planilha de *Mathcad* para verificação de ocorrência da flambagem local e colapso, a qual é encontrada no Anexo F. Entretanto, serão desconsiderados os critérios que envolvem carregamentos ambientais, pressão interna e temperatura.

7.1 Flambagem Localizada

A flambagem localizada implica na deformação excessiva da seção transversal do duto. Os seguintes critérios devem ser seguidos:

- Colapso do sistema (apenas pressão externa);
- Propagação da flambagem (apenas pressão externa);
- Critério de carregamento combinado (interação entre pressão interna e externa, força axial e momento fletor).

7.1.1 Colapso do sistema

A pressão externa em qualquer ponto ao longo do duto deve atender aos seguintes critérios:

$$p_e - p_{\min} \leq \frac{p_c(t)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (7.1)$$

Esta falha ocorrerá no ponto mais fraco do duto.

Onde:

t = Espessura mínima;

p_e = Pressão externa;

p_{min} = Mínima pressão interna que pode ser sustentada. Normalmente igual a zero para os dutos que já estão acomodados no leito marinho;

p_c = Resistência característica ao colapso;

γ_m = Fator de resistência do material. Definido pela referência [16] seção 5 C203 Tabela 5-2;

γ_{SC} = Fator de resistência por classe de segurança. Definido pela referência [16] seção 5 C204 Tabela 5-3.

A resistência característica para a pressão externa (p_c) (colapso) deve ser calculada de acordo com a equação (7.2):

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) \cdot (p_c(t)^2 - p_p(t)^2) = p_c(t) \cdot p_{el}(t) p_p(t) \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t} \quad (7.2)$$

Onde:

D = Diâmetro nominal externo;

p_{el} = Pressão de colapso elástico. Calculada pela equação (7.3);

$$p_{el}(t) = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (7.3)$$

E = Módulo de elasticidade do material;

ν = Coeficiente de Poisson;

p_p = Pressão de colapso plástico. Calculada pela equação (7.4);

$$p_p(t) = f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{2t}{D} \quad (7.4)$$

α_{fab} = Fator de fabricação. Definido pela referência [16] seção 5 C307 Tabela 5-5;

f_y = Tensão de ruptura usada no projeto. Calculada pela equação (7.5);

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U \quad (7.5)$$

SMYS = Tensão de escoamento mínima especificada;

$f_{y,temp}$ = Variação da tensão de escoamento devido à temperatura. Para este projeto $f_{y,temp}$ é desconsiderado;

α_U = Fator de resistência do material. Definido pela referência [16] seção 5 C306 Tabela 5-4;

f_0 = Ovalização. Calculada pela equação (7.6).

$$f_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \leq 0.03, \text{ Se } f_0 < 0,005 \text{ não utilizar} \quad (7.6)$$

A ovalização causada durante a fase de instalação deve ser considerada enquanto as oriundas de flexão ou pressão externa não.

7.1.2 Propagação de Colapso

A propagação do colapso só pode ser iniciada após a ocorrência da flambagem local. No caso em que a pressão externa excede os critérios a seguir, supressores de colapso (*buckle arrestors*) devem ser instalados e espaçados baseados no custo e nas premissas do projeto. O critério de propagação do colapso é explicitado a seguir:

$$p_e < \frac{p_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (7.7)$$

$$p_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \left(\frac{t}{D} \right)^{2.5}, \quad \text{sendo } 15 < \frac{D}{t} < 45$$

Onde:

p_{pr} = Pressão de resistência ao colapso propagante.

7.2 Critério de Carregamento Combinado

Este critério subdivide-se em duas condições:

- A condição de carga controlada (LCC) que é aquela em que a resposta estrutural é governada pelas cargas impostas podendo ser usada sempre e em qualquer seção do duto. O carregamento combinado será governado pela capacidade máxima de variação do momento ao longo do duto;
- A condição de deslocamento controlado (DCC) é aquela em que a resposta estrutural é governada por deslocamentos geométricos, para uso desta, uma análise mais profunda deverá ser feita.

Neste projeto será utilizado o critério de carregamento controlado com ação de pressão externa, uma vez que as análises destinam-se a avaliar o duto na fase de instalação sem a presença de qualquer fluido no interior do mesmo.

7.2.1 Condição de carregamento controlado

As partes de duto que estiverem submetidas ao momento fletor, força axial efetiva e pressão externa devem satisfazer o seguinte critério para todas as seções transversais:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t)} \right)^2 \leq 1 \quad (7.7)$$

Aplicada para:

$$- 15 \leq D/t \leq 45$$

$$- P_i < P_e$$

$$- |S_{Sd}|/S_p < 0,4$$

Onde:

p_e = Pressão externa;

p_{min} = Pressão interna mínima que pode ser sustentada. Normalmente é igual a zero exceto em caso em que a instalação é feita com duto preenchido de água;

p_c = Pressão de colapso característica e deve ser baseada na espessura t ;

M_{Sd} = Momento fletor de projeto. Calculado pela equação (7.8).

$$M_{Sd} = M_F \gamma_F \gamma_c + M_E \gamma_E + M_I \gamma_F \gamma_c + M_A \gamma_A \gamma_c \quad (7.8)$$

Onde:

M_F = Momento devido ao carregamento funcional;

γ_F = Fator de efeito do carregamento para carregamento funcional. Definido pela referência [16] seção 4 G303 Tabela 4-4;

γ_c = Fator devido ao efeito de carregamento devido à condição. Definido pela referência [16] seção 4 G304 Tabela 4-5;

M_E = Momento devido às cargas ambientais;

γ_E = Fator devido às cargas ambientais. Definido pela referência [16] seção 4 G303 Tabela 4-4;

M_I = Momento devido à interferência;

M_A = Momento devido às cargas acidentais;

γ_A = Fator devido às cargas ambientais. Definido pela referência [16] seção 4 G303 Tabela 4-4;

S_{Sd} = Força axial efetiva de projeto. Calculado pela equação (7.9).

$$S_{Sd} = S_F \gamma_F \gamma_c + S_E \gamma_E + S_I \gamma_F \gamma_c + S_A \gamma_A \gamma_c \quad (7.9)$$

Onde:

S_F = Força axial funcional;

S_E = Força axial ambiental;

S_I = Força axial de interferência;

S_A = Força axial devido aos acidentes.

M_p (momento) e S_p (tensão axial) denotam a capacidade plástica para um duto:

$$M_p(t) = f_y \cdot (D - t)^2 \cdot t \quad (7.10)$$

$$S_p(t) = f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t \quad (7.11)$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y} \quad (7.12)$$

f_u = Tensão de escoamento usada no projeto. Calculada pela equação (7.13).

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \quad (7.13)$$

$SMTS$ = Tensão de ruptura mínima especificada;

$f_{u,temp}$ = Variação da tensão de ruptura devido à temperatura.

$$\alpha_p = 1 - \beta, \quad \text{para } \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3}$$

p_b = Pressão de rompimento;

$$\alpha_p = 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b}\right), \quad \text{para } \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3}$$

$$\beta = \frac{60 - D/t}{90}$$

α_c = Parâmetro de tensão causada pela vazão;

α_p = Efeito da taxa D/t .

7.3 Condição de deslocamento controlado

As partes de duto que estiverem submetidas à deformações longitudinais compressivas (momento fletor e força axial) e pressão externa devem ser projetados para atender o seguinte critério em todas as seções transversais:

$$\left(\frac{\varepsilon_{sd}}{\frac{\varepsilon_c(t,0)}{\gamma_\varepsilon}} \right)^{0,8} + \frac{p_e - p_{min}}{\gamma_m \gamma_{SC}} \leq 1 \quad (7.14)$$

Aplicada para:

$$D/t \leq 45$$

$$P_{min} \leq P_e$$

Onde:

ε_{sd} = Deformação de projeto associada a compressão na equação (7.15).

$$\varepsilon_c(t, p_{min} - p_e) = 0,78 \cdot \left(\frac{t}{D} - 0,01\right) \cdot \left(1 + 5,75 \cdot \frac{p_{min} - p_e}{p_c(t)}\right) \cdot \alpha_h^{-1,5} \cdot \alpha_{gw} \quad (7.15)$$

p_{min} = Pressão interna mínima que pode ser continuamente sustentada;

γ_ε = Fator de resistência a deformação. Definido pela referência [16] seção 5 D609 Tabela 5-10;

$\alpha_h = \left(\frac{R_{t0,5}}{R_m}\right)$. Definidos pela referência [16] seção 7 B414 Tabela 7-5;

$\alpha_{gw} = 1$. De acordo com a seção 13 D1000 Figura 2.

7.4 Aplicação da norma para o modelo

Utilizando a metodologia de Colapso Local e Carregamento Controlado verificou-se a ocorrência de colapso e flambagem local respectivamente.

- Verificação do Colapso Local de acordo com a equação (7.1):

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t)}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (7.1)$$

$$2,01 \cdot 10^7 \text{ Pa} \leq 9,80 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Logo não irá ocorrer colapso.

- Verificação da flambagem local de acordo com a equação (7.7):

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t)} \right)^2 \leq 1 \quad (7.7)$$

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t)} \right)^2 = 0,049$$

Logo não irá ocorrer flambagem local.

Nesta equação:

$$M_{Sd} = 1,42 \cdot 10^5 N.m$$

Este momento foi calculado através do momento devido à curvatura ($M_b = 1,30 \cdot 10^5 N.m$) calculado analiticamente e multiplicado pelos fatores estabelecidos pela norma. Percebe-se que o valor adotado pela norma é maior, logo sua metodologia é mais conservativa como esperado.

$$S_{Sd} = 3,26 \cdot 10^6 N$$

Esta força axial foi calculada através da tração exercida pelo tensionador ($T = 2,96 \cdot 10^6 N$) calculada analiticamente e multiplicada pelos fatores estabelecidos pela norma. Percebe-se que o valor adotado pela norma é maior.

Capítulo 8

8. Conclusão

Após a análise de cada método, conclui-se que o mais vantajoso para o lançamento em águas ultraprofundas é o método *S-Lay*. Este método atende uma grande variedade de dutos incluindo os de grandes diâmetros. O tempo de operação é reduzido garantindo maior produtividade em comparação aos demais métodos se combinado com a atuação de embarcações de grande porte, por exemplo, a *AllSeas Solitaire*.

Conclui-se que o tensionador atua mantendo a tração, a fim de que a catenária não altere a sua forma evitando as ovalizações excessivas, flambagem local e posterior colapso do sistema.

Após as análises de ovalização do duto identificou-se que tanto no tensionador quanto no TDP (*touchdown point*) os valores obtidos foram menores quando comparados aos limites de ovalização citados na Norma DNV-OS-F101. Contudo a ovalização no TDP foi maior devido às solicitações atuantes na região.

Na fase de instalação, é necessário respeitar e manter sempre constante a distância entre a embarcação e o TDP de modo a não alterá-la com a movimentação da embarcação. Assim como, o raio de curvatura deverá ser mantido constante, pois sua redução ocasiona um aumento do momento fletor, que interfere diretamente nas solicitações estruturais e geometria do duto.

Para trabalhos futuros, os estudos desse modelo podem ser voltados às análises dinâmicas influentes tanto na embarcação quanto ao longo da catenária, considerando as correntes marinhas e ondas nas quais atuam nos eixos X-Y-Z além do estudo de batimetria do solo.

Referências Bibliográficas

- [1] GUO, B., SONG, S., CHACKO, J., GHALAMBOR, A., “Pipeline Installation Methods”, Offshore Pipelines, Elsevier, 2005.
- [2] Imagem balsa de apoio <http://www.acteon.com/s2s-magazine/s2s-issue-12/deepwater-challenges-for-conductor-installation-394>, acessado 18/05/2014.
- [3] KYRIAKIDES, S.; CORONA, E.; *Mechanics of Offshore*, v.1, 1 ed., Texas, Elsevier, 2007.
- [4] de MATTOS, Daniel Hall. “Estudo do comportamento de dutos rígidos durante a instalação em águas profundas”. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.
- [5] STEENHUIS, A. L. J. “*Modifications to the Pipelay Vessel Solitaire for the Independence Trail Project*”. *Offshore Technology Conference* 2007.
- [6] Imagem *spool base* <http://www.technip.com/en/our-business/fleet-facilities/spoolbases>, acessado em 18/05/2014.
- [7] Imagem atividade de bobinamento (*spooling*) <http://www.brederoshaw.com>, acessado em 18/05/2014.
- [8] BRAESTRUP, M, ANDERSEN, J. B., ANDERSEN, L. W., BRYNDUM, M. B., NIELSEN, N. R., 2005, *Design and Installation of Marine Pipelines*. 1 ed. Oxford, Blackwell Science Ltd.
- [9] Y. BAI, Q. BAI, *Subsea Engineering Handbook*, Elsevier, Oxford, UK, 2010.
- [10] Descrição da embarcação *Deep Blue* <http://www.technip.com>, acessado em 18/05/2014.
- [11] Descrição da embarcação FDS2 <http://www.saipem.com>, acessado em 18/05/2014.
- [12] Descrição da embarcação Solitaire Allseas Brochure <http://www.allseas.com>, acessado em 18/05/2014.
- [13] Descrição da Balsa DLB Iroquois <http://www.technip.com>, acessado em 18/05/2014.

- [14] Imagem da âncora DMA
http://members.home.nl/g.c.verweij/Tempest%20periode%20januari%20en%20februari%2006/40_t_dead_man_anchor_on_deck_050206.html, acessado em 18/05/2014.
- [15] Procedimento de Instalação GLOBAL INDUSTRIES.
- [16] JONYLSON CARVALHO DE AMARANTE, M.Sc. 2009.
- [17] GALGOUL, E.C., “Simulação numérica de procedimentos de instalação de dutos submarinos”. Tese M.Sc. COPPE/UFRJ/PEC, 2009.
- [18] Apostila PUC Capítulo 2 – Certificação Digital N° 0521476/CA.
- [19] SOUZA, A. P. F., “Colapso de Dutos Submarinos sob Carregamentos Combinados de Pressão Externa, Tração e Flexível”. Tese de M.Sc., COPPEAJFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994.
- [20] JACOVAZZO, B. M.; *Ferramentas Numéricas Para Análise de Operações de Lançamento de Dutos Offshore*. Dissertação de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [21] BRIDGE, C., “*Effects of seabed interaction on steel catenary risers*”. Tese de PhD. *University of Surrey, School of Engineering*. Inglaterra, 2005.
- [22] Catálogo *Offshore Pipelines* - Saipem
- [23] AMARANTE, R. M., “Estudo da estática e dinâmica de linhas, sob configuração de catenária, através da identificação geométrica, processamento e análise de imagens digitais. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [24] PESCE, C..Mecânica de cabos e tubos submersos lançados em "catenária": uma abordagem analítica e experimental. Tese de livre-docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [25] JENSEN, G. A., “*Offshore Pipelaying Dinamics*”. Tese de PhD. *Norwegian University of Science and Technology*. Noruega, 2010.
- [26] BEER, F., JOHSTON, E.R., “Resistência dos Materiais”. Tradução Adolfo H., 5ª Edição, São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2008.

[27] TIMOSHENKO, S.P., Gere, JM., “*Theory of elastic stability*”, Second Edition, MacGraw Hill, 1961.

[28] DNV-OS-F101, *Submarine Pipeline Systems*. Høvik, Det Norske Veritas, 2013.

[29] FOX, R W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

ANEXOS

ANEXO A: Equilíbrio estático

ANEXO B: Análise de tensões no TDP

ANEXO C: Análise de tensões no Tensionador

ANEXO D: Ovalização no TDP

ANEXO E: Ovalização no Tensionador

**ANEXO F: Verificação do colapso e flambagem local pela
DNV OS F101**