

2 Conceitos básicos

Este capítulo apresentará os principais conceitos relacionados ao desenvolvimento desta dissertação pretendendo não só abranger alguns conceitos de mecânica, mas também apresentar o desenvolvimento de uma instalação de dutos rígidos em meio offshore.

2.1.Dutos rígidos

Os dutos rígidos são amplamente utilizados em instalações submarinas em virtude da sua simplicidade estrutural e da sua maior resistência ao colapso em elevadas profundidades, em contraposição ao estado atual da tecnologia de flexíveis. Estas características diminuem os custos de fabricação em relação aos dutos flexíveis. Estes são estruturas complexas, multi-camadas de polímeros e ligas metálicas, em geral desacopladas cada uma com finalidade funcional e estrutural diversa. Não serão abordadas nesse trabalho.

Apesar de possuírem algumas vantagens, os dutos flexíveis têm sua resistência limitada, pois as tecnologias atuais limitam as instalações a profundidades de aproximadamente 2500m. No entanto, o processo de instalação de um duto flexível é mais rápido e requer menos tempo de engenharia para a sua realização.

O projeto de um duto rígido demanda muitas horas de engenharia, pois a maior rigidez à flexão gera uma série de dificuldades para a sua instalação e operação. Esta característica diminui a adaptabilidade do duto com o solo marinho. Outro problema é relativo à forma como os dutos são estocados no continente e transportados até o local de instalação. O enrolamento não é tão simples quando comparado ao de dutos flexíveis. Ao mesmo tempo, é necessária a utilização de estruturas maiores para realizá-lo. Existem outros métodos onde a tubulação é montada em alto mar. Alguns destes métodos de instalação são abordados na Seção 2.5.

Dutos rígidos podem ser fabricados de diversas formas atualmente. As mais utilizadas são aquelas que se baseiam no processo U-O-E, gerando dutos com costura, ou no processo de extrusão, gerando dutos sem costura. É prática estabelecida na indústria petrolífera especificar esses últimos para dutos de escoamento de óleo, gás e mesmo água de injeção, na faixa de diâmetro disponível no mercado (típico máximo de 12”).

No processo U-O-E os dutos são conformados em prensas “U” e “O” a partir de chapas de aço. Em seguida, são soldados automaticamente, interna e externamente por arco submerso. Após esta etapa são expandidos a frio (fase “E”) e submetidos ao teste hidrostático, a ensaios não destrutivos, e a verificações dimensionais e de laboratório. Apesar de possuírem uma ótima exatidão na espessura de parede, devido à conformação de chapas, este tipo de duto não é aceito para enrolamentos em carretéis devido aos efeitos de plasticidade na solda, os quais ocorrem durante o processo, e conseqüentemente aumentam a possibilidade de falha do duto. O processo está representado na Figura 3 e na Figura 4.

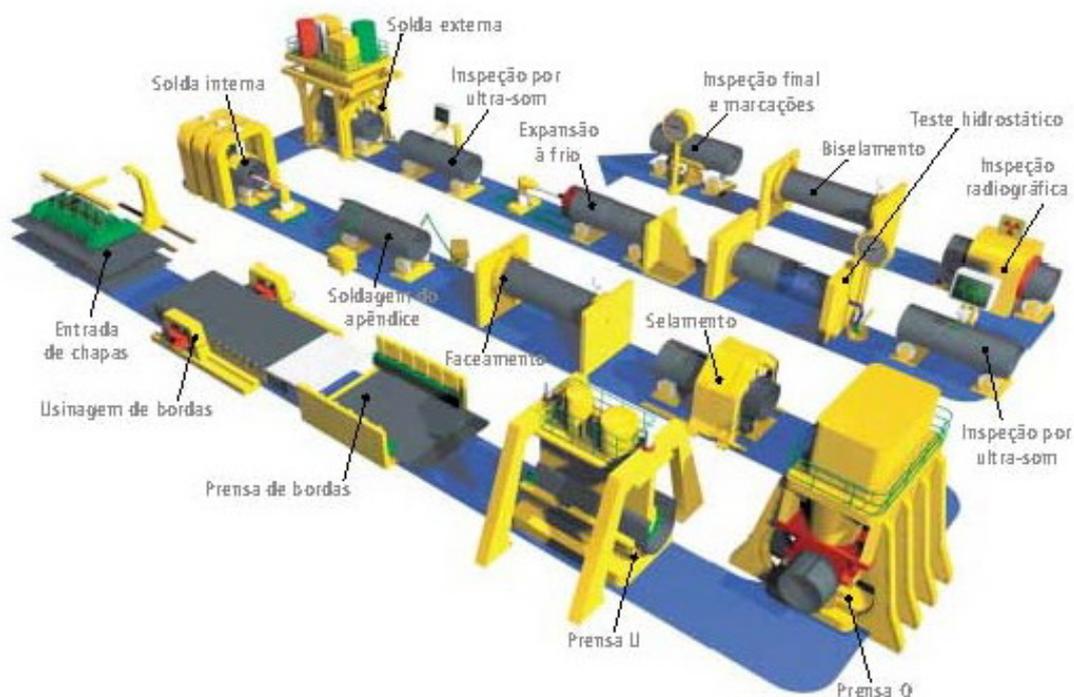


Figura 3 – Linha de montagem de dutos através do processo U-O-E [Confab]

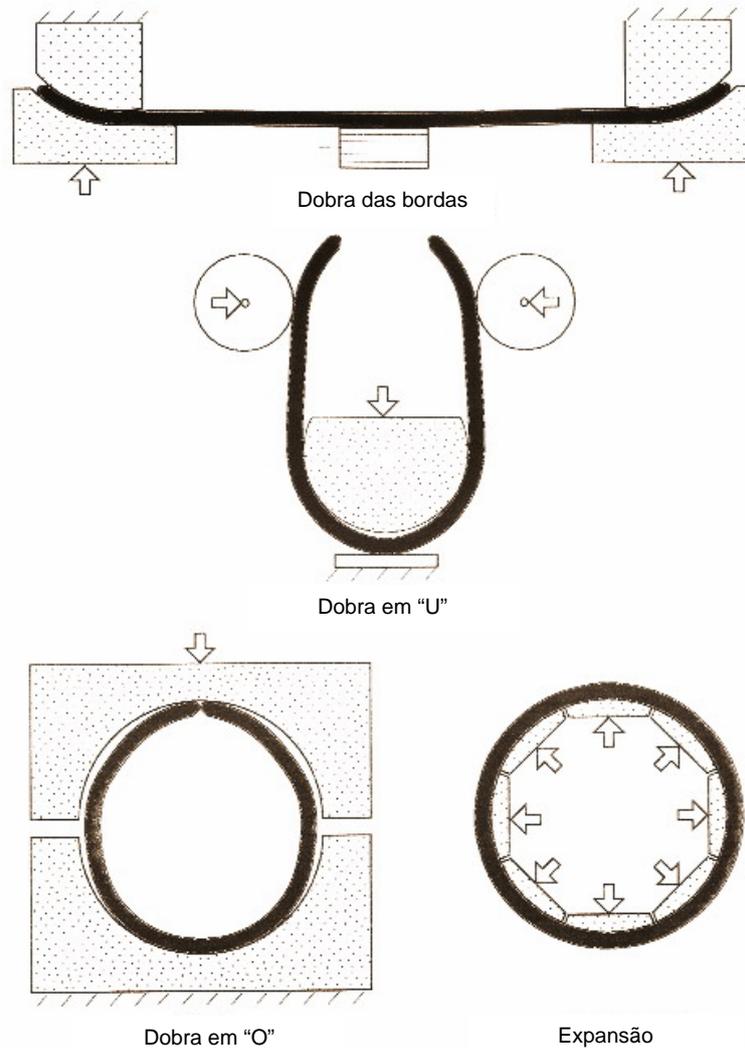


Figura 4 – Desenho esquemático do processo de conformação U-O-E [Kyriakides (2007)]

No processo de extrusão, os dutos 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 duto. Com o diâmetro interno gerado, o duto é então expandido radialmente, e depois laminado, pretendendo-se com isto melhorar a tolerância dimensional da parede e diminuir a ovalização imposta ao longo do processo. Existem diversas formas de realizar este processo. Estas variam de acordo com os diâmetros externos e as espessuras desejadas pelo cliente. A Figura 5 e a Figura 6 apresentam algumas variações destes processos.

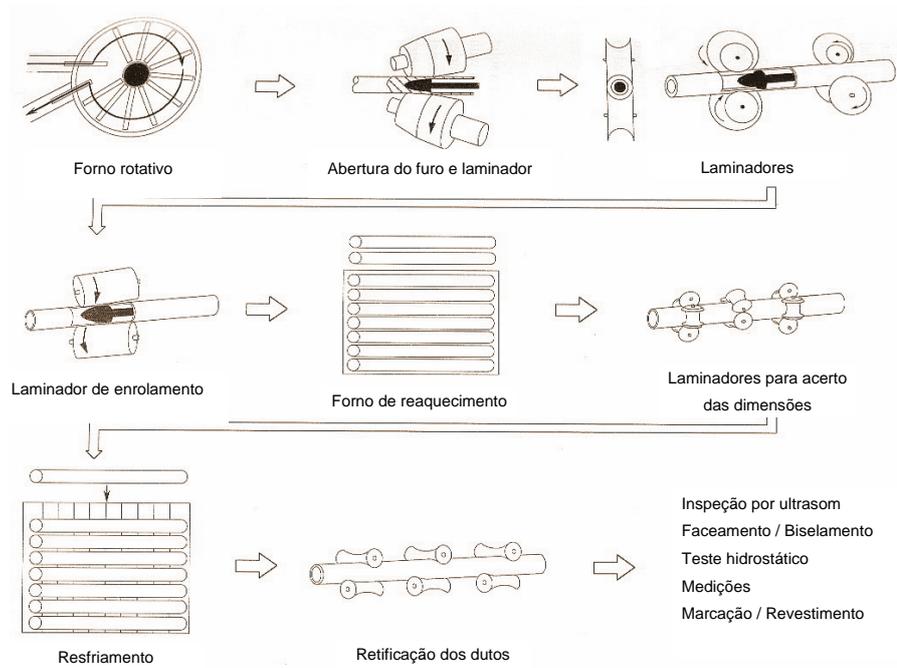


Figura 5 – Linha de montagem de dutos através do processo por Extrusão tipo “Plug Mill” [Kyriakides (2007)]

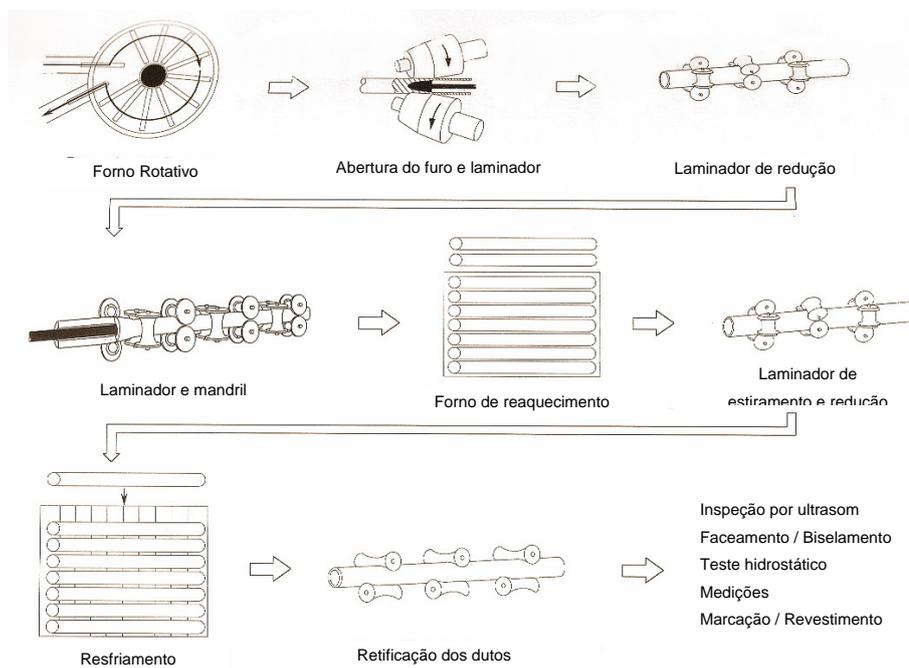


Figura 6 – Linha de montagem de dutos através do processo por Extrusão tipo “Mandrel Mill” [Kyriakides (2007)]

O processo de extrusão é vantajoso, pois não envolve soldagem. Um problema neste processo é a geração de dutos com tolerâncias dimensionais maiores para o diâmetro externo e para a espessura de parede. A DNV (2000) especifica uma tolerância para a espessura de $\pm 12.5\%$. No entanto, empresas

como a Vallourec & Mannesmann, única fabricante deste tipo de duto no Brasil, oferece tolerâncias na faixa de -8% a +18%. Para o processo de enrolamento em carretéis de embarcações offshore este é o único processo aceito. Ambos os processos apresentados alcançam os mesmos valores de resistência estrutural.

2.2. Materiais

Aplicações offshore exigem materiais de alta resistência mecânica. Naturalmente, a escolha de materiais para dutos rígidos remete à escolha de aços carbono manganês por possuírem as características necessárias para o produto de modo econômico. A disponibilidade no mercado e seu baixo custo comparativamente com outros materiais, fazem deste a escolha ideal para o transporte de óleo ou gás. No passado, as uniões entre as seções tubulares eram feitas através do uso de flanges e parafusos. Atualmente, as uniões entre os dutos são soldadas, e os flanges são utilizados somente para união com outros equipamentos como PLET, PLEM, e cabeças de tração, entre outros. A demanda do mercado determinou a necessidade de aços de baixa liga, como os utilizados na construção naval e vasos de pressão, em virtude da necessidade do aumento da resistência para o atendimento das cargas de projeto dos dutos.

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam alguns detalhes dos aços comumente utilizados na indústria offshore.

Duto Rígido	Composições Máximas %													
	C	Mn	Si	Al x10 ²	Ca x10 ³	Ni	N x10 ²	Cu	V x10 ²	Nb x10 ²	Ti x10 ²	B x10 ³	P x10 ²	S x10 ³
Formulações Típicas														
API 5L Básico	0,31	1,80											3,00	3,00
API 5L	0,16	1,56	0,35	4,00			1,20		7,00	5,00		1,00	3,00	15,00
Sweet Onshore	0,11	1,56	0,35	4,00		0,20	1,00	0,25	8,00	5,00			2,50	10,00
Sweet Offshore	0,08	1,56	0,30	4,00	3,00	0,20	0,80	0,25	8,00	4,00			1,50	5,00
Sour Offshore	0,05	1,00	0,30	4,00	5,00	0,20	0,70	0,25	6,00	5,00		4,00	1,50	1,00
Exemplos Atuais de Composições de Aços														
X65 / 16mm	0,02	1,59	0,14							4,00	1,70	1,00	1,80	3,00
X65 / 25mm	0,03	1,61	0,16			0,17				5,00	1,60	1,00	1,60	3,00
X65 / 25mm	0,06	1,35				0,25		0,33	7,00	4,00	1,80		2,50	5,00
X70 / 20mm	0,03	1,91	0,14							5,00		1,00	1,80	3,00
X70 / 20mm	0,08	1,60						0,04		7,00				

Tabela 2 – Composição Típica de Aços utilizados na fabricação de dutos rígidos
[Mannesmann]

Grau	Tensão de Escoamento		Tensão de Ruptura		S_y / S_u
	lbf/in ²	MPa	lbf/in ²	MPa	
A25	25000	172	45000	310	0,555
A	30000	207	48000	331	0,625
B	35000	241	60000	413	0,584
X42	42000	289	60000	413	0,700
X46	46000	317	63000	434	0,730
X52	52000	358	66000	455	0,787
X56	56000	386	71000	489	0,789
X60	60000	413	75000	517	0,799
X65	65000	448	77000	530	0,845
X70	70000	482	82000	565	0,853
X80	80000	551	90000	620	0,889

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas típicas de aços utilizados na fabricação de dutos rígidos conforme API [Mannesmann]

Para este estudo foi utilizado, em todas as análises, o aço API 5L X60, cuja tensão de escoamento é de 60ksi (413MPa).

A última coluna da Tabela 3 apresenta a relação S_y/S_u . A ductilidade de um material não só depende desta relação mas também da deformação associada à ruptura. Em uma observação preliminar, aços com valores menores de escoamento são mais dúcteis que os de maiores valores. Isto é um critério importante no momento do dimensionamento de uma tubulação já que a baixa ductilidade pode ser um fator limitante, por exemplo, no enrolamento em um carretel.

Aços para aplicação em dutos rígidos em ambientes offshore requerem algumas características, tais como:

- Alta resistência à tração
- Boa ductilidade
- Boa tenacidade à fratura
- Soldabilidade

Escolher um duto rígido para uma determinada instalação requer a distinção do balanço de suas propriedades. Um exemplo típico é o perfil operacional de temperatura de uma rota de duto rígido. A tubulação neste período pode ficar sob efeito de baixas temperaturas, as quais podem afetar o

comportamento mecânico do material, e conseqüentemente provocar a fragilização do mesmo. Da mesma maneira o duto pode transportar óleo, que durante a produção atinge temperaturas, na ordem de 60°C a 120°C. Neste momento, a tubulação fica sujeita a efeitos de flambagem devido à expansão térmica junto com o ancoramento da linha por atrito, os quais podem provocar a falha da mesma.

Deste modo, o projeto de tubulações rígidas requer atenção a todas as etapas do processo, desde a fase de instalação até a fase de produção. É necessário prever todos os carregamentos aos quais elas estarão submetidas, além de tentar prever como será a história de cargas a qual estes estarão submetidos durante a vida útil do projeto.

2.3. Materiais elastoplásticos

Projetos mecânicos em uma grande parte consideram apenas os efeitos da zona elástica dos materiais. Basear o projeto nesta hipótese resulta em uma avaliação mecânica mais simples de ser interpretada, e ao mesmo tempo se torna mais conservativa, uma vez que se pressupõe o alcance das tensões máximas envolvidas à valores abaixo do escoamento.

No entanto, em alguns projetos ultrapassar o limite de escoamento é uma premissa. Escoar o material não significa que o componente mecânico falhe, porém existem alguns efeitos gerados em conseqüência disto.

2.3.1. Natureza fenomenológica da Teoria da Plasticidade

As teorias da elasticidade e da plasticidade descrevem a mecânica da deformação de uma grande parte dos sólidos utilizados na engenharia. Ambas as teorias aplicadas a metais e ligas foram baseadas em estudos experimentais das relações entre tensão e deformação em agregados policristalinos, sob efeitos de carregamentos simples. Portanto, eles são de uma natureza fenomenológica na escala macroscópica, o que é insuficiente para o conhecimento da estrutura de um metal. A fim de entender as limitações impostas por estas teorias, o engenheiro, com seu interesse no projeto e na fabricação, deve ter algum conhecimento das estruturas dos metais. Nas

próximas seções serão discutidos os comportamentos macroscópicos dos metais, porém não serão discutidos ou trabalhados pontos referentes à estrutura cristalina dos metais.

2.3.2. Diagrama de Tensão Deformação nominal sob tração simples

Um teste simples de tração em uma barra de aço usinada é talvez o exemplo mais familiar de deformações elásticas e plásticas. Este teste é realizado com uma barra de aço sendo estendida em uma máquina de teste de tração, dentro de uma sala com temperatura controlada, sob uma razão de deformação de 2×10^{-3} por segundo, e com leituras de carga e deformação sendo gravadas. Ainda é necessário que o espécime esteja alinhado corretamente com a máquina de teste, e que o mesmo tenha a sua área da seção central reduzida em relação às extremidades, a fim de garantir uma tensão axial uniforme através da região central. Um exemplo típico de gráfico de tensão-deformação de uma barra usinada pode ser observado na figura abaixo.

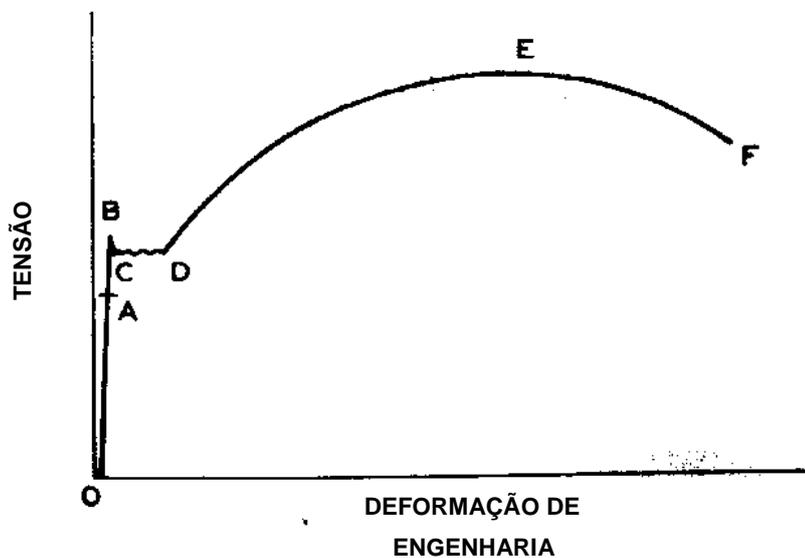


Figura 7 – Gráfico típico Tensão versus Deformação para uma barra de aço usinada
[Johnson (1975)]

Inicialmente a relação entre tensão e deformação é essencialmente linear, como mostra a seção OA da curva. “A” pode ser definido como o limite de proporcionalidade. Nas deformações seguintes, a relação entre tensão e deformação não continua linear, porém o material continua predominantemente elástico, e caso o carregamento seja retirado, o espécime retorna a sua

configuração geométrica inicial. O maior valor de tensão aplicado sem produzir deformações permanentes é conhecido comumente como *Tensão de Escoamento*. Normalmente existe uma diferença entre o limite de proporcionalidade “A”, e o limite elástico “B”. Ambos são dependentes da sensibilidade dos equipamentos utilizados para medição, e também das técnicas de teste envolvidas. O ponto “B” da figura marca o fim da região de deformação predominantemente elástica. Neste ponto é que se deflagra com mais vigor a deformação plástica. Este é conhecido como ponto superior do escoamento. O valor máximo da tensão de escoamento pode ser obtido através da divisão do valor da carga neste ponto, pela área transversal original do espécime. A deformação por unidade de comprimento nesta fase é da ordem de 10^{-3} .

As deformações seguintes são acompanhadas por uma súbita queda no carregamento e se aproximam de um valor de carga constante. Isto está representado no trecho CD. O valor inferior da tensão de escoamento pode ser definido através do valor da carga em CD dividida pela seção original do espécime.

Após o ponto “D”, o carregamento volta a aumentar junto com a deformação. O efeito da capacidade do material em resistir a um carregamento crescente após o escoamento (ao mesmo tempo em que ocorre a redução uniforme da seção transversal) é chamado de *endurecimento por deformação*. Outro conceito importante é o da *deformação verdadeira* no espécime, que pode ser definida como o carregamento aplicado dividido pela seção transversal do espécime naquele instante de medição. No ponto “E” a taxa de endurecimento por deformação é incapaz de manter-se em sincronia com a taxa de redução da área da seção transversal. Um máximo ocorre para o carregamento, seguido por uma estricção da parte central do espécime até o ponto de ruptura do mesmo, o que ocorre em “F”. O limite de resistência à tração ou *Tensão de Ruptura* pode ser definido como o máximo valor de carga dividido pela seção transversal original. A Tensão de Ruptura não é um valor intrínseco de resistência do material; ela é indicador somente da condição de instabilidade (final da deformação uniforme e início da estricção do espécime) no teste de tração.

Observa-se que até se alcançar o valor do limite de Resistência a Ruptura, todos os elementos da barra podem ser considerados como deformados

identicamente sob o efeito do carregamento aplicado. Portanto, até se atingir o ponto “E”, todo o espécime está homogeneamente deformado.

Após o carregamento máximo, uma estrição localizada é formada, na qual um sistema triaxial de tensão se desenvolve. O teste de tração usualmente não alcança seu limite na fratura, mas sim na condição de máximo carregamento. Do ponto de vista de instabilidade até a fratura, a deformação toma lugar na estrição sob um complicado e continuamente modificado sistema triaxial de tensões de tração; quanto maior a taxa de endurecimento do metal, maior será a extensão da estrição.

Se um espécime de tração é carregado e deformado até um ponto “A” apresentado na figura abaixo e a partir deste ponto ele é completamente descarregado, o material recupera parte da deformação elástica. O trecho AB representa a linha de descarregamento. Fica evidente que quando o carregamento é completamente removido, ainda resta uma deformação permanente representada pelo trecho OB.

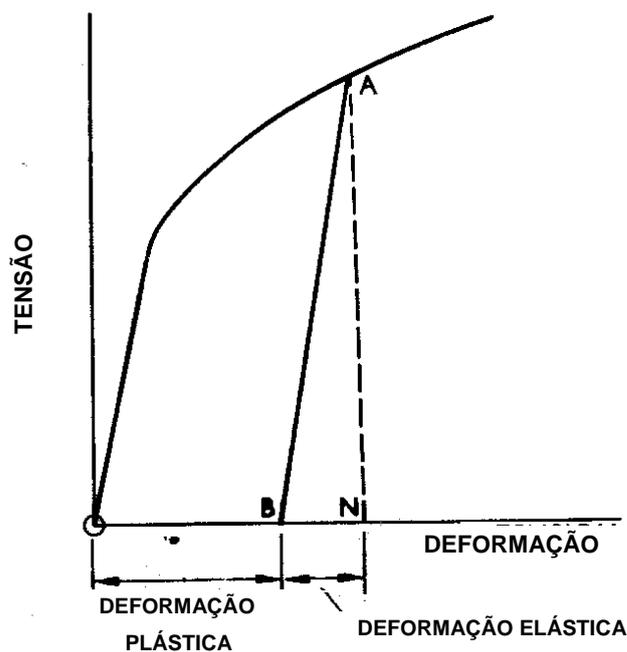


Figura 8 – Gráfico típico Tensão versus Deformação para metais ou ligas [Johnson (1975)]

No descarregamento, o trecho BN é elasticamente recuperado, ao passo que por contraste o trecho OB representa a deformação plástica. Recarregar o espécime pode causar uma nova curva seguindo o trecho BA em sua nova deformação elástica.

A maioria dos metais e das ligas não apresenta um escoamento inicial pronunciado como apresentado na Figura 7. A modificação da deformação predominantemente elástica para elastoplástica é gradual. Normalmente os diagramas de tensão-deformação seguem a forma apresentada na Figura 8.

2.3.3. Diagrama de Tensão-Deformação verdadeiros sob tração simples

A curva Tensão-Deformação Nominal é definida apenas pela divisão de um carregamento aplicado longitudinalmente ao espécime de teste pela área da seção inicial do mesmo e com a deformação longitudinal referida ao comprimento inicial do espécime.

A curva Tensão-Deformação verdadeira apresenta maiores informações para estudos de plasticidade. A tensão verdadeira é definida como sendo a divisão do carregamento aplicado longitudinalmente ao espécime pela área da seção do mesmo a cada instante de tempo ao longo do teste.

Normalmente as curvas de materiais são fornecidas utilizando valores de tensão e deformação nominais. Softwares de elementos finitos, como o ABAQUS, fazem uso dos valores verdadeiros. Neste caso é necessário a definição da relação entre ambas às curvas.

A relação entre a deformação nominal e verdadeira é estabelecida apresentando a deformação nominal como apresentado na Equação (1):

$$\varepsilon_{nominal} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (1)$$

Adicionando uma unidade a ambos os lados da expressão e obtendo o log natural de ambos os lados obtém-se o valor da deformação verdadeira como apresentado nas equações abaixo.

$$\partial \varepsilon_{\text{verdadeiro}} = \frac{\partial l}{l} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{verdadeiro}} = \int_{l_0}^l \frac{\partial l}{l} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{verdadeiro}} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4)$$

Substituindo a Equação (1) na Equação (4):

$$\varepsilon_{\text{verdadeiro}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nominal}}) \quad (5)$$

A relação entre a tensão verdadeira e a tensão nominal é obtida considerando a natureza incompressível da deformação plástica. No fundo, pode-se trabalhar com o corpo descarregado onde a deformação elástica é zero (caso uniaxial sem tensão residual). Deste modo o volume inicial e o final do corpo de prova após seu descarregamento elástico é constante e expresso pela relação abaixo.

$$l_0 A_0 = l A \quad (6)$$

A área da seção em um determinado instante do teste de tração pode ser relacionada com a área original através da equação seguinte.

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} \quad (7)$$

Substituindo a definição da área "A" na definição de tensão encontra-se a relação entre tensão verdadeira e nominal.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{no\ min\ al} \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (8)$$

Onde l/l_0 pode ser escrito de acordo com a equação (1) na forma seguinte.

$$\frac{l}{l_0} = 1 + \varepsilon_{no\ min\ al} \quad (9)$$

Realizando uma substituição na equação (8), a relação entre tensão verdadeira e nominal é descrita como:

$$\sigma_{verdadeiro} = \sigma_{no\ min\ al} (1 + \varepsilon_{no\ min\ al}) \quad (10)$$

Os valores de tensão e deformação verdadeiros definidos a partir da relação com seus respectivos valores nominais permitem a geração de uma curva tensão-deformação verdadeira necessária para descrever o comportamento dos materiais elastoplásticos. Como mencionado anteriormente, estes são os valores utilizados em softwares de elementos finitos.

2.4. Embarcações do tipo PLSV

Embarcações do tipo PLSV (Pipelay Support Vessel) atualmente prestam serviços referentes a instalações de tubulações submarinas. Existem diversos modelos de navios disponíveis, cada qual com seu layout de instalação de acordo com os tipos de serviços prestados. Estas embarcações são capazes de instalar quilômetros de tubulação com apenas um carregamento, que pode ser de dutos rígidos, ou de dutos flexíveis, ou até mesmo de ambos dependendo do escopo de trabalho a ser executado.

Alguns equipamentos estão comumente presentes na construção de embarcações deste gênero. Abaixo estão listados os principais:

- Carretel
- Tensionadores
- Guindastes
- Guinchos

O *Carretel* ou *Bobina* é responsável pelo armazenamento da tubulação rígida ou flexível durante o transporte até o local de lançamento. Quando utilizados em carregamentos de tubulações rígidas, os carretéis devem possuir um diâmetro interno grande, a fim de diminuir as deformações plásticas às quais os dutos estarão submetidos durante o enrolamento. As embarcações atuais deste gênero possuem diâmetros internos superiores a 15 metros. Tubulações flexíveis possuem um raio mínimo de curvatura permitido em uma ordem de grandeza menor que a de dutos rígidos, cerca de 3m.

Os *Tensionadores* são responsáveis pelo pagamento ou recolhimento da tubulação durante o processo de instalação. Estes são constituídos por “lagartas” similares a esteiras de trator, as quais pressionam o diâmetro da tubulação uniformemente ao longo de um determinado comprimento, gerando o atrito necessário para suportar a tubulação durante o lançamento. Existem diversos tipos de tensionadores disponíveis no mercado, cujos modelos podem ter de 2 a 4 lagartas.

Os *Guindastes* são responsáveis por todo transporte de carga dentro da embarcação. Normalmente os navios possuem mais de um guindaste com diferentes capacidades e funções. Os guindastes offshore possuem um projeto muito específico, pois a capacidade de carga varia da superfície até o leito marinho, devido à consideração do peso do cabo liberado. Os guindastes modernos possuem um sistema de compensação de arfagem, que é a oscilação vertical dinâmica da embarcação, devido à incidência da amplitude de onda.

Os *Guinchos* são responsáveis pela transferência de cargas, abandono e recolhimento das tubulações no leito marinho. Os guinchos principais são normalmente de alta capacidade e, como os guindastes, são projetados para o uso offshore. As embarcações possuem também guinchos auxiliares com funções adicionais como ancoragem de equipamentos durante o lançamento dos mesmos. Estes são de baixa capacidade, pois servem apenas para

movimentação de carga no deck principal até a submersão de um equipamento ou acessório de tubulação.

Este trabalho limitar-se-á a apresentar apenas uma embarcação de instalação de dutos rígidos, devido à grande quantidade de peculiaridades que cada embarcação possui. A embarcação considerada foi o *Seven Oceans*, pertencente à empresa Subsea 7 LTDA.

O *Seven Oceans* é uma embarcação do tipo PLSV, cuja principal atividade se concentra no lançamento de tubulações rígidas. Seu grande tamanho, ainda permite o desenvolvimento de atividades secundárias, como por exemplo, a instalação de equipamentos submarinos. Esta embarcação entrou em serviço em Agosto do ano de 2007. A Figura 9 abaixo apresenta o modelo tridimensional do navio.

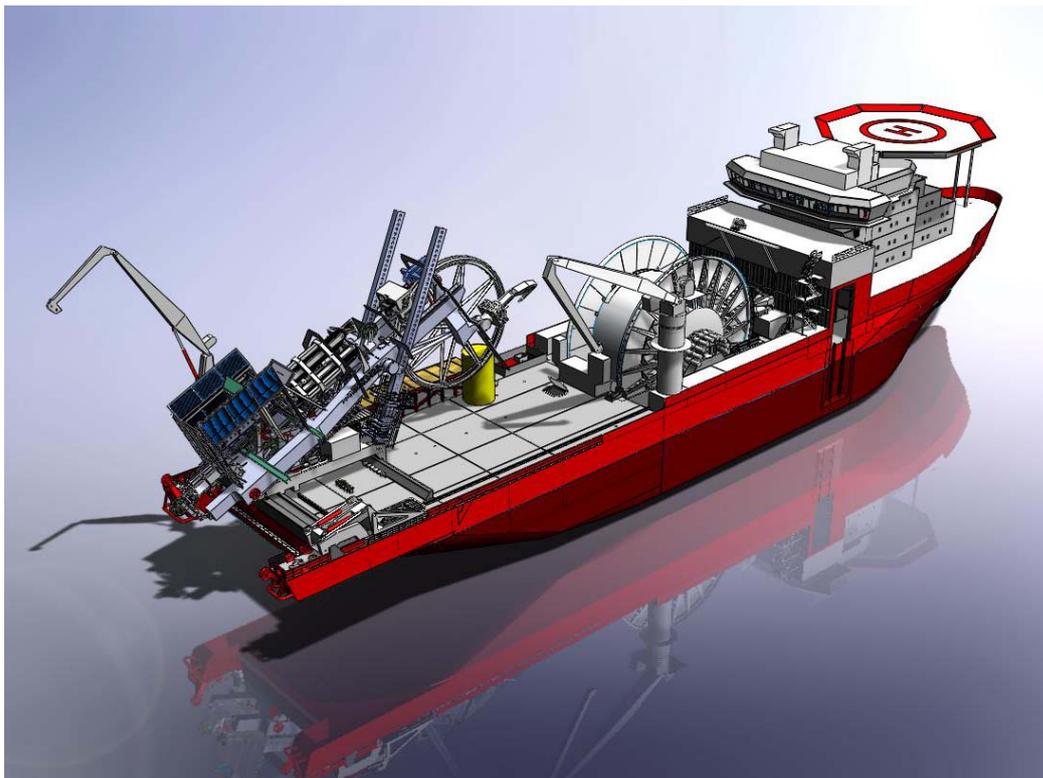


Figura 9 – Modelo tridimensional da embarcação Seven Oceans [Subsea 7]

A planta de lançamento da embarcação possui uma série de equipamentos específicos que devem ser apresentados para o entendimento do processo de enrolamento e desenrolamento de dutos. Os principais equipamentos além dos já citados são:

- Rampa de lançamento
- Polia de alinhamento (“Aligner”)
- Retificador (“Straightener”)

A *Rampa de lançamento* é a área principal das embarcações de instalação de dutos rígidos. É nela que estão concentradas estações de trabalho para soldagem, tensionadores, “aligner” e “straightener”. A rampa se inclina de acordo com a lâmina d’água de lançamento. Trechos rasos requerem ângulos menores da rampa com a direção horizontal, e vice-versa.

O *Aligner* é uma grande polia, onde o duto rígido sofre uma mudança de direção saindo da rampa de lançamento para o carretel. Neste equipamento, o duto sofrerá deformações plásticas durante o seu processo de enrolamento e desenrolamento, no caso específico do Seven Oceans.

O Straightener é responsável por retornar o duto à sua condição de linearidade inicial. Quando o duto é enrolado para estocagem, ele plastifica. No desenrolamento, o duto não recupera a conformação inicial, já que parte da seção transversal escoou. O straightener aplica uma deformação calibrada no duto contrária ao enrolamento e “anula” as deformações residuais existentes.

Na Figura 10 estão indicadas as posições dos equipamentos descritos na embarcação Seven Oceans.

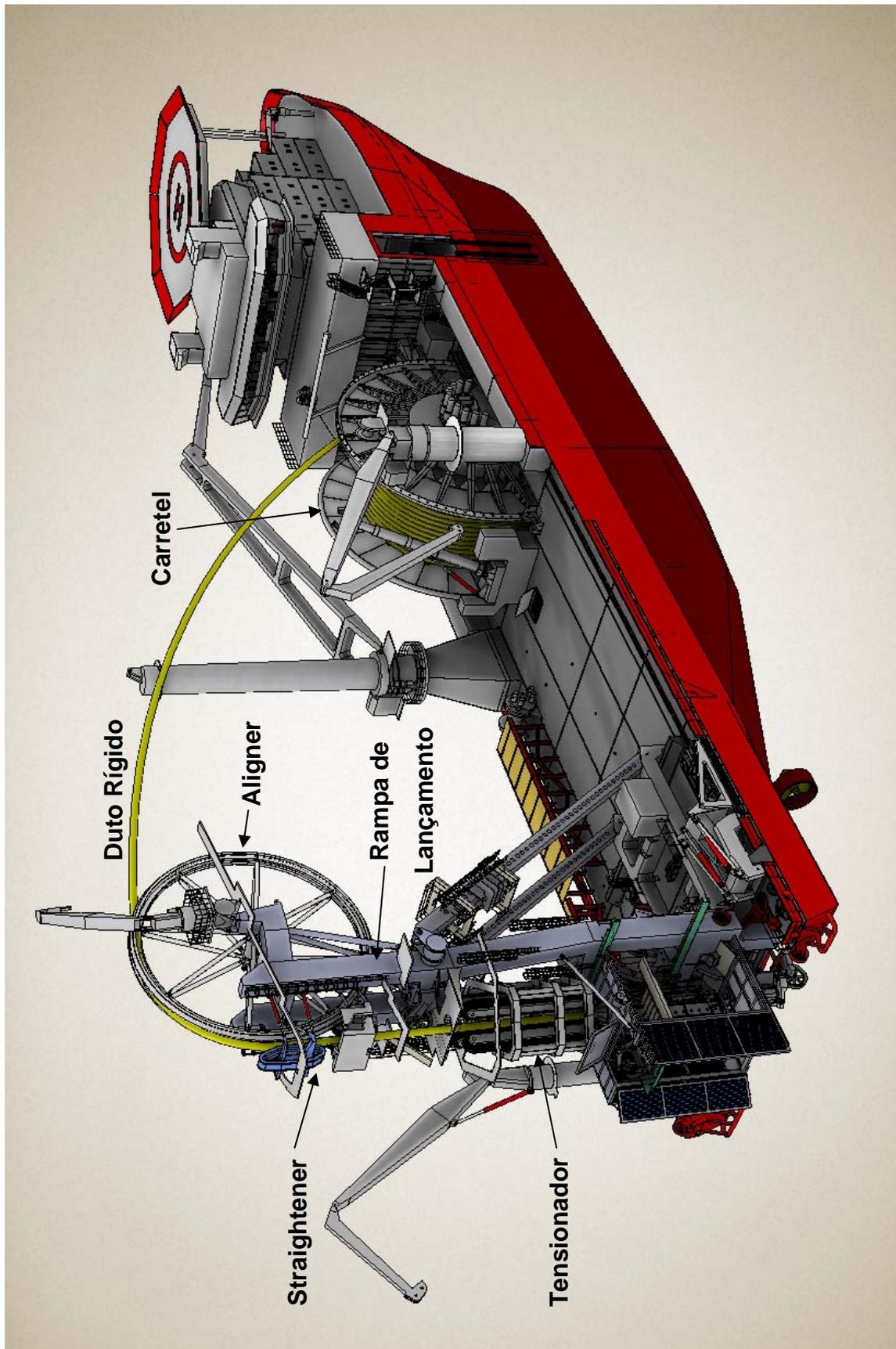


Figura 10 – Posições dos equipamentos de lançamento no Seven Oceans [Subsea 7]

Na Tabela 4 estão apresentadas algumas características técnicas da embarcação Seven Oceans.

Especificação	Dados Seven Oceans
Tipo de Carretel	Vertical
Raio interno do carretel (m)	9
Largura do Carretel (m)	10
Raio do “Aligner” (m)	9
Capacidade de dutos (t)	3500
Diâmetro dos dutos (pol.)	4 a 16
Capacidade de carga no carretel (t)	100
Capacidade de carga no tensionador (t)	400

Tabela 4 – Especificações técnicas da embarcação Seven Oceans

Nas seção 2.5, o processo de enrolamento e desenrolamento do duto rígido será detalhado em todas as suas etapas.

2.5.Processos e métodos instalação de dutos rígidos

Um dos processos mais rápidos de instalação de dutos rígidos é através de embarcações que utilizam o método de enrolamento (“Reel method”). Neste método, dutos de comprimentos longos são enrolados em um carretel de grande diâmetro interno. A embarcação é carregada em uma base portuária onde já estão fabricadas as seções definidas pelo projeto. No momento em que o carretel está completo, a embarcação parte em direção ao local de instalação e inicia o desenrolamento gradual dos dutos. Durante o processo a embarcação movimenta-se lentamente a uma velocidade média de até dois nós.

Existem outros métodos de instalação de dutos rígidos bastante utilizados na indústria, como o “S-Lay” e o “J-Lay”.

O método “S-Lay” caracteriza-se pela tubulação iniciar sua instalação na posição horizontal e ao longo do lançamento adquirir uma configuração em “S” à medida que a mesma atinge o solo marinho. Toda a montagem da tubulação ocorre no interior da embarcação através de diversas estações de trabalho. A embarcação é abastecida continuamente por seções de dutos fornecidos por

embarcações de suporte, devido à limitação de área de estocagem. Após a soldagem das seções, os dutos são lançados lentamente através de uma rampa denominada “stinger” até tocarem o solo marinho. O “stinger” é responsável pela transição suave do duto de uma posição horizontal para uma posição em ângulo de lançamento. Esta transição é necessária a fim de evitar concentrações de curvatura que possam viabilizar uma flambagem localizada. A Figura 11 apresenta uma representação esquemática do método.

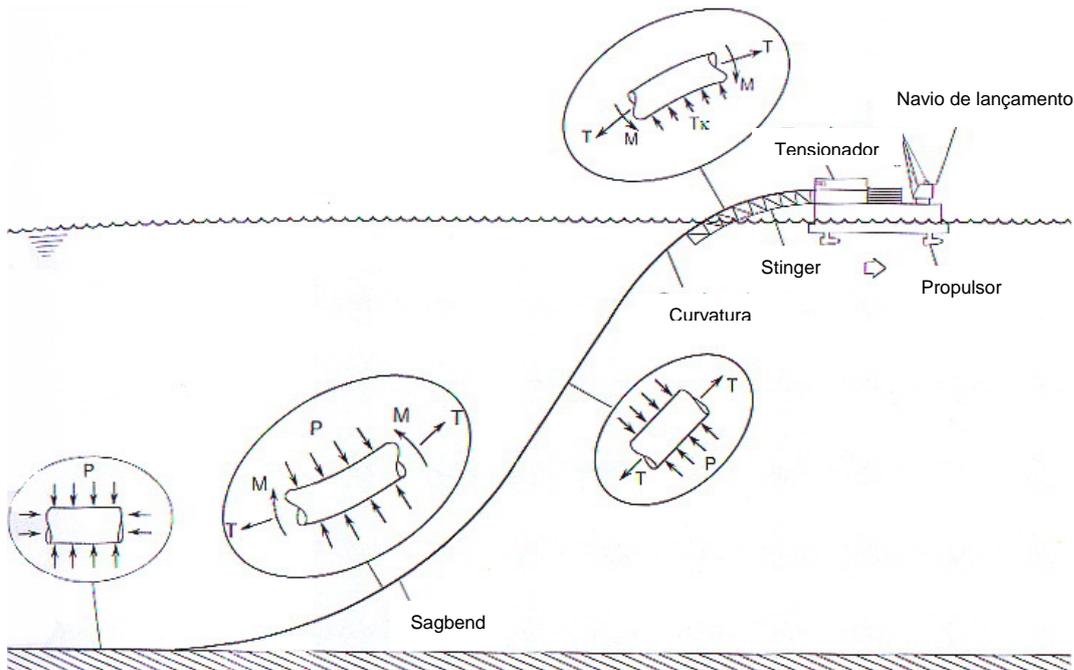


Figura 11 – Representação esquemática do método de lançamento “S-Lay” [Kyriakides (2007)]

O método “J-Lay” é aplicado apenas para águas profundas. O aumento da tensão de topo devido à profundidade faz com que o “stinger” utilizado no método “S-Lay” necessite de um maior comprimento para garantir pequenas deformações na saída da embarcação. A configuração em “S” se torna mais complexa e mais sujeita à flambagem localizada. O método “J-Lay” surge como uma alternativa sendo lançado praticamente em uma posição vertical. Os ângulos de lançamento variam de 0° a 15° . Da embarcação até o solo marinho a tubulação assume uma configuração em “J”, como apresentado na Figura 12. Assim como o método “S-Lay”, todo o processo de montagem do duto é realizado na embarcação com abastecimento de material proveniente de embarcações de suporte. A montagem é feita em estações de trabalho localizadas na torre de lançamento.

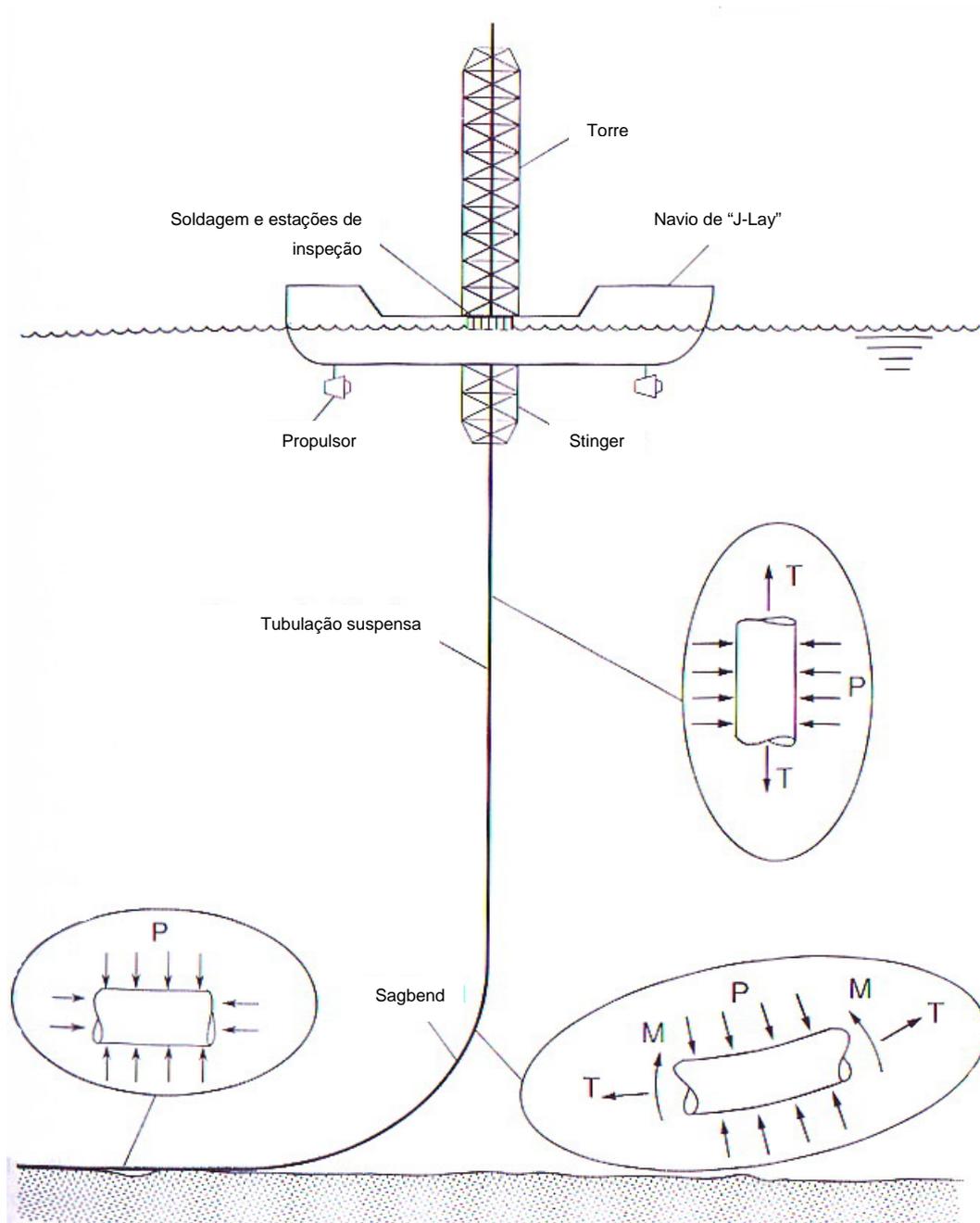


Figura 12 – Representação esquemática do método de lançamento "J-Lay" [Kyriakides (2007)]

O método de enrolamento possui uma grande vantagem de instalação em relação aos outros métodos como "S-Lay" e "J-Lay". Todo o processo de fabricação é transferido para uma base em terra. Um dos maiores custos de projeto de instalação de dutos é recorrente do tempo de utilização de embarcações que para esta função, normalmente são de grande porte. O processo de enrolamento faz uso de dutos contínuos e são poucas as soldagens que ocorrem na embarcação otimizando o processo por completo. As soldagens

ocorrem apenas nas emendas de dutos recuperados ou na instalação de equipamentos auxiliares na tubulação.

Em contrapartida, o processo de enrolamento e desenrolamento é o que impõe maiores deformações aos dutos quando comparado aos outros métodos. Os dutos quando curvados atingem deformações dentro da região plástica da curva tensão-deformação. Os valores de deformações são diretamente dependentes do diâmetro externo do duto, da espessura de parede do duto e do diâmetro interno do carretel. No entanto, estas deformações são controladas através de projetos que condicionam os dutos a estarem dentro das deformações estabelecidas por norma. A Seção 2.6 apresenta a descrição do ciclo completo de deformações ao qual o duto é submetido.

O tipo de falha possível devido à flexão do duto é a flambagem localizada (“local buckling”). Este tipo de flambagem ocorre devido à instabilidade elasto-plástica da parede do duto quando submetido a carregamentos compressivos longitudinais na região interna da curvatura do duto. A flambagem localizada pode ser identificada como o excesso de curvatura em relação ao valor aceitável, o qual pode ser calculado.

A possibilidade de flambagem local pode ser reduzida quando durante o enrolamento/ desenrolamento é aplicado uma carga de tração (“back tension”). Na prática, uma forma de identificar uma possível flambagem localizada é monitorar o descolamento (“lift off”) da superfície do duto em relação às camadas inferiores. A figura abaixo apresenta um exemplo deste descolamento. A carga de tração reduz este efeito.

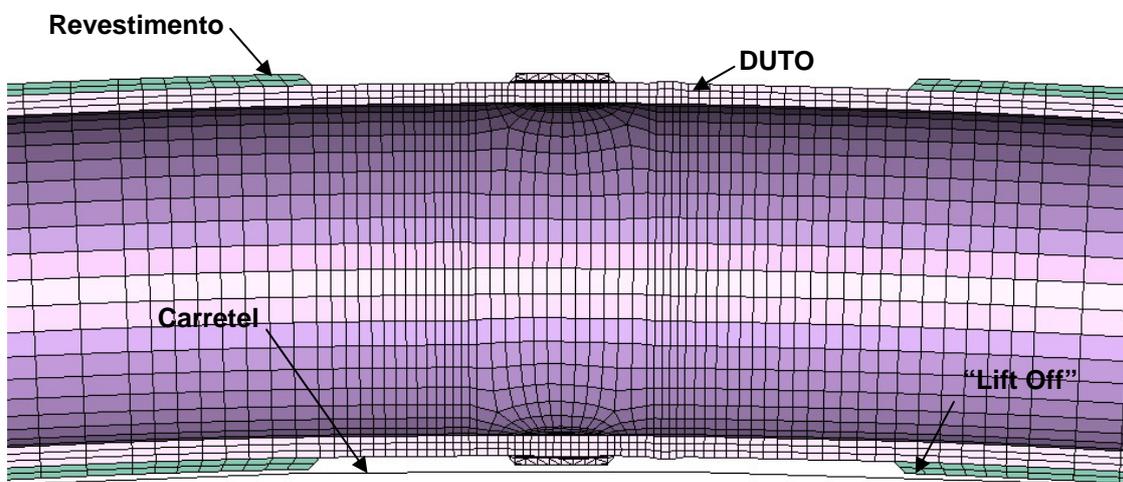


Figura 13 – Representação esquemática do efeito de “Lift Off”

2.6.Ciclo de deformações através do método de “enrolamento”

O método de “enrolamento” induz um ciclo de deformações plásticas nos dutos que são controladas ao longo do processo. Estas deformações são ocasionadas pela flexão do duto no enrolamento e desenrolamento passando por equipamentos como o carretel e o “aligner” descritos na Seção 2.4. Visando facilitar as indicações de posições em uma seção de duto foi adotada a convenção de acordo com a Figura 14.

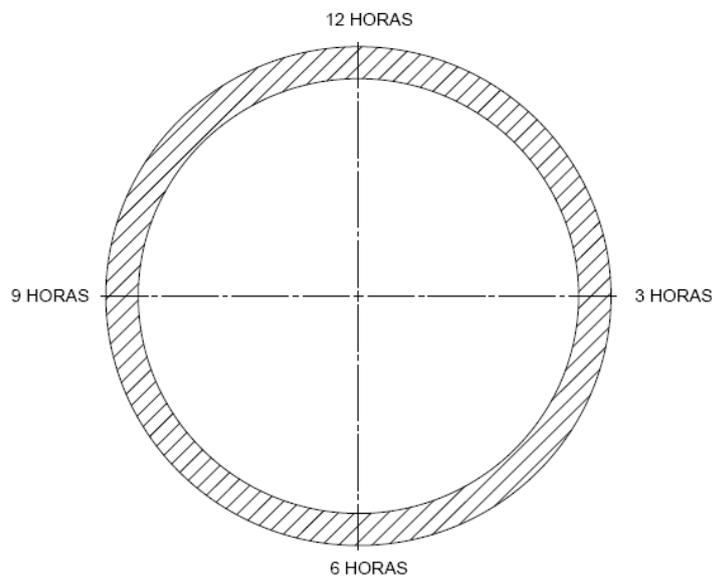


Figura 14 – Desenho esquemático para convenção das posições de referência da seção de um duto

A história dos carregamentos de flexão é contabilizada no projeto de vida a fadiga do duto. Portanto, em um projeto de dutos é necessário entender todos os eventos de deformação dentro da embarcação. Cada etapa do processo registra um valor de deformação.

Em um estudo de vida a fadiga de um duto sendo enrolado/ desenrolado, somente são considerados os carregamentos de deformação longitudinal dos pontos da tubulação que estiverem sob tração. Somente estes tipos de carregamento promovem a nucleação ou o aumento de um eventual defeito sob

a superfície do duto. Carregamentos compressivos não colaboram com a nucleação ou com o aumento de trinca.

No entanto, em uma avaliação de enrolamento de um duto em um carretel, o tipo de falha esperado é a flambagem localizada na região compressiva do duto. Quando um duto é enrolado, este está sujeito à flexão produzida pelo dobramento sobre a superfície do carretel e nos demais equipamentos que estão na trajetória do duto dentro da embarcação de lançamento. O enrolamento do duto não pode ser associado à teoria de vigas, pois a seção transversal é deformada. Uma forma de entender o comportamento de falha de um duto submetido à flexão é observando curva de evolução do momento. À medida que a curvatura do duto cresce, o momento acompanha a evolução do valor de curvatura até atingir um valor limite, onde neste instante ocorre à falha da seção. Este tipo de comportamento pode ser observado em um gráfico da evolução do Momento aplicado em um duto sob flexão, como apresentado na Figura 15. Uma discussão mais detalhada sobre este gráfico é apresentada na Seção 3.5, onde inclusive é apresentada uma equação para o cálculo do momento limite.

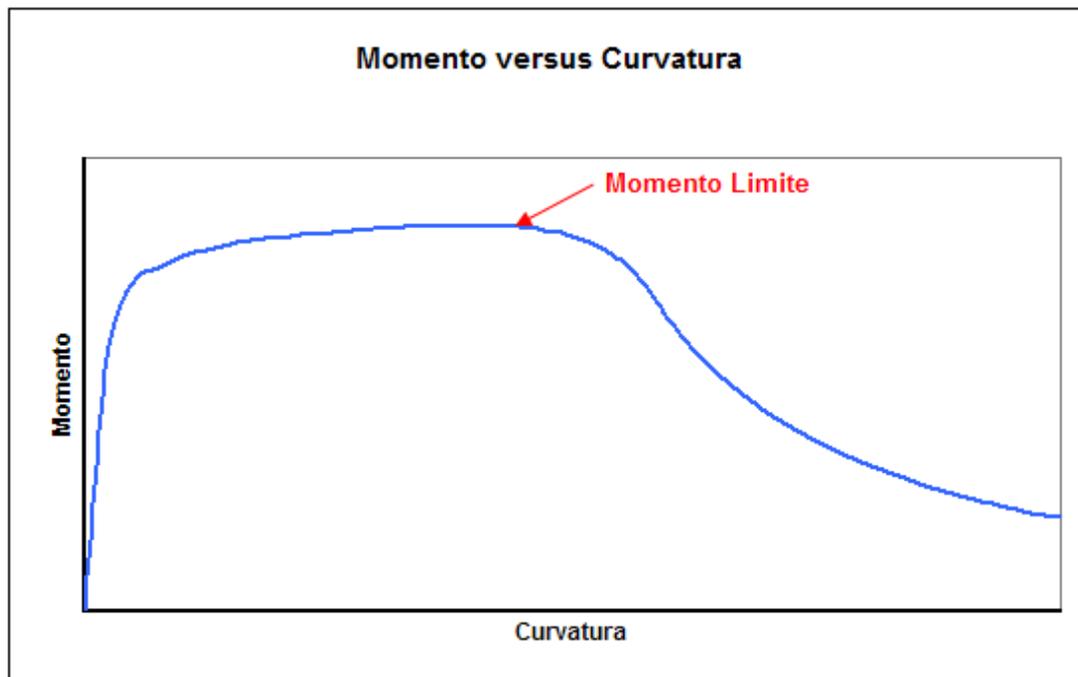


Figura 15 - Gráfico típico da evolução de momento aplicado em um tubo submetido à flexão

A redução da resistência da seção está relacionada com as cargas compressivas envolvidas no processo de flexão. O aumento do momento induz o aumento da curvatura, que por sua vez aumenta as deformações longitudinais compressivas. Desta forma, existe o acúmulo de esforços localizados em uma dada região e em um determinado instante, a seção atinge seu limite de estabilidade estrutural falhando sob efeitos compressivos, o que caracteriza uma flambagem localizada.

Ao longo deste trabalho serão avaliados os efeitos do aumento do momento até um valor limite das deformações longitudinais compressivas. Desta forma, será possível determinar em que deformação um duto com uma dada relação DE/t pode falhar.

Com o objetivo de entender onde e quando um duto pode falhar no processo de “enrolamento” é necessário apresentar todas as etapas envolvidas dentro da embarcação de lançamento.

Na Figura 16 é apresentado um gráfico Tensão-Deformação de um ciclo típico de um ponto da seção posicionado às 12 horas e com a superfície de contato do duto com o carretel em um ponto às 6 horas, ciclo esse típico para o Seven Oceans.

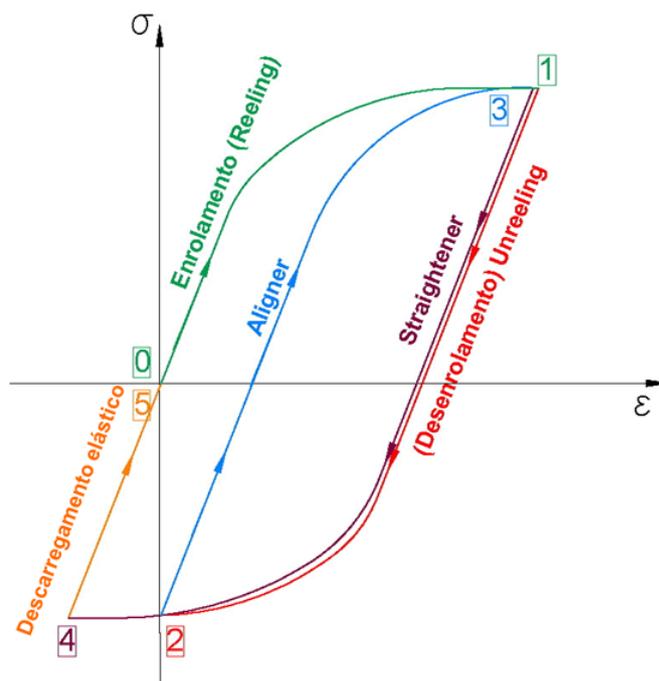


Figura 16 – Gráfico Tensão-Deformação típico do Ciclo de carregamento e descarregamento do método de “Enrolamento”

Observando a Figura 16, o processo de enrolamento/ desenrolamento pode ser dividido em etapas para um melhor entendimento, como apresentado abaixo:

- 0 – 1: Enrolamento (“Reeling”)
- 1 – 2: Desenrolamento (“Unreeling”)
- 2 – 3: Polia de alinhamento (“Aligner”)
- 3 – 4: Retificador (“Straightener”)
- 4 – 5: Descarregamento elástico

Com base na Figura 10 e na Figura 16, em conjunto com as figuras à seguir, é possível descrever o ciclo completo ao qual a duto é submetido.

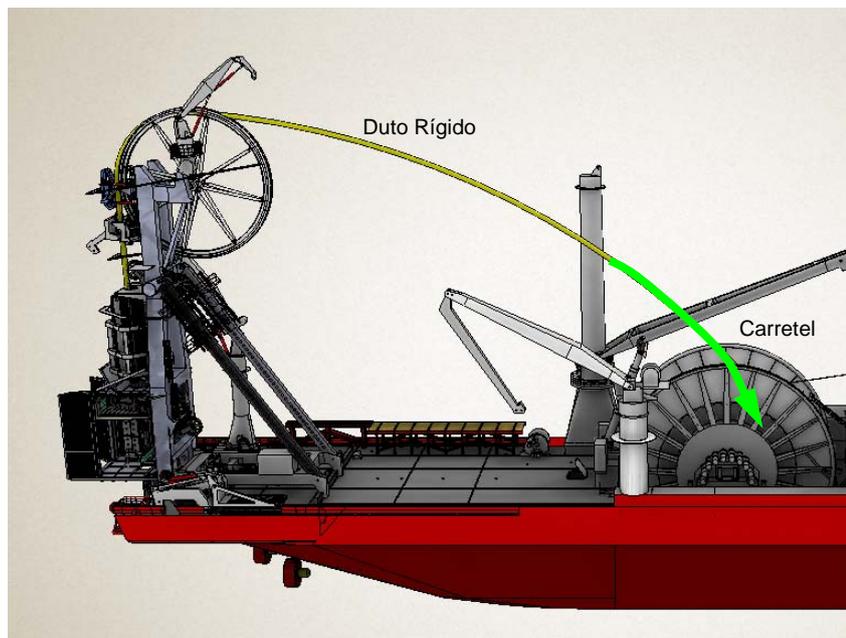


Figura 17 – Enrolamento no carretel (Trecho 0-1)

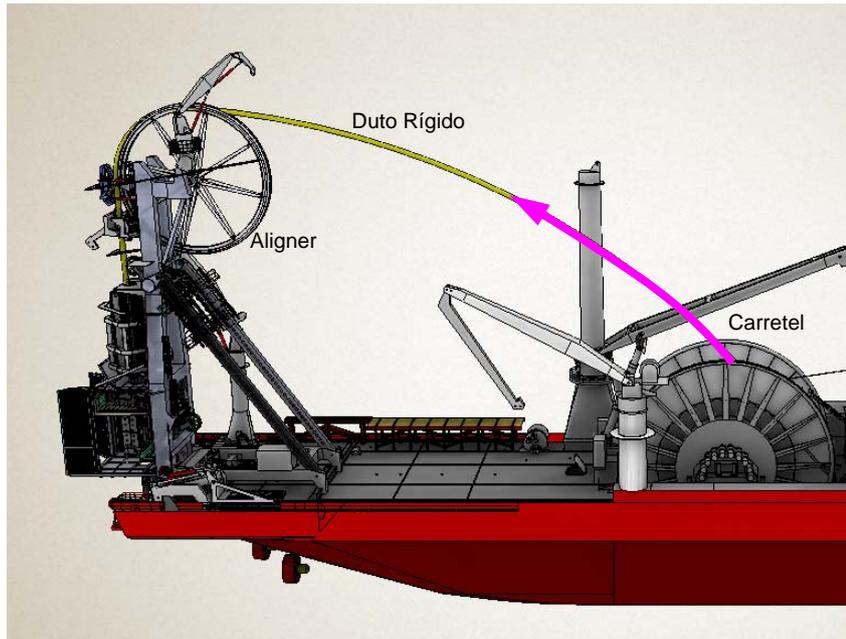


Figura 18 – Desenrolamento do carretel em direção ao aligner (Trecho 1-2)

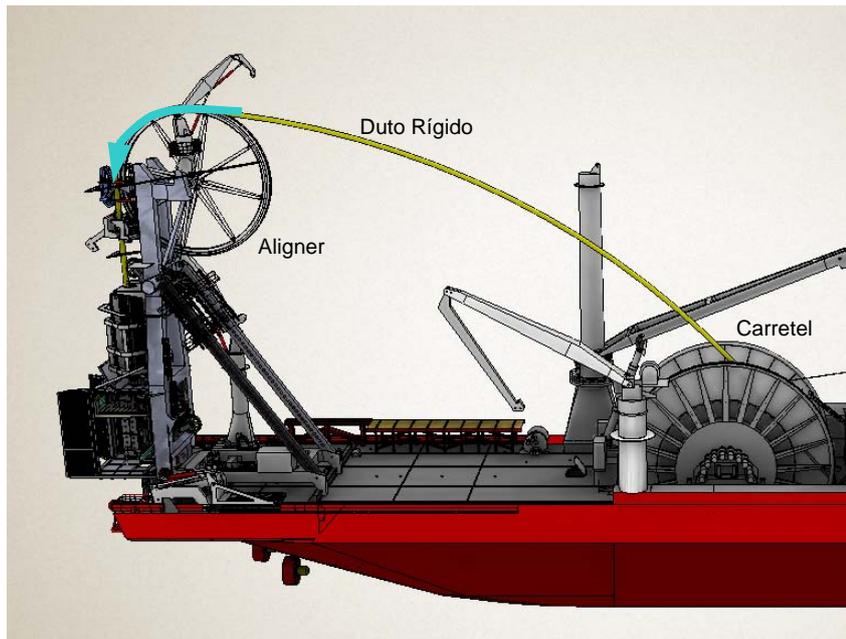


Figura 19 – Dobramento sobre o aligner (Trecho 2-3)

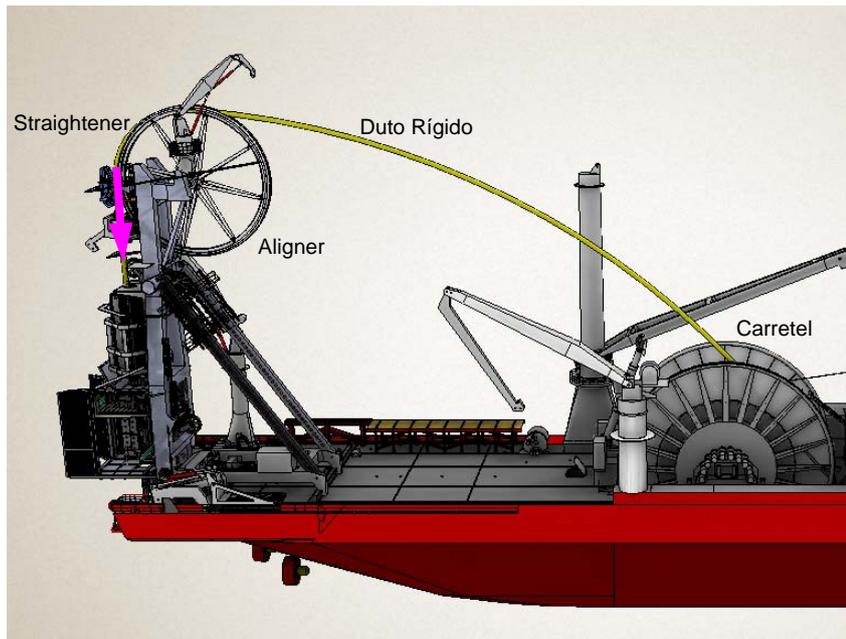


Figura 20 – Retificação no straightener (Trecho 3-4)

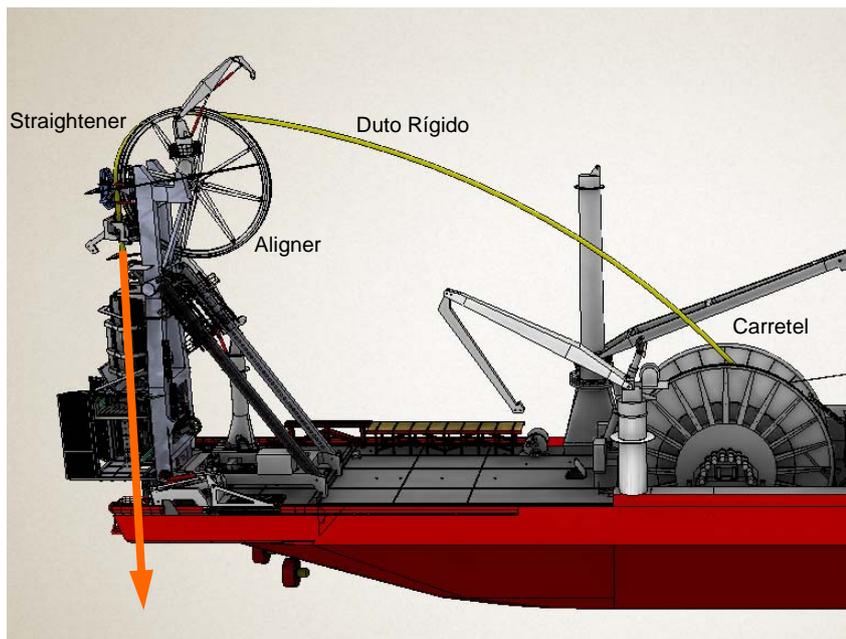


Figura 21 – Descarregamento elástico (Trecho 4-5)

Como mencionado anteriormente na Seção 2.5, os dutos carregados nas embarcações com carretéis são contínuos. A base de fabricação de dutos normalmente é instalada em uma região costeira a fim de permitir a maior aproximação possível da embarcação de lançamento. Na base são construídos trechos de dutos com cerca de 1km, conhecidos na prática como tramos (“stalks”). A embarcação aporta próxima a base de fabricação, onde inicia o

tracionamento do duto para o interior da embarcação. A tubulação passa pelo interior da rampa de lançamento e em seguida é guiada pela polia de alinhamento até se aproximar do carretel. À medida que os dutos são tracionados, os “stalks” são soldados formando trechos longos e contínuos de tubulação. A Figura 22 apresenta um base de fabricação típica da Subsea 7, localizada em Ponta de Ubu, Espírito Santo.

Na chegada do duto ao interior da embarcação, o mesmo é orientado e posicionado para iniciar o processo de enrolamento referente ao trecho “0-1” da Figura 16. O duto que neste instante encontra-se sem deformações, começa à ser curvado passando por uma fase de deformações lineares elásticas até uma determinada seção atingir o raio de curvatura do carretel. Neste instante, o duto nas posições 6 e 12 horas encontra-se com deformações plásticas compressivas e trativas respectivamente. No entanto, em uma operação convencional de “enrolamento” o interior da seção permanece sob regime elástico. Os valores de deformações compressivas podem atingir valores maiores que o do critério estabelecido pela DNV (2000), o que será discutido mais detalhadamente na Seção 5.13. Para esta primeira etapa, a rampa encontra-se inclinada no ângulo mínimo permitido com a horizontal a fim de evitar um ciclo de deformação adicional na polia de alinhamento. A Figura 23 e a Figura 24 apresentam fotos de um processo de enrolamento típico de um duto.



Figura 22 - Foto aérea da Base de Ubu pertencente a Subsea 7 no Espírito Santo



Figura 23 - Foto de um enrolamento típico na embarcação Skandi Navica pertencente à Subsea 7

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0510810/CA



Figura 24 - Foto do carretel em um enrolamento típico na embarcação Skandi Navica pertencente à Subsea 7

Após o carregamento do duto no carretel, a embarcação navega até o local de instalação. O processo de desenrolamento é iniciado e está representado na Figura 16 pelo trecho “1-2”. Como a tubulação sofre uma deformação contrária, o duto tende a retornar à sua configuração linear inicial e transita sob um vão livre. No entanto, resta uma deformação plástica residual que configura uma curvatura no duto na seção entre o carretel e o aligner. Esta é controlada aumentando o valor da carga de tração no carretel. Se o carretel não oferecer nenhuma resistência, o duto pode assumir um alto valor de curvatura localizada e conseqüentemente falhar por flambagem. A curvatura do duto pode ser avaliada observando a Figura 23 e a Figura 24. Na curva tensão-deformação este valor atingirá o valor zero, caso não existam mais deformações residuais do trecho anterior.

A seção que deixou o carretel e foi desenrolada, novamente é curvada na polia de alinhamento. Este trecho de duto é sujeito a deformações plásticas nas posições 6 e 12 horas, como apresentado na Figura 16 pelo trecho “2-3”. Os níveis de deformações podem atingir ou mesmo ultrapassar os níveis apresentados no trecho “0-1”.

O duto, após a saída da polia de alinhamento, atravessa um equipamento retificador conhecido como “straightener”. Neste local, é aplicada uma deformação no sentido oposto da aplicada anteriormente, suficiente para na saída do equipamento, o duto estar retilíneo através do relaxamento das deformações residuais. O retificador está apresentado na Figura 16 pelo trecho “3-4”. A diminuição das deformações está apresentada no trecho “4-5”.

Na Figura 16 os valores de tensão e deformação atingidos variam de acordo com a configuração da embarcação e com as características mecânicas dos equipamentos envolvidos.

2.7. Anodos e sapatas de anodos (“anode pads”)

Os anodos são acessórios necessários para a proteção catódica das tubulações rígidas contra a corrosão durante sua vida útil, que varia normalmente de 20 a 30 anos.

Atualmente existem diversos modelos de anodos disponíveis no mercado e o seu desenho depende do projeto de tubulação ao qual estiver vinculado. Os anodos podem variar em forma, estrutura e material. Os anodos utilizados em ambientes submarinos são constituídos por Alumínio, Índio e Zinco (Al-In-Zn).

Normalmente os anodos de dutos rígidos são constituídos por duas partes que são posicionados ao redor da tubulação. Cada parte possui uma estrutura metálica interna para conseguir resistência e ambas são cobertas por Al-In-Zn moldado. Quando instalados, os anodos não podem deslizar. O atrito necessário para evitar o deslizamento é obtido através do aperto por parafusos nas bordas de cada parte. A Figura 25 e a Figura 26 apresentam um projeto típico de anodos utilizados em tubulações rígidas.

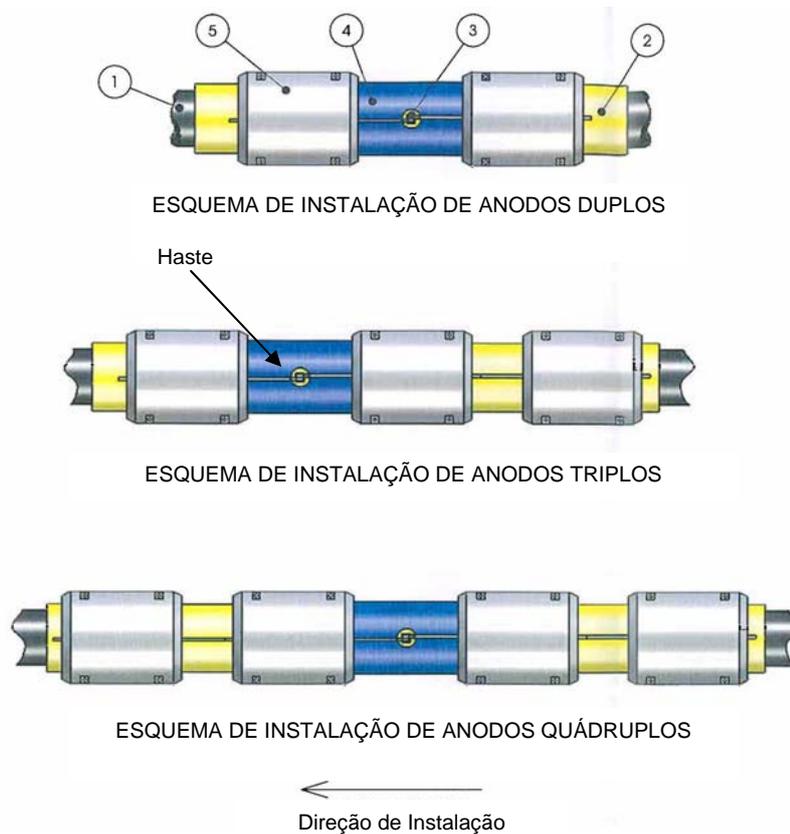


Figura 25 – Desenho esquemático das possíveis montagens de anodos



Figura 26 – Fotos de anodos de dutos rígidos da empresa SACOR

A Figura 25 apresenta como os anodos podem ser dispostos ao redor das tubulações. Como pode ser observado, caso necessário, os anodos ainda podem estar conectados em séries de dois (“twin”), três (“triple”) e quatro (“quadruple”). A quantidade está vinculada especificamente ao projeto.

Os dutos rígidos são sempre revestidos com uma camada polimérica, cuja função está em proporcionar resistência à abrasão, isolamento térmico e proteção contra corrosão. Como os anodos são instalados sobre o revestimento, não existe o contato entre as superfícies do anodo e do duto. Desta forma, o fluxo de corrente elétrica é interrompido e o anodo perde a sua funcionalidade de proteção anti-corrosiva. Com o objetivo de estabelecer a corrente entre as partes é soldada uma chapa circular dobrada na mesma curvatura da seção do duto, a qual é denominada *Sapata de Anodo* (“Anode Pad”). A Figura 27 e a Figura 28 apresentam uma Sapata de Anodo soldada na metade de uma seção do duto. Para a instalação da chapa é realizado um desbaste no revestimento até a superfície do duto. A estrutura metálica do anodo possui uma haste que fica exposta (ver Figura 25). O contato entre o anodo e o duto é estabelecido através desta haste que é soldada na sapata de anodo.

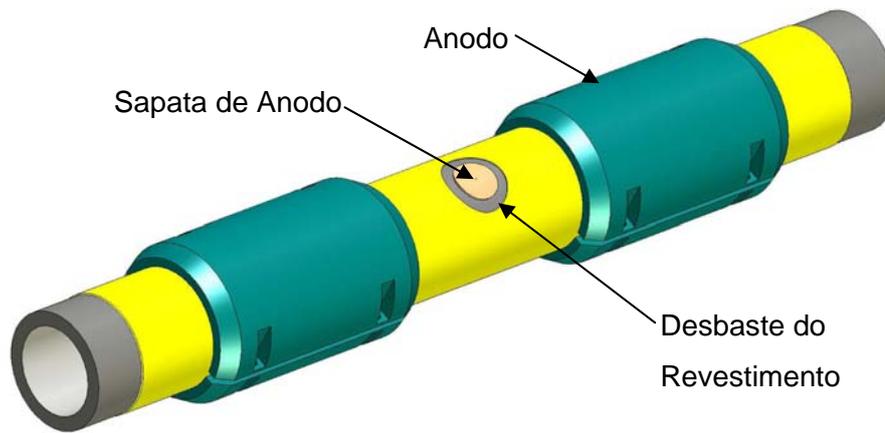


Figura 27 – Posicionamento da Sapata de Anodo sobre uma seção de duto

A soldagem da sapata de anodo sobre a superfície do duto faz com que esta região se torne um ponto de descontinuidade geométrica. O ponto onde esta sapata é instalada aumenta em um determinado comprimento da espessura da seção transversal, e conseqüentemente insere uma rigidez localizada. Isto é refletido nas concentrações de deformação na vizinhança da sapata.

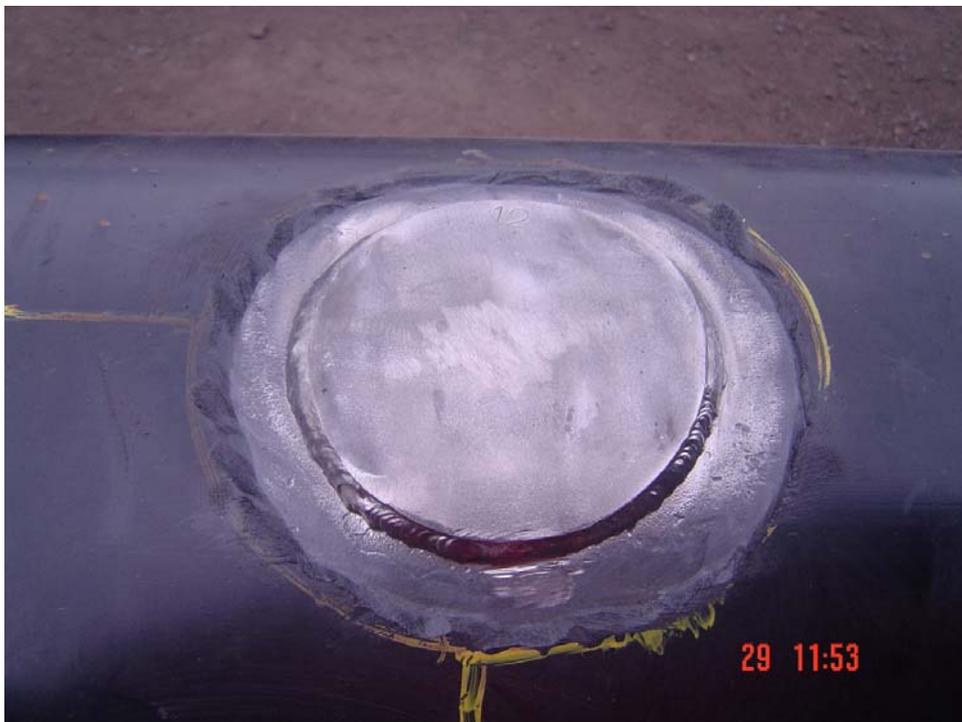


Figura 28 – Foto de uma sapata de anodo instalada no meio de uma seção de duto

A posição onde a sapata de anodo é instalada depende de alguns fatores. Como boa prática é sugerido que as sapatas sejam instaladas na metade de uma seção de duto para afastá-los de regiões de solda. No entanto, para revestimentos espessos a remoção de material para realizar o desbaste é complexa e demorada. Os revestimentos são muito rígidos e existe uma grande aderência devido a uma pasta de epóxi fundida (“Fusion Bonded Epóxi”) colocada entre o duto e o revestimento. Desta forma, a solução muitas vezes empregada é a de instalar a sapata de anodo na região da junta de campo, pois as extremidades dos dutos são fornecidas sem revestimento. Em contrapartida, as concentrações de deformações observadas na vizinhança da sapata de anodo estarão próximas à solda implicando em uma amplificação dos valores de deformações.

A Figura 29 e a Figura 30 apresentam sapatas de anodo instaladas em dutos com revestimento de pequena e grande espessura respectivamente. Quando a sapata não fica alinhada com o revestimento é necessário instalar uma pequena cantoneira ou “T” a fim de compensar a grande espessura de alguns revestimentos. Estas peças não serão consideradas nas análises realizadas neste trabalho, pois não induzem nenhum esforço sobre a tubulação durante o processo de enrolamento.

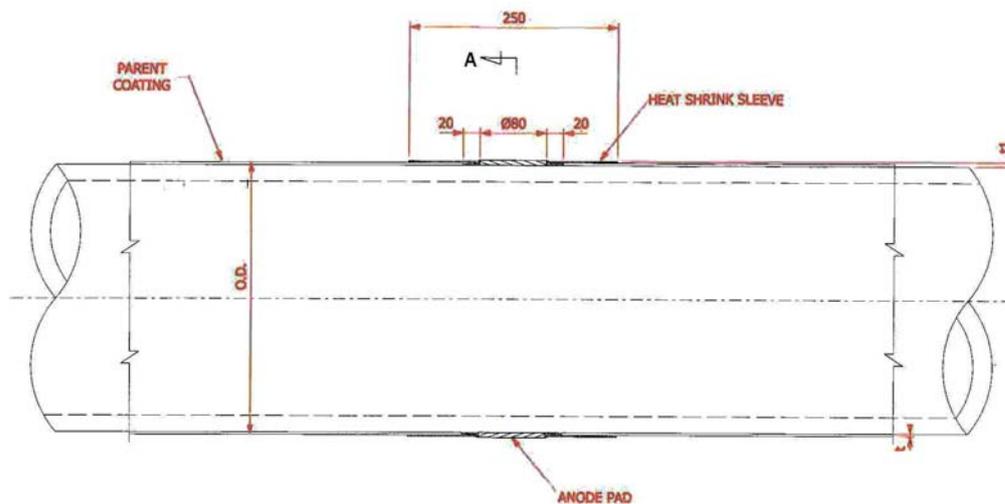


Figura 29 – Desenho esquemático de uma sapata de anodo instalada em dutos com revestimento de pequena espessura

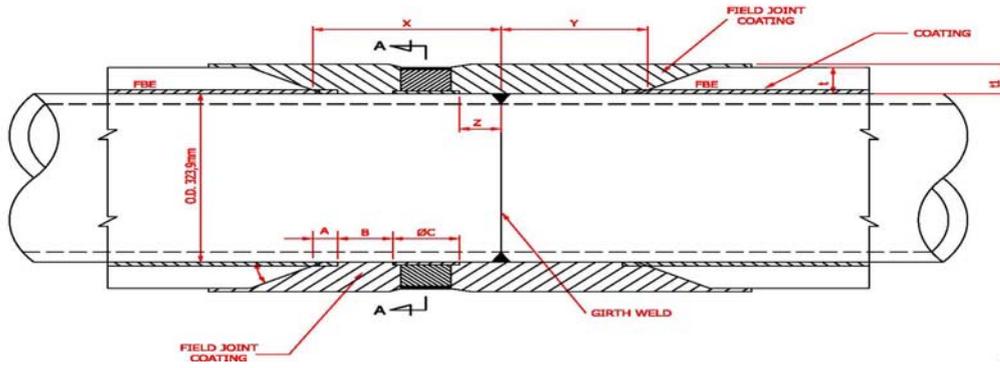


Figura 30 – Desenho esquemático de uma sapata de anodo instalada em dutos com revestimento de grande espessura

Os anodos são instalados apenas quando a tubulação está sendo instalada em alto mar, na região da rampa de lançamento da embarcação. Portanto, os anodos não passam pelo ciclo de enrolamento e desenrolamento dos dutos. Apenas a sapata de anodo passa por estas etapas, pois são instaladas previamente ao carregamento de dutos na embarcação.