

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAPHAELLA DE KÁSSIA AVELLAR FÉLIX DE SOUZA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM CURVAMENTO DE *RISERS* RÍGIDOS  
COM CARGA AXIAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO  
2022**

**RAPHAELLA DE KÁSSIA AVELLAR FÉLIX DE SOUZA**

**ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM CURVAMENTO DE *RISERS* RÍGIDOS  
COM CARGA AXIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Pedro Kenedi

**RIO DE JANEIRO  
2022**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S729 Souza, Raphaella de Kássia Avellar Félix de  
Análise de tensões residuais em curvamento de risers rígidos  
com carga axial / Raphaella de Kássia Avellar Félix de Souza.  
— 2022.  
47f. + apêndice : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.  
Bibliografia : f. 45-47  
Orientador: Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Tubos. I.  
Kenedi, Paulo Pedro. (Orient.). II. Título.

CDD 621

## AGRADECIMENTOS

O encerramento deste projeto não significa unicamente a conclusão de um bacharelado em Engenharia Mecânica e sim o assentamento do último tijolo de um sonho vivido e construído ao longo de toda uma vida.

Ao longo desses cinco anos semeei muito esforço, força de vontade, estudo e dedicação para hoje ter a consciência de que todo meu melhor foi proporcionado a oportunidade de cursar uma faculdade de engenharia em uma instituição federal tão importante quanto o CEFET/RJ. Dessa forma gostaria de apresentar meus cumprimentos a todos que de alguma forma contribuíram ao longo dessa caminhada, em especial a:

A minha família por ser meu maior porto seguro e ter proporcionado todo amparo necessário de forma que essa jornada fosse mais amena. Pelo amor, afeto e compreensão quando tudo parecia desmoronar, não conseguiria sem vocês;

Aos meus amigos que estenderam a mão e me acolheram com empatia e carinho durante todas as dificuldades que enfrentei, que não me deixaram desistir e foram muitas das vezes meus maiores motivadores rumo a conclusão do curso;

Ao meu orientador que durante não somente a elaboração deste projeto final, como nas aulas que ele ministrou teve compreensão, amizade, empatia e respeito por mim. Que seu olhar humano possa continuar se estendendo para cada vez mais alunos e que sua postura profissional possa cada dia mais servir de espelho para os demais docentes. Agradeço a oportunidade de trabalhar junto a você em prol de desenvolvermos ciência para o nosso país.

*“I’m the one at the sail; I’m the master of my sea”  
(Imagine Dragons)*

*“A partir da minha força de vontade, eu me tornei especial”  
(Mike Wazowski)*

## RESUMO

Os *risers* rígidos são utilizados para a exploração de petróleo e gás em poços *offshore* e são transportados até os locais de lançamento através de carretéis dispostos em grandes embarcações denominadas *reel-lay vessels*. Ao longo deste projeto será avaliada a distribuição de tensões residuais em *risers* rígidos quando submetidos ao enrolamento e desenrolamento no carretel considerando, além do carregamento de flexão, a ação da força axial no enrolamento.

**Palavras-chave:** tensões residuais, *riser* rígido, carga axial.

## **ABSTRACT**

Rigid pipelines are used in oil and gas exploration in offshore wells. The pipeline transportation to the release point is performed by a reel localized in the reel lay vessel deck. During this project will be evaluate the residual stress distribution in rigid pipelines during winding and unwinding operation considering, in addition to the bending load, the action of the axial force on the winding.

**Keywords:** residual stress, rigid riser, axial load

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução do consumo das matrizes energéticas ao longo dos anos. Fonte:(Menezes,2005) .....	8
Figura 2: Formação de Hidrocarbonetos. Fonte: (W. Teixeira et al., 2000) .....	9
Figura 3: Tipos de exploração de petróleo. (a) <i>Onshore</i> e (b) <i>Offshore</i> . Fonte: CBIE.....	10
Figura 4: Campos mais produtivos do Brasil - junho de 2011. Fonte: ANP/SDP/SIGEP .....	11
Figura 5: Spoolbase de Ubu (ES). Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	12
Figura 6: Sistema de transporte <i>spoolbase</i> para a embarcação de lançamento de linhas rígidas. Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	13
Figura 7: <i>Risers</i> rígidos assentando nos carretéis. Fonte: Tecnhip FMC .....	13
Figura 8: Camadas do Pré-Sal. Fonte: Petrobrás .....	15
Figura 9: Comparativo entre a produção pós-sal e o pré-sal. Fonte: Petrobrás	16
Figura 10: Quantidade da média de barris de petróleo extraído por dia no Brasil até 2018. Fonte: Petrobrás.....	16
Figura 11: Camadas estruturais de um <i>riser</i> flexível. Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	17
Figura 12: Camadas usuais de um <i>riser</i> rígido. Fonte: (Salgado et al., 2016)....	18
Figura 13: Método de instalação <i>Reel-Lay</i> . Fonte: (Charnaux, 2008): .....	19
Figura 14: Embarcação <i>Seven Vega</i> de lançamento <i>Reel-Lay</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	19
Figura 15: (a) Enrolamento da linha no carretel, (b) desenrolamento da linha do carretel em direção ao <i>aligner</i> , (c) Curvamento da linha sobre o <i>aligner</i> , (d) Retificação da linha no <i>straightener</i> , (e) Lançamento da linha. Fonte: (Charnaux, 2008) .....	21
Figura 16: Principais equipamentos envolvidos no enrolamento, desenrolamento e lançamento de <i>risers</i> rígidos no <i>Seven Oceans</i> . Fonte: Adaptado <i>Subsea 7</i> .....	22
Figura 17: (a) Torre principal do PLSV <i>Seven Cruzeiro</i> , (b) detalhe das lagartas. Fonte: Própria:.....	22
Figura 18: <i>Straightener</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> : .....	23
Figura 19: Processo de enrolamento das <i>risers</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	24
Figura 20: Caminho percorrido pelo <i>riser</i> durante o enrolamento. Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	24
Figura 21: Enrolamento de um <i>riser</i> na embarcação <i>Skandi Navica</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	24
Figura 22: Seções deformadas plasticamente e elasticamente. Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	28
Figura 23: <i>Riser</i> rígido: (a) antes e, (b) depois da curvatura. Fonte: (Kenedi, 2021) .....	28
Figura 24: Ovalização de uma seção circular. Fonte: (Ming Ju, 2021) .....	29
Figura 25: Simulação de flambagem localizada. Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	30

Figura 26: Geometria da seção transversal de um riser rígido . Fonte: (Kenedi, 2021) .....	30
Figura 27: Núcleo elástico. Fonte: Adaptado (Kenedi, 2021) .....	32
Figura 28: Gráfico $M(\rho)$ vs $1/\rho$ , normalizado, para um <i>riser</i> rígido. Fonte: (Kenedi, 2021) .....	33
Figura 29: (a) <i>Reeling head</i> , (b) <i>reeling pocket</i> do <i>Seven Vega</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	34
Figura 30: Gráfico tensão vs deformação da seção transversal de um <i>riser</i> rígido de material ECE, com o carregamento e o descarregamento, para dois pontos – (a) extradorso e (b) intradorso. Fonte: (Kenedi, 2021) .....	35
Figura 31: Distribuição de tensões na seção transversal de um <i>riser</i> rígido: (a) carregamento, (b) <i>back tension</i> , (c) <i>springback</i> , (d) tensões residuais .....	35
Figura 32: Foto da embarcação <i>Seven Vega</i> . Fonte: <i>Subsea 7</i> .....	37
Figura 33: Desenho esquemático do carretel de transporte de <i>riser</i> . (Fonte; Adaptada Cho, Joo, Cho, & Moon, 2017).....	38
Figura 34: Dimensões da seção transversal do <i>riser</i> rígido feito do material API 5L X65. Fonte: Própria .....	38
Figura 35: Momento no <i>riser</i> rígido em função do raio de curvatura aplicado. (Fonte: Própria) .....	40
Figura 36: Distribuição na seção transversal de tensões de flexão do carregamento aplicado ao <i>riser</i> rígido. (Fonte: Própria) .....	40
Figura 37: Distribuição na seção transversal de tensões provenientes do carregamento de tração aplicado ao <i>riser</i> rígido. (Fonte: Própria).....	41
Figura 38: Distribuição na seção transversal de tensões provenientes do carregamento de flexão e tração aplicados ao <i>riser</i> rígido. (Fonte: Própria) ....	41
Figura 39: Tensões de <i>springback</i> na seção transversal do <i>riser</i> rígido. (Fonte: Própria).....	42
Figura 40: Distribuição na seção transversal das tensões residuais no <i>riser</i> rígido. (Fonte: Própria).....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Ranking dos maiores produtores de petróleo em 2017. ....</b>	<b>11</b>
<b>Tabela 2: Dados das embarcações de lançamento de linhas rígidas da Subsea 7. ....</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 3: Informações sobre o tubo de aço API 5L X65. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabela 4: Capacidade de transporte, em toneladas e em quilômetros, de riser rígido das embarcações de Rigid Pipelay da Subsea 7. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabela 5: Composição química do aço API 5L X65. ....</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 6: Propriedades dos elementos de liga nos aços. ....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 7: Propriedades Mecânicas dos aços API. ....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 8: Parâmetros do carretel da embarcação Seven Vega. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 9: Parâmetros do tubo. ....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 10: Parâmetros do API 5L X65. ....</b>	<b>39</b>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	8
1.1	HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL.....	10
1.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	12
1.3	OBJETIVO .....	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	PRÉ SAL E A INDUSTRIA PETROLÍFERA <i>OFFSHORE</i> .....	15
2.2	<i>RISERS</i> .....	16
2.2.1.	<i>Riser</i> Flexível.....	17
2.2.2.	<i>Riser</i> Rígido .....	18
2.3	LANÇAMENTO <i>REEL-LAY</i> E <i>REEL LAY VESSELS</i> .....	18
2.4	<i>ENROLAMENTO</i> , DESENROLAMENTO E LANÇAMENTO .....	20
2.5	EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS NA OPERAÇÃO DE <i>ENROLAMENTO</i> ..	21
2.5.1.	Tensionadores.....	22
2.5.2.	<i>Aligner</i> .....	22
2.5.3.	<i>Straightener</i> .....	23
2.5.4.	Carretel.....	23
2.6.	MATERIAIS UTILIZADOS E PROPRIEDADES .....	25
2.6.1.	Aços ABRL.....	25
2.6.2.	API e Norma API 5L .....	25
2.6.3.	Aço 5L X65 .....	25
3.	PROCESSO DE ENROLAMENTO .....	28
3.1.	DEFORMAÇÕES LONGITUDINAIS DURANTE O ENROLAMENTO .....	28
3.2.	OVALIZAÇÃO E FLAMBAGEM LOCALIZADA.....	29
3.3.	MOMENTOS FLETORES EM <i>RISERS</i> RÍGIDOS .....	30
3.4	ESTIMATIVA DA CARGA AXIAL DURANTE O ENROLAMENTO ( <i>BACK TENSION</i> ).....	34
3.5	TENSÕES DE CARREGAMENTO, DE <i>SPRINGBACK</i> E RESIDUAIS.....	35
4.	ESTUDO DE CASO .....	37
4.1.	DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS .....	39
4.2.	CARREGAMENTO DE FLEXÃO .....	40
4.3.	CARREGAMENTO DE TRAÇÃO .....	41
4.4.	SOMATÓRIO DOS CARREGAMENTOS.....	41

4.5. SPRINGBACK.....	42
4.6. TENSÃO RESIDUAL.....	42
5. CONCLUSÃO.....	44
BIBLIOGRAFIA .....	45
APÊNDICE A - Desenvolvimentos no Software <i>Mathcad</i> .....	48

## 1. INTRODUÇÃO

Energia vem da palavra grega *energeia*, que quer dizer “força em ação”. Existem milhares de fontes diferentes de energia encontradas na natureza. (Jorge Luis Moretti de Souza, 2018)

Ao longo dos anos e da evolução das sociedades foram utilizados diferentes tipos de matrizes energéticas que serviram de combustível para impulsionar o desenvolvimento econômico de grandes potências e foram de extrema importância para marcos, como a Revolução Industrial. A **Figura 1** mostra o uso e a evolução das diferentes matrizes energéticas no mundo nos últimos 150 anos.

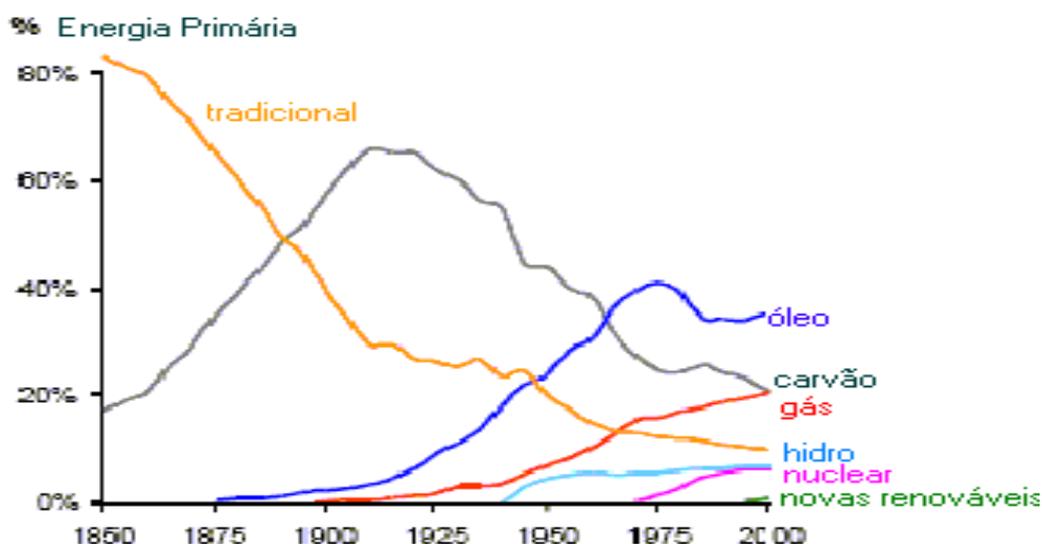


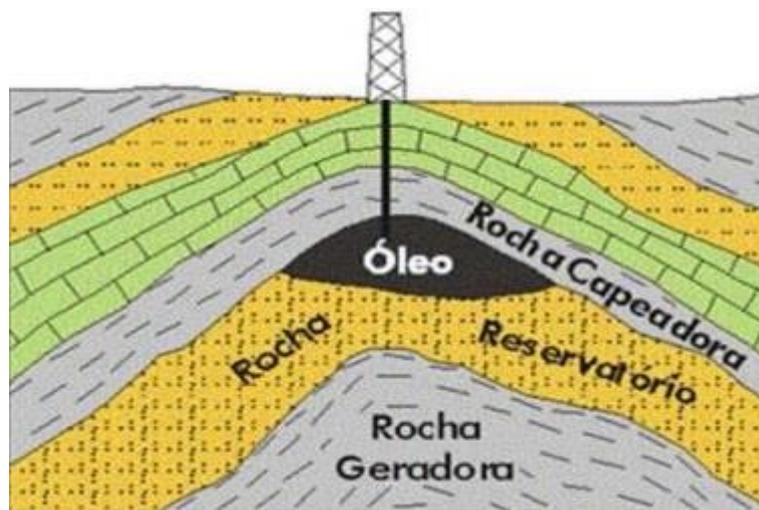
Figura 1: Evolução do consumo das matrizes energéticas no Brasil ao longo dos anos. Fonte:(Menezes,2005)

A **Figura 1** mostra o aumento no consumo de óleo e gás a partir de meados dos anos 20 e a diminuição do uso de carvão devido principalmente a questões ambientais, além do recente surgimento de novos tipos de energia como nuclear e renováveis.

O petróleo é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água que se formou através da decomposição de seres, ao longo de milhões de anos, no fundo de mares e lagos. O petróleo após formado desloca-se para um terreno apropriado para se alojar ocupando os poros rochosos, acumulando-se e formando jazidas. Estes terrenos são as Bacias sedimentares que são formadas por camadas ou lençóis porosos de areia, arenitos ou calcários. Na parte mais

alta da bacia é possível encontrar o gás natural e petróleo e água nas partes mais baixas. (FEM, 2021).

A **Figura 2** apresenta, de forma simplificada, a formação de hidrocarbonetos.



**Figura 2: Formação de Hidrocarbonetos. Fonte: (W. Teixeira et al., 2000)**

A indústria petrolífera é uma das mais importantes do mundo, visto que todas as sociedades modernas ainda apresentam dependência do petróleo. No ano de 2016 foram produzidos no mundo inteiro mais de 80 milhões de barris de petróleo por dia. Esses números foram evoluindo ao longo dos anos de exploração do petróleo e foram alcançados devido a evolução do setor de extração. (Petróleo, 2017)

A produção de petróleo pode ocorrer de dois modos: *offshore* (no mar) e *onshore* (na terra). Na produção *offshore*, plataformas em alto mar são fixadas e utiliza-se equipamentos *subsea* para trazer o petróleo dos poços, no solo marinho, até as plataformas. Já na produção *onshore* é usado um sistema de bombeio mecânico com uma vareta de sucção para remover o petróleo das jazidas e trazê-lo a superfície. (CBIE, 2020).

A **Figura 3** apresenta, de forma esquemática, os dois tipos de exploração de petróleo.

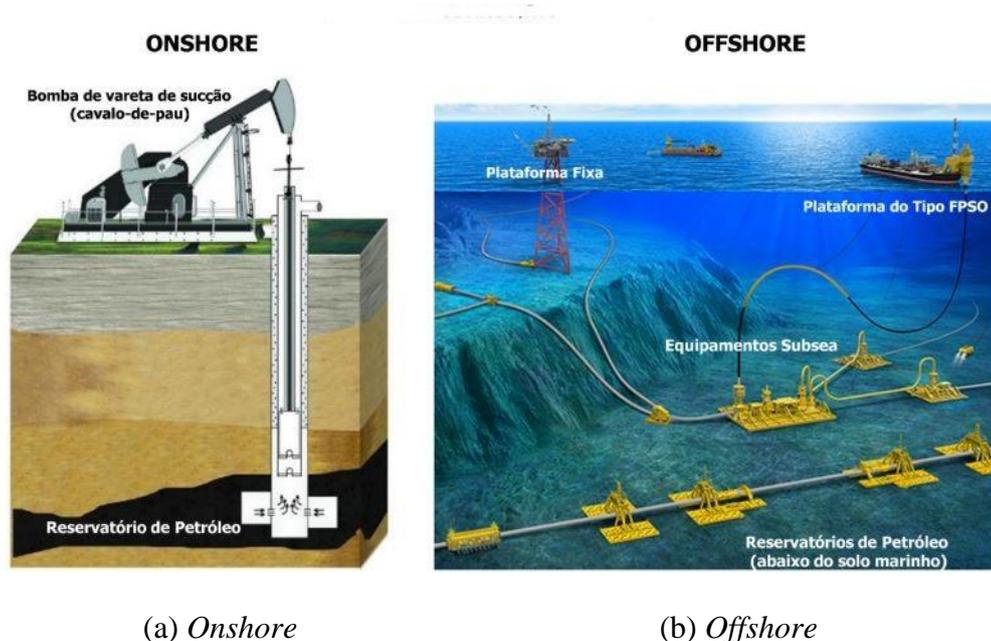


Figura 3: Tipos de exploração de petróleo. (a) *Onshore* e (b) *Offshore*. Fonte: CBIE

## 1.1 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL

Com base no discurso de que o “Petróleo é nosso” dos anos 50, no Brasil foi criada a Petrobrás que possuía como objetivo tornar o país autossuficiente e até mesmo exportador de petróleo. (Globo, 2013).

A história da indústria petrolífera do Brasil se confunde com a criação da Petrobrás, em 1953. Hoje, o Brasil encontra-se no ranking dos maiores produtores de petróleo do mundo. Até isso ocorrer foi preciso houvesse um aumento da capacitação de recursos humanos, injeção de capital, crises internacionais e a criação de políticas que organizaram e priorizavam o petróleo para o desenvolvimento dos pais. (Oliveira et al., 2016).

Segundo (Petrobrás, 2021) a maior parte das reservas de petróleo encontra-se em campos marítimos, com isso as atividades de perfuração atingem profundidades cada vez maiores.

A **Figura 4** mostra os campos mais produtivos do Brasil com base nos valores de junho de 2011.

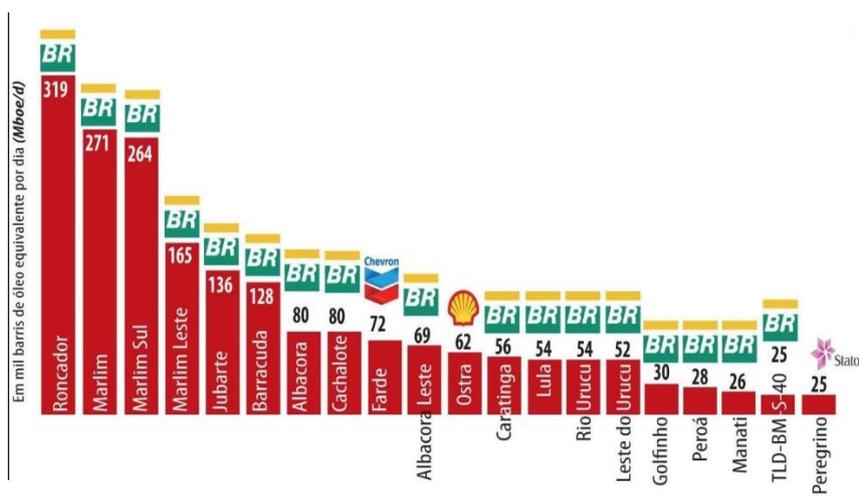


Figura 4: Campos mais produtivos do Brasil - junho de 2011. Fonte: ANP/SDP/SIGEP

O Brasil ocupava em 2017 a décima posição no ranking global de produção de petróleo, uma grande ascensão uma vez que durante a década de 80 e 90 ainda estava longe deste patamar. Tal crescimento se justifica com o descobrimento e a exploração das jazidas sob a camada de Pré-Sal, nas águas profundas das bacias de Santos e de Campos. (CBIE, 2019).

A **Tabela 1** apresenta o ranking dos 15 maiores produtores de petróleo do mundo em 2017.

Tabela 1: Ranking dos maiores produtores de petróleo em 2017.

Ranking	País	2017
1	Estados Unidos	13.057
2	Arábia Saudita	11.951
3	Rússia	11.257
4	Irã	4.982
5	Canadá	4.831
6	Iraque	4.520
7	Emirados Árabes Unidos (EAU)	3.935
8	China	3.846
9	Kuwait	3.025
10	Brasil	2.734
11	México	2.224
12	Venezuela	2.110
13	Nigéria	1.988
14	Noruega	1.969
15	Qatar	1.916

Fonte: BP Statistical Review (2018)

Com o desenvolvimento de vários projetos em blocos do Pré-Sal é possível que o Brasil esteja em 2030 entre os cinco maiores produtores do mundo. (CBIE, 2019)

## 1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para exploração do petróleo em águas profundas e ultra profundas, pode-se utilizar os *risers* rígidos, que são tubos de aço formados por uma série de juntas soldadas e que são resistentes aos carregamentos impostos. (LEÃO et al., 2014).

Os *Risers* rígidos podem possuir grandes comprimentos e são geralmente fabricados em lugares denominados *spoolbases*.

*Spoolbase* é uma instalação que permite que longos comprimentos de tubos sejam soldados antes que este seja transportado para a embarcação de instalação. Esse tipo de instalação possui todos os requisitos necessários para que esse tipo de operação de soldagem e manuseio de quilômetros de tubo seja realizada e se localizam próximos do mar. (Enginoor, 2018). A **Figura 5** mostra um exemplo de uma *spoolbase*.



**Figura 5: Spoolbase de Ubu (ES). Fonte: Subsea 7**

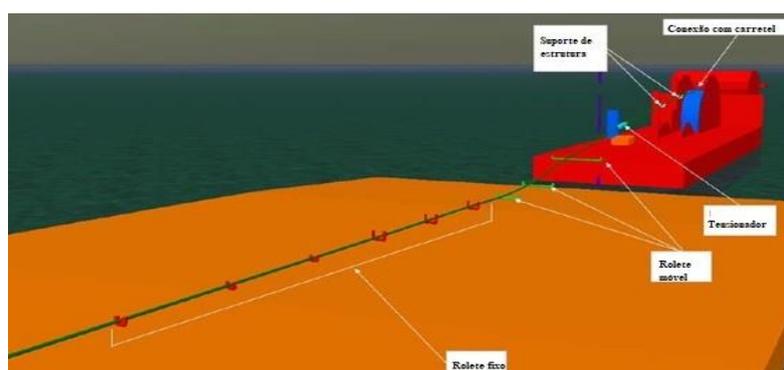
A **Tabela 2** apresenta dados das embarcações de lançamento de *risers* rígidos da Subsea 7.

**Tabela 2: Dados das embarcações de lançamento de linhas rígidas da *Subsea 7*.**

Navio	Comprimento (m)	Largura (m)
<i>Seven Vega</i>	149	33
<i>Seven Oceans</i>	157	28
<i>Seven Navica</i>	109	22
<i>Seven Champion</i>	142	40
<i>Seven Borealis</i>	182	46

Fonte: *Subsea 7*

Foi desenvolvido o sistema para carregar as embarcações de lançamento de linhas de *risers* rígidos. As linhas de *risers* rígidos são movimentados da *spoolbase* através de roletes passam pelo tensionador e são assentadas em torno do carretel, para que o transporte seja devidamente executado. A **Figura 6** mostra, de forma esquemática, o sistema de transporte da *spoolbase* para a execução do *spooling* (enrolamento do *riser*).



**Figura 6: Sistema de transporte *spoolbase* para a embarcação de lançamento de linhas rígidas. Fonte: *Subsea 7***

A **Figura 7** mostra *risers* rígidos durante o assentamento nos carretéis.



**Figura 7: *Risers* rígidos assentando nos carretéis. Fonte: Technip FMC**

Para que este enrolamento seja feito de forma organizada (o *riser* se assente de forma a formar camadas completas), há necessidade de além de curvar o *riser* em torno do carretel, seja aplicado um freio axial para que o *riser* esteja sempre tenso para um assentamento perfeito.

### 1.3 OBJETIVO

O foco principal desse projeto final é propor um modelo analítico que descreva as tensões residuais nas seções transversais de um *riser* rígido que são geradas no curvamento em torno de um carretel quando aplicadas uma combinação de cargas, de flexão e axial, para viabilizar o enrolamento ordenado no carretel para o seu transporte para instalações em alto mar

Para realizar o enrolamento do *riser* rígido ao redor do carretel é necessária uma combinação de momentos de flexão e de forças axiais para que o *riser* possa ficar devidamente assentado em carretéis de transporte. O modelo analítico é gerado a partir da aplicação de conhecimentos de Mecânica dos Sólidos, do uso do software *Mathcad* para gerar simulações e gráficos, além do estudo de normas, revisões bibliográficas e pesquisas acadêmicas sobre o tema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

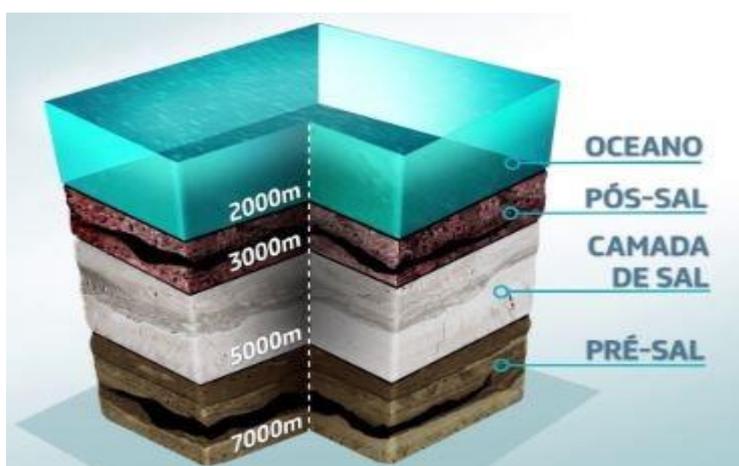
Este capítulo aborda a indústria petrolífera *offshore*, os diferentes tipos de *risers*, métodos e embarcações de lançamento de *risers* rígidos, a metodologia de transporte dos *risers* rígidos para os locais de instalação e os principais equipamentos envolvidos nesse processo.

### 2.1 PRÉ SAL E A INDUSTRIA PETROLÍFERA OFFSHORE

A exploração de petróleo inicia-se nas bacias sedimentares costeiras e progressivamente ocorre a migração para regiões mais distantes das faixas de terra em lâminas d'água profundas. (Oliveira, 2012)

O pré-sal é uma sequência de rochas sedimentares formadas há mais de 100 milhões de anos. À medida que os continentes foram se separando, os materiais orgânicos ali acumulados foram sendo cobertos pelas águas dos oceanos, iniciava-se ali a formação de uma camada de sal que depositou-se em cima da matéria orgânica retendo-a por milhões de anos, até que processos termoquímicos transformasse esta camada em hidrocarbonetos (petróleo e gás). (Petrobrás, 2021).

A **Figura 8** mostra, esquematicamente, as camadas presentes no pré-sal, bem como suas profundidades.



**Figura 8: Camadas do Pré-Sal. Fonte: Petrobrás**

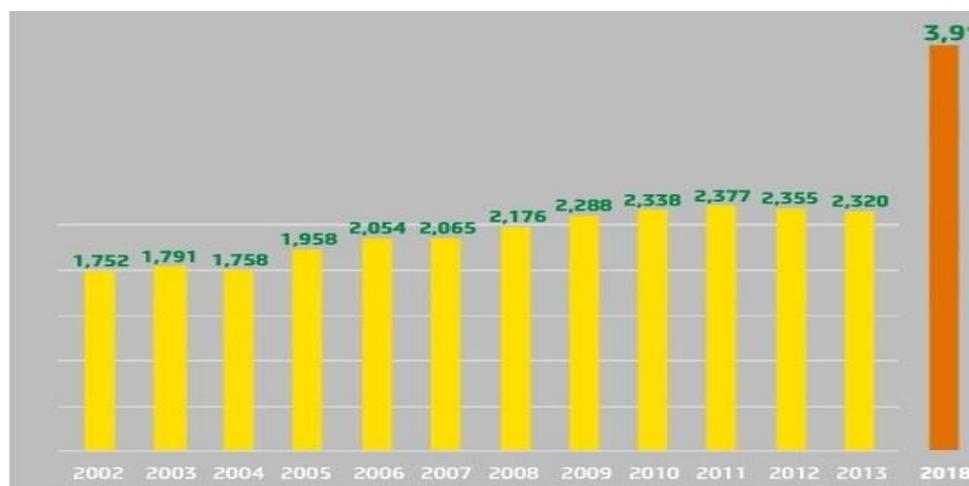
O desenvolvimento da extração do petróleo no pré-sal mostra grandes desafios para a indústria. Fornecedores domésticos de serviços e equipamentos vivem uma corrida para conseguir atender exigência cada vez maiores das empresas petrolíferas. (Oliveira, 2012)

A **Figura 9** apresenta os valores comparativos entre a quantidade de barris extraídos por quantidade de poços entre o período pós-sal e pré-sal.



**Figura 9:** Comparativo entre a produção pós-sal e o pré-sal. Fonte: Petrobrás

Com o pré-sal é evidente a crescente de produção de petróleo e gás do Brasil. A **Figura 10** mostra a média do valor de milhões de barris de petróleo extraído por dia, ao longo dos anos, em todo o país.



**Figura 10:** Quantidade da média de barris de petróleo extraído por dia no Brasil até 2018. Fonte: Petrobrás

## 2.2 RISERS

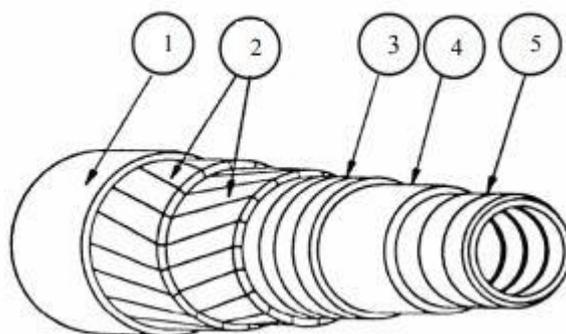
*Risers* são tubos de aço formados por uma série de juntas soldadas, ou rosqueadas. Em lâminas de água profundas, pode ser utilizado flutuadores para diminuir o seu peso aparente. Possuem grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão (Silva, 2011).

Os *risers* podem ser do tipo flexível ou rígido. Para a escolha do tipo de *riser* que será instalado é necessário além dos fatores técnicos avaliar o tipo de produto que será transportado, profundidade, presença de atmosfera de gases corrosivos, diâmetro, comprimento total entre outros fatores.

### 2.2.1. *Riser* Flexível

Os *risers* flexíveis são dutos especiais compostos por uma superposição de camadas plásticas, que fornecem estanqueidade interna e externa, e de camadas metálicas helicoidais, responsáveis pela resistência à ação dos diversos carregamentos mecânicos aos quais as linhas flexíveis estão submetidas ao longo da sua vida útil. Sua principal característica é a baixa rigidez à flexão. (Souza, 2019)

A **Figura 11** apresenta, de forma esquemática, as camadas que compõe a estrutura de um *riser* flexível.



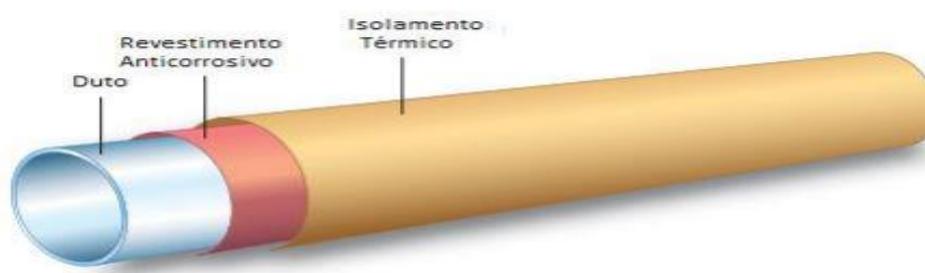
**Figura 11:** Camadas estruturais de um *riser* flexível. Fonte: *Subsea 7*

A camada número 1 é chamada de camada externa, a sua função é prover proteção as camadas internas do *riser*. A camada número 2 representa as armaduras de tração e são projetadas para a resistência axial exigida. A camada número 3 apresenta as camadas resistentes a pressão radial externa e são projetadas para a pressão requerida. A camada número 4 são as camadas responsáveis pelo isolamento térmico e vedação. A camada número 5 é a carcaça interna e ela leva em consideração aspectos como: fadiga; colapso para mínima pressão interna, máxima externa e máxima ovalização; corrosão; e cargas de expansão e/ou contração térmica. (Xavier, 2006)

### 2.2.2. Riser Rígido

Os *risers* rígidos são compostos de aço ou titânio e são largamente utilizados na exploração em águas profundas por possibilitar grandes diâmetros, operar com grandes pressões internas, além disso sua fabricação é mais simples e permite um manuseio mais fácil. (Vale, 2013). Estas estruturas possuem grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão. (Silva, 2011)

A **Figura 12** apresenta as camadas usuais de um *riser* rígido.



**Figura 12:** Camadas usuais de um *riser* rígido. Fonte: (Salgado et al., 2016)

O revestimento anticorrosivo externo isola o tubo de aço da água do mar e do solo. Possui como característica baixa permeabilidade a água, aos sais e ao oxigênio, boa aderência ao tubo de aço, flexibilidade, inerte, resistência a degradação e as tensões submetidas ao tubo. O isolamento térmico é fundamental para a manutenção da temperatura do fluido, minimizando a formação de hidratos, deposição de parafinas e o aumento da viscosidade de óleos pesados. (Salgado et al., 2016)

## 2.3 LANÇAMENTO REEL-LAY E REEL LAY VESSELS

O *Reel-Lay* é o método de lançamento em que o *riser* é soldado *onshore* e transportado em carretéis. A instalação é realizada sob um ângulo de 70° em relação ao leito marinho. É o procedimento mais rápido quando comparado aos outros métodos de lançamento de linhas rígidas. (Fachini, 2015).

A **Figura 13** mostra, de forma esquemática, o método de instalação *Reel-Lay*.

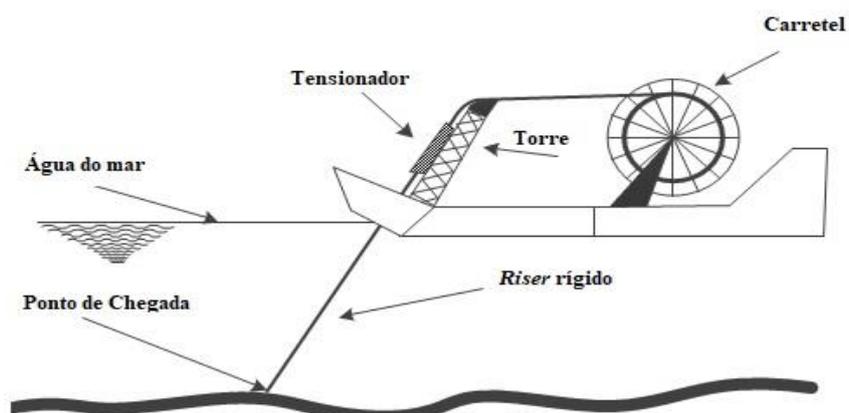


Figura 13: Método de instalação *Reel-Lay*. Fonte: (Charnaux, 2008):

A **Figura 14** apresenta a embarcação *Seven Vega* pertencente a frota da empresa *Subsea 7*, que realiza instalação de *risers* rígidos através do método *Reel-Lay* em profundidades superiores a 3000 m. (Subsea 7, 2021)



Figura 14: Embarcação *Seven Vega* de lançamento *Reel-Lay*. Fonte: *Subsea 7*

O método *Reel-Lay* possui como sua maior limitação o diâmetro máximo do tubo. Este método tem sido adotado para diâmetros de até 16 polegadas devido as características geométricas do carretel e para assegurar a integridade do *riser* e de seus revestimentos. (Mattos, 2012)

A **Tabela 3** apresenta o peso (kg) por metro de tubo e espessura (mm) da parede API 5L X65 de 8" com diâmetro interno de 205,2 mm, geralmente usado para *riser* rígidos de produção.

Tabela 3: Informações sobre o tubo de aço API 5L X65.

Norm. pol. (")	Diâmetro		Esp. Parede mm	Peso Kg/m	Denom. Conf. API 5L	Sched Nº
	Ext. mm	Int. mm				
8"	219,1	206,40	6,35	33,31	-	20
		205,02	7,04	36,81	-	30
		203,26	7,92	41,24	-	-
		202,74	8,18	42,55	STD	40
		198,48	10,31	53,08	-	60
		193,70	12,70	64,64	XS	80
		188,92	15,09	75,92	-	100
		182,58	18,26	90,44	-	120
		181,00	19,05	93,98	-	-
		177,86	20,62	100,92	-	140
		174,64	22,23	107,92	XXS	-
		173,08	23,01	111,27	-	160

Fonte: (Açotubo, 2021)

Para o cálculo de peso por quilômetro de tubo de aço é necessária a multiplicação da coluna do peso por 1000.

A **Tabela 4** mostra a capacidade em toneladas e sua autonomia de transporte em quilômetros de *riser* rígido das embarcações de *Rigid Pipelay* da frota da *Subsea 7*.

Tabela 4: Capacidade de transporte, em toneladas e em quilômetros, de *riser* rígido das embarcações de *Rigid Pipelay* da *Subsea 7*.

Navio	Capacidade de <i>risers</i> (Tf)	Quilômetros de <i>risers</i> comportados no carretel (km)
<i>Seven Borealis</i>	2800	76
<i>Seven Navica</i>	2200	59
<i>Seven Oceans</i>	3500	95
<i>Seven Vega</i>	5600	152

Fonte: Própria

## 2.4 ENROLAMENTO, DESENROLAMENTO E LANÇAMENTO

Segundo (Portas, 2017) enrolamento refere-se ao bobinamento de cabos. A operação de enrolamento, desenrolamento e lançamento são diferentes dependendo da embarcação que está executando a operação.

A **Figura 15** mostra esquematicamente, cada etapa necessária e os equipamentos envolvidos, que englobam as três operações.

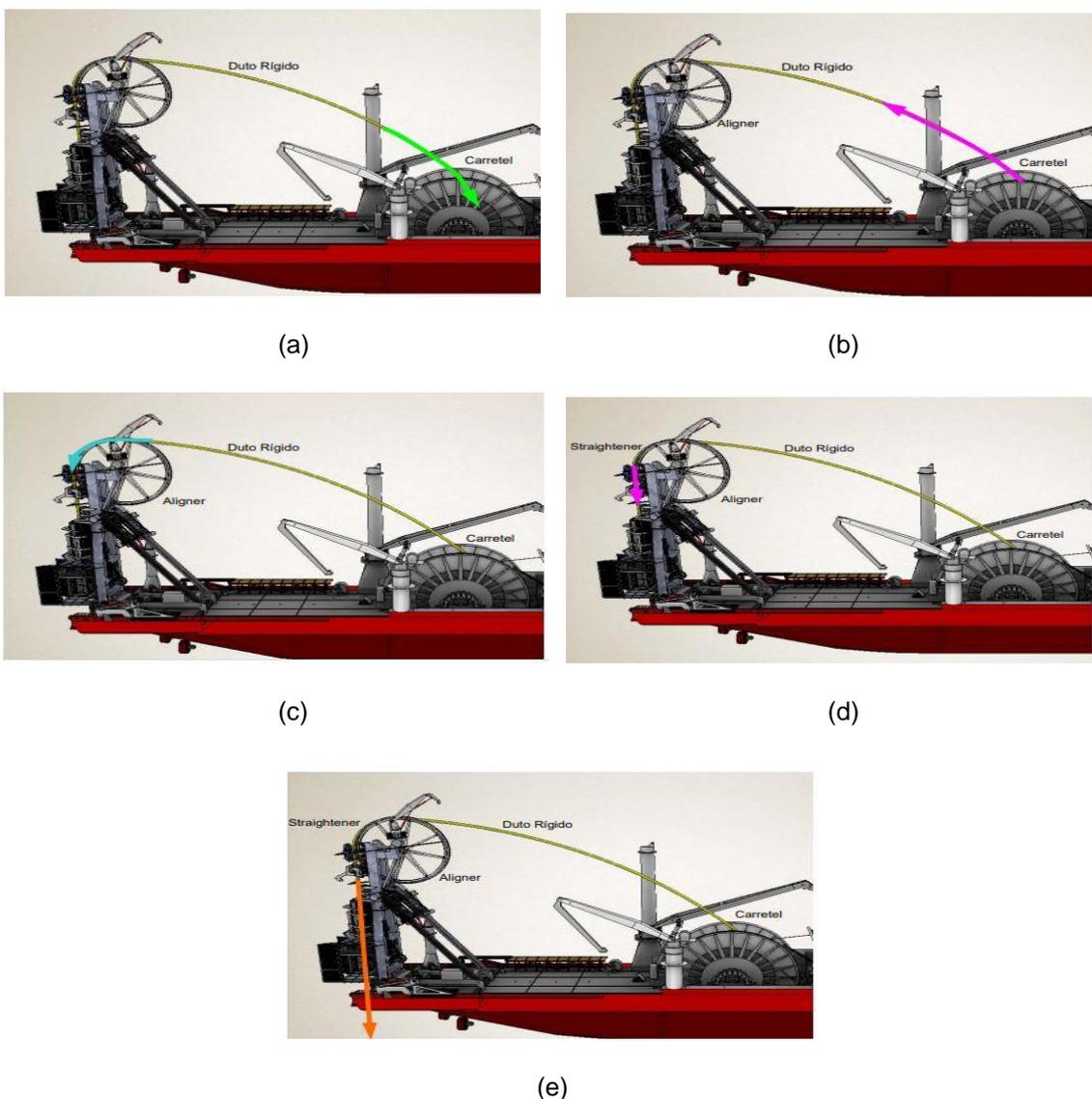


Figura 15: (a) Enrolamento da linha no carretel, (b) desenrolamento da linha do carretel em direção ao *aligner*, (c) Curvamento da linha sobre o *aligner*, (d) Retificação da linha no *straightener*, (e) Lançamento da linha. Fonte: (Charnaux, 2008)

## 2.5 EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS NA OPERAÇÃO DE ENROLAMENTO

A **Figura 16** mostra a embarcação *Seven Oceans* da frota *Subsea 7* e os principais equipamentos para o desenvolvimento do processo de enrolamento, desenrolamento e lançamento de linhas rígidas nesse navio.

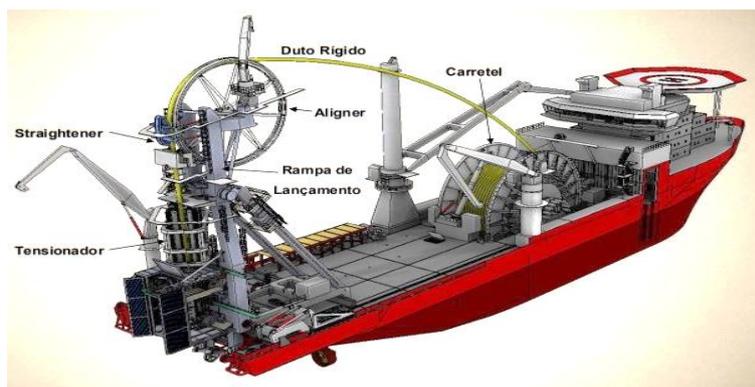


Figura 16: Principais equipamentos envolvidos no enrolamento, desenrolamento e lançamento de *risers* rígidos no *Seven Oceans*. Fonte: Adaptado *Subsea 7*

### 2.5.1. Tensionadores

Os tensionadores são responsáveis por suportar toda a carga durante o recolhimento da linha no processo de enrolamento. Os tensionadores são formados por “lagartas”, que possuem como função pressionar a linha uniformemente de forma a gerar o atrito necessário para suportar o *riser* durante a operação de lançamento. O tensionador vertical fica localizado dentro da torre principal da embarcação. A **Figura 17** apresenta a torre principal do PLSV *Seven Cruzeiro*.



(a)

(b)

Figura 17: (a) Torre principal do PLSV *Seven Cruzeiro*, (b) detalhe das lagartas. Fonte: Própria,

### 2.5.2. Aligner

O *aligner* é uma polia, onde o *riser* rígido sofre uma mudança de direção saindo da rampa de lançamento para o carretel. Este equipamento impõe

deformações plásticas ao *riser* durante o processo de enrolamento e de desenrolamento. (Charnaux, 2008)

### 2.5.3. *Straightener*

É o equipamento cuja finalidade é retornar o *riser* a sua condição de linearidade inicial. Durante o processo de enrolamento, o *riser* plastifica-se e quando ocorre o desenrolamento ele não retorna a sua condição inicial visto que parte da sua seção transversal escoou. O *straightener* aplica deformações no *riser* de forma a mitigar as deformações residuais existentes. (Charnaux, 2008). A **Figura 18** mostra o *straightener*.



**Figura 18: *Straightener*. Fonte: Subsea 7.**

### 2.5.4. Carretel

O Carretel é responsável por armazenar o *riser* rígido durante o transporte até o local de lançamento. Usualmente para o transporte de linhas rígidas, os carretéis possuem grandes diâmetros internos para que a deformação plástica durante o enrolamento não seja excessiva. (Charnaux, 2008).

A **Figura 19** mostra o carretel durante o processo de enrolamento do *riser*.



Figura 19: Processo de enrolamento das *risers*. Fonte: *Subsea 7*

A **Figura 20** mostra o caminho percorrido pelo *riser* durante o enrolamento.

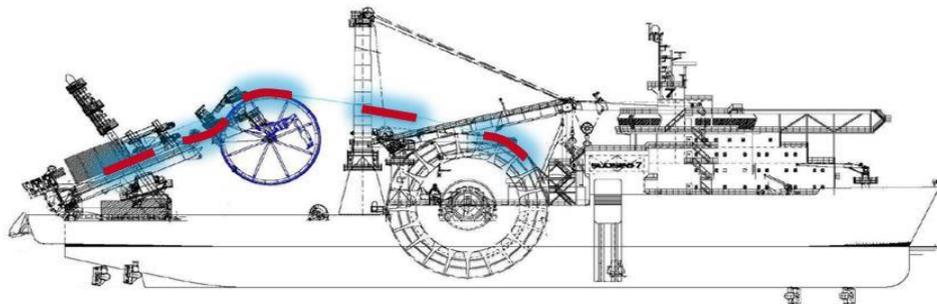


Figura 20: Caminho percorrido pelo *riser* durante o enrolamento. Fonte: *Subsea 7*

A **Figura 21** mostra a operação de enrolamento com a rampa em uma angulação mínima permitida durante o processo.



Figura 21: Enrolamento de um *riser* na embarcação *Skandi Navica*. Fonte: *Subsea 7*

## 2.6. MATERIAIS UTILIZADOS E PROPRIEDADES

### 2.6.1. Aços ABRL

Os aços classificados como alta resistência e baixa liga (ARBL) são aços que possuem baixo teor de carbono, inferior a 0,3%, e baixo teor de liga. Tem boa resistência mecânica, boa soldabilidade e tenacidade. Estes fatores se destacam para que esses aços sejam adotados em tubulações de longos trechos. (Morilla, 2012)

### 2.6.2. API e Norma API 5L

A *American Petroleum Institute* (API) é uma empresa centenária no ramo de petróleo e gás. É responsável pela criação e estabelecimento de normas para melhorar a segurança das operações industriais, assegurar a qualidade e ajudar a manter os custos baixos. (Institute, 2021). A Norma *API 5L Specification for Line Pipe* trata de tubulações na indústria de petróleo e reforça a adoção dos aços ARBL. (Morilla, 2012). Essa norma classifica os aços empregados na fabricação de *risers* com base em sua composição química e resistência mecânica.

### 2.6.3. Aço 5L X65

O Aço 5L X65 é um aço oriundo da Norma API 5L. É amplamente utilizado na indústria de petróleo e gás para a fabricação de *risers* rígidos devido as suas características.

A composição química do aço API 5L X65 encontra-se na **Tabela 5**.

**Tabela 5: Composição química do aço API 5L X65**

C	Mn	P	S	Si	V	Nb	Ti
0,16	1,65	0,020	0,010	0,45	0,09	0,05	0,06

**Fonte: PM International Suppliers**

A presença de carbono (C) e de manganês (Mn) aumenta a resistência e a temperabilidade do aço. O fósforo (P) e o enxofre (S) são considerados como impurezas e em grandes quantidades podem causar fragilidade e reduzir

soldabilidade. O vanádio (V) é responsável por restringir o tamanho de grão, visto que quando maior o tamanho de grão menor a resistência do material aumenta a tenacidade à fratura e a resistência a choques. O nióbio (Nb) atua aumentando a resistência ao escoamento. O silício (Si) é utilizado para aumentar a resistência e a dureza, porém é menos eficaz que o manganês.

A **Tabela 6** mostra um resumo de alguns dos principais elementos de liga e suas principais propriedades.

**Tabela 6: Propriedades dos elementos de liga nos aços.**

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	●	●	●		●				●	
Aumento da Dureza	●	●	●		●					
Aumento da Resistência ao Impacto						●				
Redução da ductilidade	●		●	●						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								●		
Aumento da Temperabilidade							●	●		
Ação Desoxidante		●			●					●
Aumento da Resistência à Corrosão							●			
Aumento da Resistência à Abrasão							●			
Redução da Soldabilidade	●									

Fonte: Aços Nobre

Os aços API 5L possuem como característica, que é de supra importância para sua aplicação, a boa soldabilidade e a resistência mecânica. Essas características podem ser devidamente avaliadas a partir da obtenção do valor de carbono equivalente do aço. A equação (1) apresenta o cálculo da porcentagem de carbono equivalente, segundo o *Internacional Institute of Welding*.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

Quanto maior o carbono equivalente menor a soldabilidade do aço. Na norma, são definidos os valores máximos de carbono equivalente. São eles,

0,43% para aços que possuam  $C > 0,12\%$  e 0,25% para aços que possuam  $C \leq 0,12\%$ . A **Tabela 7** mostra as propriedades mecânicas dos aços API.

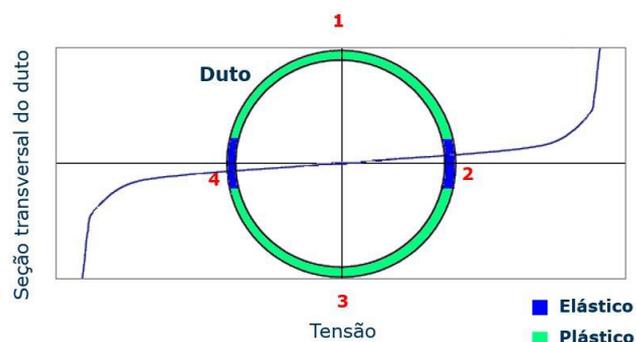
**Tabela 7: Propriedades Mecânicas dos aços API**

Grau	Resistência ao Escoamento Mínimo		Resistência ao Escoamento Máximo		Resistência à Tração Mínimo		Resistência à Tração Máximo	
	kSI	MPa	kSI	MPa	kSI	MPa	PSI	MPa
B	35	241	65	448	60	414	110	758
X42	42	290	72	496	60	414	110	758
X46	46	317	76	524	63	434	110	758
X52	52	359	77	531	66	455	110	758
X56	56	386	79	544	71	490	110	758
X60	60	414	82	561	75	517	110	758
X65	65	448	87	600	77	531	110	758
X70	70	483	90	621	82	565	110	758
X80	80	552	100	690	90	621	120	827

(Fonte: Adaptado de API 5L, 2000)

### 3. PROCESSO DE ENROLAMENTO

Quando ocorre o enrolamento do riser, este está sujeito a flexão produzida pelo curvamento na superfície do carretel, que sofrerá deformações crescentes até atingir o raio de curvatura do carretel. Neste instante, como mostrado, esquematicamente, na **Figura 22**, o riser nas regiões 1 e 3 apresentam, respectivamente, deformações plásticas compressivas e trativas, supondo o carretel em contato com um ponto da região 1. (Charnaux, 2008)

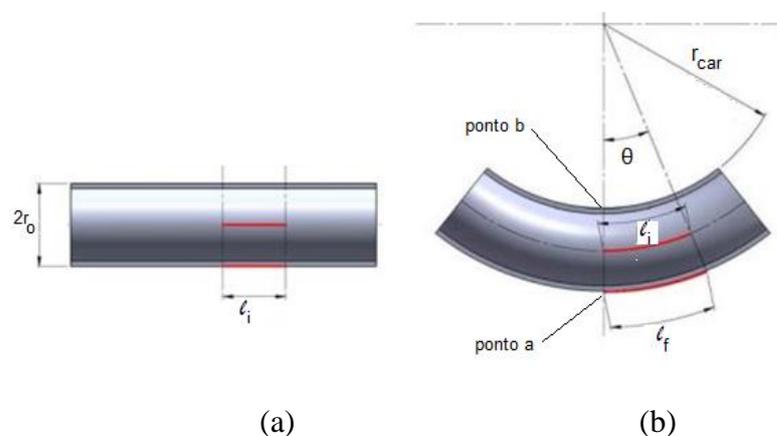


**Figura 22: Seções deformadas elasticamente e plasticamente. Fonte: Subsea 7**

É importante ressaltar que durante o enrolamento a rampa deve estar inclinada de forma a evitar um ciclo adicional de deformação no *aligner*.

#### 3.1. DEFORMAÇÕES LONGITUDINAIS DURANTE O ENROLAMENTO

O cálculo da deformação longitudinal utiliza a hipótese de pequenas deformações lineares, conforme mostrado na **Figura 23**.



**Figura 23: Riser rígido: (a) antes e, (b) depois da curvatura. Fonte: (Kenedi, 2021)**

A expressão da deformação longitudinal no extradorso pode ser obtida:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_i} = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\theta \cdot (r_{car} + 2r_o) - \theta \cdot (r_{car} + r_o)}{\theta \cdot (r_{car} + 2r_o)} \quad (2)$$

Onde,  $\theta$  é o ângulo de abertura do arco (vide **Figura 23**);  $r_{car}$  é o raio interno do carretel. Ou ainda:

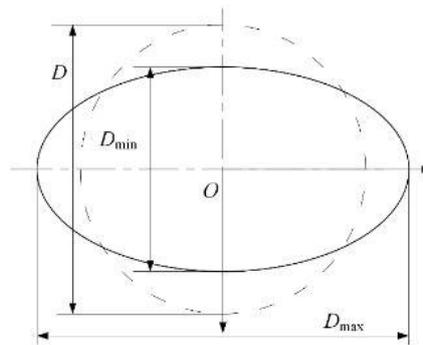
$$\varepsilon = \frac{r_o}{(r_{car} + r_o)} = \frac{D_{ext}}{(D_{car} + D_o)} \quad (3)$$

Onde,  $D_{ext}$  é o diâmetro externo do *riser*, e  $D_{car}$  é o diâmetro do carretel.

### 3.2. OVALIZAÇÃO E FLAMBAGEM LOCALIZADA

O fenômeno de ovalização ocorre durante a deformação da tubulação fazendo com que a seção transversal mude gradualmente de circular para um formato elíptico. A distribuição de deformação não uniforme na seção do tubo na direção circunferencial leva a ovalização do tubo. (Ming Ju, 2021)

A **Figura 24** mostra, de forma esquemática, o conceito de ovalização.

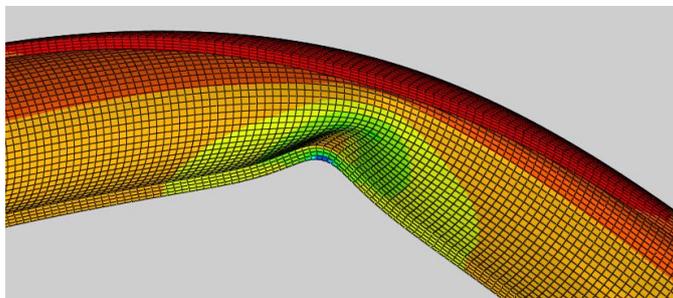


**Figura 24: Ovalização de uma seção circular. Fonte: (Ming Ju, 2021)**

A norma Det Norske Veritas de número OS-F101 estipula o nível de ovalização permitida ao *riser*:

$$\frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{D} < 3\% \quad (4)$$

A tensão axial tem um importante papel no efeito de ovalização dos tubos durante o processo de enrolamento. No limite, a ovalização de uma seção transversal do *riser* pode evoluir para a flambagem localizada, como mostra a **Figura 25**, em uma simulação do software ABAQUS.

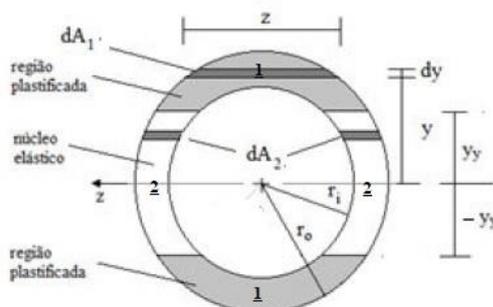


**Figura 25:** Simulação de flambagem localizada. Fonte: *Subsea 7*

A flambagem localizada pode ser minimizada a partir do tracionamento do *riser* que é realizado pelo tensionador. A aplicação de uma força de tração durante o processo de enrolamento diminui a tensão compressiva no intradorso e conseqüentemente pode contribuir para evitar a ocorrência da flambagem localizada. Além disso a tração é fundamental para proporcionar um ajuste adequado da curvatura do tubo a curvatura do carretel.

### 3.3. MOMENTOS FLETORES EM *RISERS* RÍGIDOS

A geometria do *riser* rígido é fundamental para a realização dos cálculos dos momentos aplicados durante o processo de enrolamento, conforme mostra a **Figura 26**.



**Figura 26:** Geometria da seção transversal de um *riser* rígido. Fonte: (Kenedi, 2021)

A área da região “1” pode ser calculada:

$$dA_1 = 2 \cdot \sqrt{r_o^2 - y^2} dy \quad (5)$$

A área da região “2” pode ser calculada:

$$dA_2 = 2 \cdot [(\sqrt{r_o^2 - y^2}) - (\sqrt{r_i^2 - y^2})] dy \quad (6)$$

O momento fletor para a região “1” pode ser calculada:

$$M_1(\rho) = 2 \int_{r_i}^{r_o} y \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] dA_1 \quad (7)$$

Onde  $r_i$  e  $r_o$  são respectivamente, os raios interno e externo da seção transversal do *riser*,  $y$  é uma distância vertical.  $S_y$  é resistência ao escoamento,  $\varepsilon_y$  é a deformação de escoamento,  $\rho$  é o raio de curvatura (do centro do carretel ao centro da seção transversal do *riser*),  $E_t$  é o módulo tangente (a inclinação da parte plástica do modelo de material bi-linear).

A região “1” encontra-se numa área totalmente plastificada logo somente o termo plástico compõe o equacionamento do momento fletor. Já a região “2” está localizada na região elastoplástica do tubo, logo seu equacionamento terá composição de parcela elástica e plástica. O material foi modelado como elástico com encruamento (ou material ECE).

O momento fletor para a região “2” pode ser calculado:

$$M_2(\rho) = 2 \left[ \int_0^{y_y(\rho)} y \left( \frac{y}{y_y} \right) S_y dA_2 + \int_{y_y(\rho)}^{r_i} y \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] dA_2 \right] \quad (8)$$

Onde  $y_y(\rho)$  é a fronteira elastoplástica em função do raio de curvatura imposto. O momento total aplicado no tubo será o somatório das equações 7 e 8.

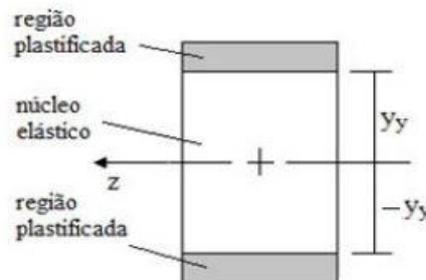
$$M(\rho) = M_1(\rho) + M_2(\rho) \quad (9)$$

Em casos que o  $M(\rho)$  for menor do que o valor de  $M_y$  (momento fletor que provoca o início de do escoamento da seção transversal) o *riser* ficará na sua fase elástica.

O raio de curvatura que é necessário impor ao *riser* rígido para gerar um momento elástico é:

$$\rho_y = \frac{E I}{M_y} \quad (10)$$

Onde,  $I$  é o momento de inércia de área do *riser*,  $M_y$  é o momento elástico e  $E$  é o módulo de elasticidade. O núcleo elástico é o local onde não há deformações plásticas ocorrendo. Onde  $\rho_y$  é o valor do raio de curvatura que começa a escoar a seção transversal do *riser*. Na metade da altura deste núcleo elástico encontra-se a fronteira elastoplástica  $y_y$ , local onde ocorre a transição entre a região elástica para a região plástica conforme **Figura 27**.



**Figura 27: Núcleo elástico. Fonte: Adaptado (Kenedi, 2021)**

Quando a seção transversal do *riser* rígido estiver escoando, tem-se:  $y_y = \varepsilon_y \cdot \rho$ , para  $M_y \leq M(\rho) < M_p$ . Quando o *riser* rígido se encontra praticamente todo plastificado tem-se:  $y_y \approx 0$ , para  $M_p \approx M(\rho)$ .

O momento elástico  $M_y$  pode ser definido como:

$$M_y = 2 \left[ \int_0^{r_i} y \cdot \left(\frac{y}{r_o}\right) \cdot S_y \cdot 2 \cdot \left[ \left(\sqrt{r_o^2 - y^2}\right) - \left(\sqrt{r_i^2 - y^2}\right) \right] dy + \int_{r_i}^{r_o} y \cdot \left(\frac{y}{r_o}\right) \cdot S_y \cdot 2 \cdot \left[ \left(\sqrt{r_o^2 - y^2}\right) \right] dy \right] \quad (11)$$

O momento plástico pode ser definido como:

$$M_p = 2 \left[ \int_0^{r_i} y \cdot \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left[ \left( \sqrt{r_o^2 - y^2} \right) - \left( \sqrt{r_i^2 - y^2} \right) \right] dy + \int_{r_i}^{r_o} y \cdot \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left[ \left( \sqrt{r_o^2 - y^2} \right) \right] dy \right] \quad (12)$$

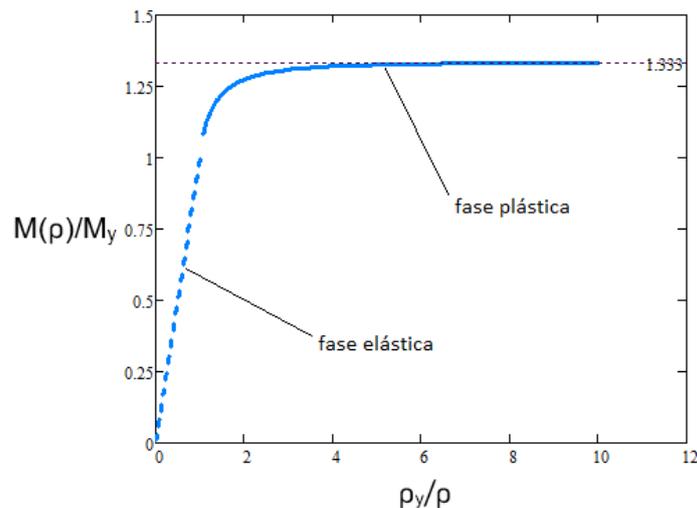
Para um raio de curvatura  $\rho$  menor que  $\rho_y$ , e a fronteira elastoplástica  $y$  encontra-se entre a linha neutra e o  $r_i$ , onde o momento imposto é dado por:

$$M(\rho) = 2 \left[ \int_0^{\rho \cdot \varepsilon_y} y \left[ S_y \cdot \frac{y}{(\rho \cdot \varepsilon_y)} \right] \cdot 2 \cdot \left[ \left( \sqrt{r_o^2 - y^2} \right) - \left( \sqrt{r_i^2 - y^2} \right) \right] dy + \int_{\rho \cdot \varepsilon_y}^{r_i} y \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left[ \left( \sqrt{r_o^2 - y^2} \right) - \left( \sqrt{r_i^2 - y^2} \right) \right] dy + \int_{r_i}^{r_o} y \left[ S_y + E_t \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] 2 \cdot \sqrt{r_o^2 - y^2} dy \right] \quad (13)$$

Para compreender o comportamento de um riser rígido sob flexão é necessário observar a sua relação de curvatura com o momento fletor. Utiliza-se a equação (14) para a fase elástica:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (14)$$

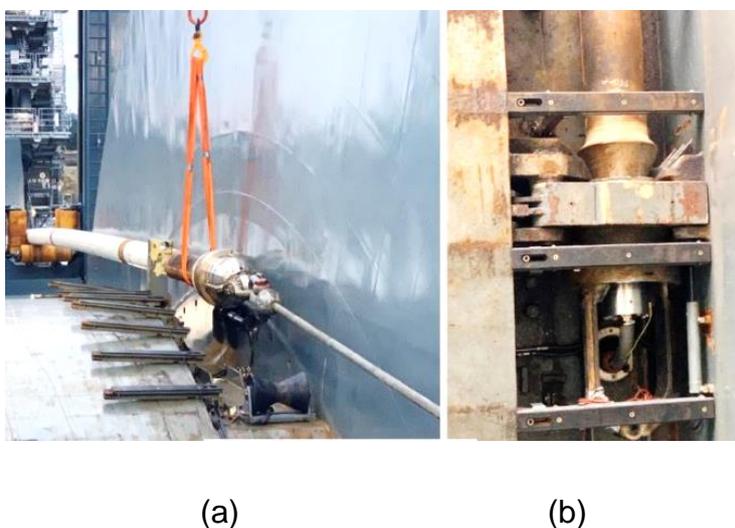
A **Figura 28** mostra, graficamente, as equações (13) e (14) para um *riser* rígido feito de material elástico com encruamento.



**Figura 28:** Gráfico  $M(\rho)$  vs  $1/\rho$ , normalizado, para um *riser* rígido. Fonte: (Kenedi, 2021)

### 3.4 ESTIMATIVA DA CARGA AXIAL DURANTE O ENROLAMENTO (*BACK TENSION*)

Durante o enrolamento do *riser* rígido ao redor do carretel é necessário a instalação de uma *reeling head*. Este equipamento é guinchado por um cabo de aço até sua chegada ao compartimento denominado *reel pocket*. No *reel pocket* ocorre o travamento desta cabeça e em seguida inicia-se a rotação do carretel para que ocorra o enrolamento (esforços de flexão pura somados a carga axial são então aplicados no *riser* rígido). A **Figura 29** mostra, respectivamente, o *reeling head* e o *reeling pocket*.



**Figura 29: (a) *Reeling head*, (b) *reeling pocket* do *Seven Vega*. Fonte: *Subsea 7***

O contato do *riser* com o carretel durante o enrolamento é essencial para garantir a redução da ocorrência de flambagem localizada. A seguir é feita uma estimativa simplificada da carga axial necessária durante o enrolamento do *riser* rígido, denominada de *back tension*.

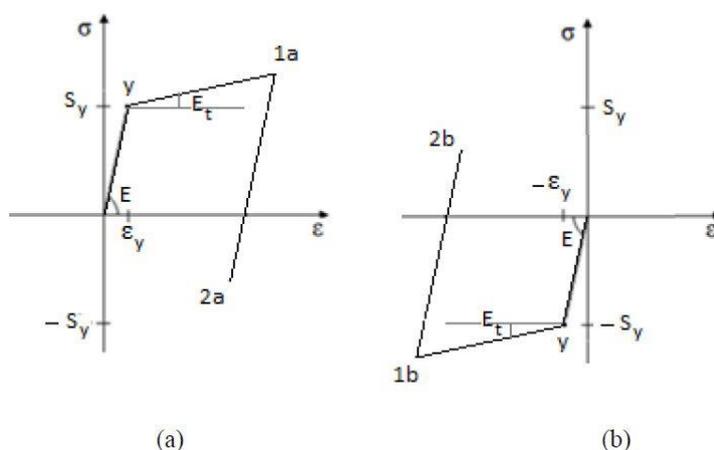
A equação (15) correspondente a carga  $N$  de solicitação axial necessária (*back tension*) durante o acomodamento da *reeling head* no *reeling pocket*:

$$N_{bt} = \frac{M(\rho_{imp})}{\rho_{imp}} \quad \rho_{imp} = r_{car} + r_o \quad (15)$$

Onde  $r_{car}$  é o raio do carretel.

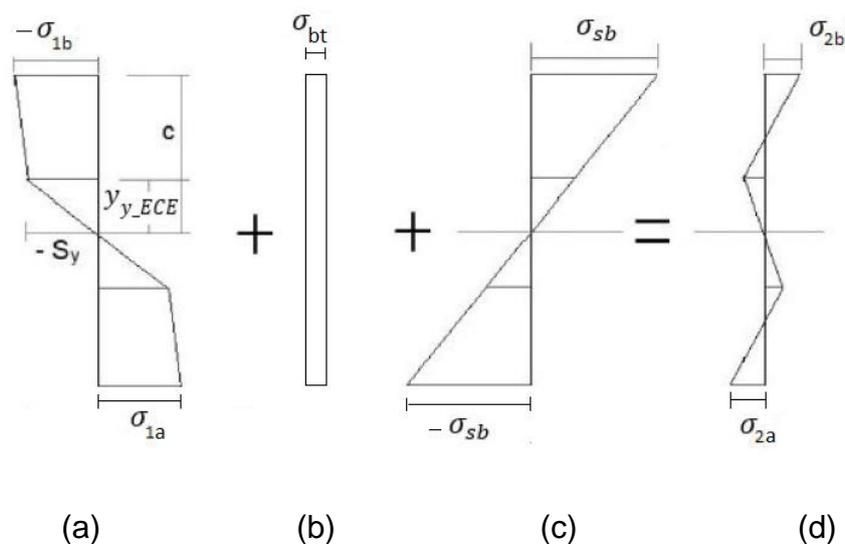
### 3.5 TENSÕES DE CARREGAMENTO, DE *SPRINGBACK* E RESIDUAIS

A **Figura 30** mostra o gráfico de  $\sigma$  vs  $\epsilon$  característico do comportamento de um material ECE, para dois pontos distintos da seção transversal do *riser* rígido (vide Fig. 23), após um ciclo de carregamento com plasticidade e seu descarregamento correspondente.



**Figura 30:** Gráfico tensão vs deformação da seção transversal de um *riser* rígido de material ECE, com o carregamento e o descarregamento, para dois pontos – (a) extradorso e (b) intradorso. Fonte: (Kenedi, 2021)

A **Figura 31** mostra os perfis de tensões do carregamento e do descarregamento na seção transversal de um *riser* rígido de um material ECE.



**Figura 31:** Distribuição de tensões na seção transversal de um *riser* rígido: (a) carregamento, (b) *back tension*, (c) *springback*, (d) tensões residuais

A distribuição das tensões de carregamento é descrita por:

$$\sigma = \begin{cases} -S_y - E_t \cdot \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) & y_y < y < r_e \\ -E \cdot \frac{y}{\rho} & -y_y \leq y \leq y_y \\ S_y - E_t \cdot \left( \frac{y}{\rho} + \varepsilon_y \right) & -r_e < y < -y_y \end{cases} \quad (16)$$

$\sigma_{1a}$  e  $\sigma_{1b}$ , mostradas na **Figura 31**, podem ser obtidas substituindo-se, respectivamente,  $y$  por  $r_e$  e por  $-r_e$ .

$$-\sigma_{1b} = -S_y - E_t \cdot \left( \frac{r_e}{\rho} - \varepsilon_y \right) \quad (17)$$

$$\sigma_{1a} = S_y - E_t \cdot \left( \frac{-r_e}{\rho} + \varepsilon_y \right) \quad (18)$$

A tensão axial correspondente a carga axial do *back tension* é dada por:

$$\sigma_{bt} = \frac{N_{bt}}{A} \quad A = \pi \cdot (r_o^2 - r_i^2) \quad (19)$$

O *springback* é obtido através da seguinte equação:

$$\sigma_{sb}(\rho, y) = -\frac{M(\rho) \cdot y}{I} \quad I = \frac{\pi}{4} \cdot (r_o^4 - r_i^4) \quad (20)$$

A tensão residual é consequência do somatório dos carregamentos de flexão e axial, com o *springback*.  $\sigma_{2a}$  e  $\sigma_{2b}$ , mostradas na **Figura 31**, podem ser obtidas:

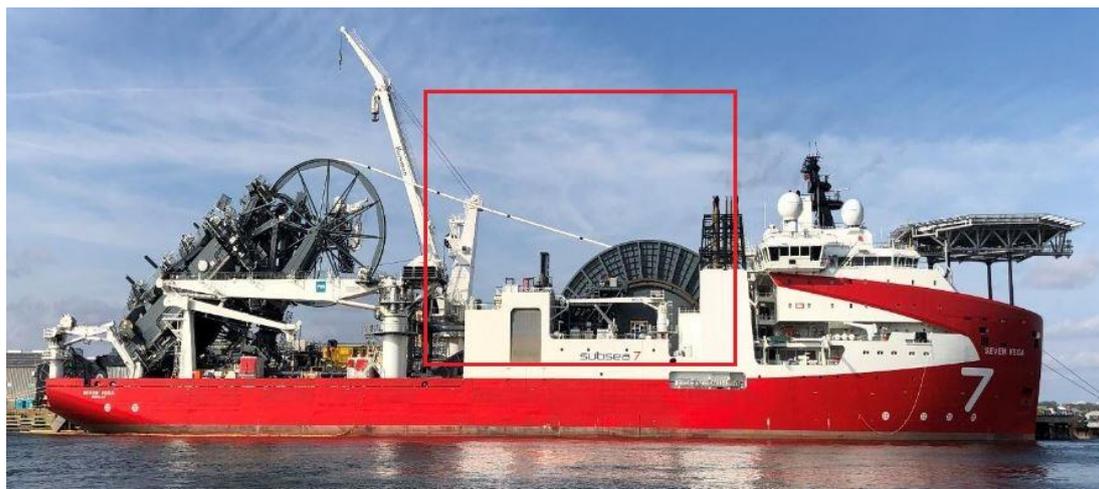
$$\sigma_{2b} = -\sigma_{1b} + \sigma_{bt} + \sigma_{sb} \quad (21)$$

$$\sigma_{2a} = \sigma_{1a} + \sigma_{bt} - \sigma_{sb} \quad (22)$$

#### 4. ESTUDO DE CASO

Ao longo desta seção será desenvolvido um estudo de caso com a aplicação da teoria descrita neste projeto final, com o objetivo de identificar o efeito do *back tension* no *enrolamento/desenrolamento* de *risers* rígidos.

A **Figura 32** mostra a embarcação *Seven Vega* que terá os parâmetros de *enrolamento* utilizados para este estudo de caso.



**Figura 32:** Foto da embarcação *Seven Vega*. Fonte: *Subsea 7*

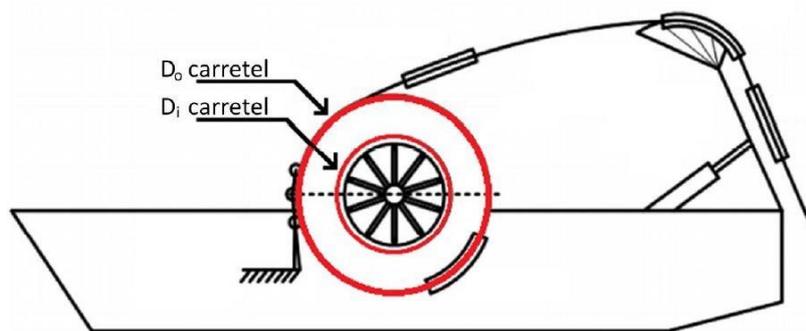
A **Tabela 8** apresenta os parâmetros da embarcação *Seven Vega* necessários para o estudo de caso.

**Tabela 8:** Parâmetros do carretel da embarcação *Seven Vega*

Parâmetro	Valor
Capacidade máxima	5600 toneladas
<i>Back tension</i> máximo fornecido	120 toneladas
Comporta tubos na faixa de diâmetro externo de:	4" – 20"

Fonte: *Subsea 7*

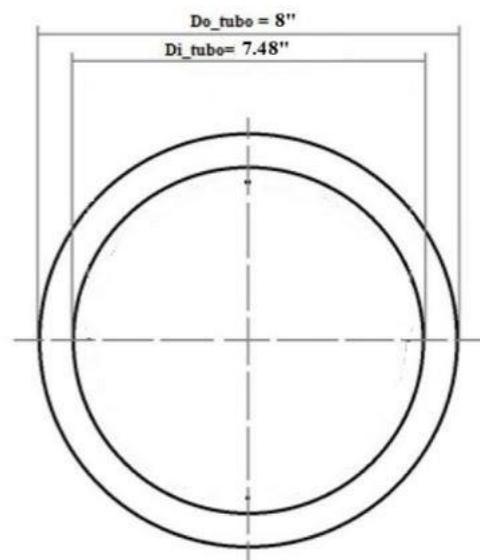
A **Figura 33** mostra os diâmetros externo e interno do carretel.



**Figura 33: Desenho esquemático do carretel de transporte de riser. (Fonte; Adaptada Cho, Joo, Cho, & Moon, 2017)**

O presente estudo considera o carregamento de flexão imposto ao riser rígido através do assentamento deste no raio de curvatura do carretel,  $r_{car} = 10,5$  m ( $D_{i\_reel} = 21$  m). O raio máximo de enrolamento é de 16 m ( $D_{o\_reel} = 32$  m).

A **Figura 34** mostra as dimensões de diâmetro do tubo API 5L X65 utilizado.



**Figura 34: Dimensões da seção transversal do riser rígido feito do material API 5L X65.**

Fonte: Própria

A **Tabela 9** mostra os dados referentes ao tubo

**Tabela 9: Parâmetros do tubo**

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio externo do tubo ( $r_o$ )	0,102	m
Raio interno do tubo ( $r_i$ )	0,095	m
Espessura do tubo (t)	0,007	m
Área da seção transversal do tubo (A)	$4,336 \times 10^{-3}$	m <sup>2</sup>
Momento de inércia de área do tubo (I)	$2,088 \times 10^{-5}$	m <sup>4</sup>

Fonte: Própria

A **Tabela 10** apresenta os parâmetros do API 5L X65.

**Tabela 10: Parâmetros do API 5L X65**

Parâmetro	Valor	Unidade
Módulo Tangente ( $E_t$ )	$1,107 \times 10^9$	Pa
Deformação de Escoamento ( $\varepsilon_y$ )	$2,133 \times 10^{-3}$	m/m
Deformação de Ruptura ( $\varepsilon$ )	0,08	m/m
Tensão de Ruptura ( $S_{ut}$ )	$5,37 \times 10^8$	Pa
Resistência ao escoamento ( $S_y$ )	$4,48 \times 10^8$	Pa
Módulo de elasticidade ( $E$ )	$2,1 \times 10^{11}$	Pa

Fonte: R.C Hibbeler – Resistência dos materiais 7ª edição

#### 4.1. DISTRIBUIÇÃO DE MOMENTOS

A partir dos dados apresentados na **Tabela 9** e **Tabela 10** pode-se calcular, utilizando a equação (10) o  $\rho_y = 47,6$  m e utilizando a equação (11) é possível determinar o  $M_y = 92,1$  kN·m. Utilizando o  $\rho_{imp} = 10,6$  m da equação (15.b) pode-se calcular o  $M = 121,8$  kN·m utilizando a equação (13). O momento que plastifica toda a seção transversal pode ser calculado utilizando-se a equação (12),  $M_p = 122,9$  kN·m.

A **Figura 35** mostra o gráfico do momento fletor aplicado ao *riser* rígido pelo raio de curvatura imposto  $\rho_{imp}$ .

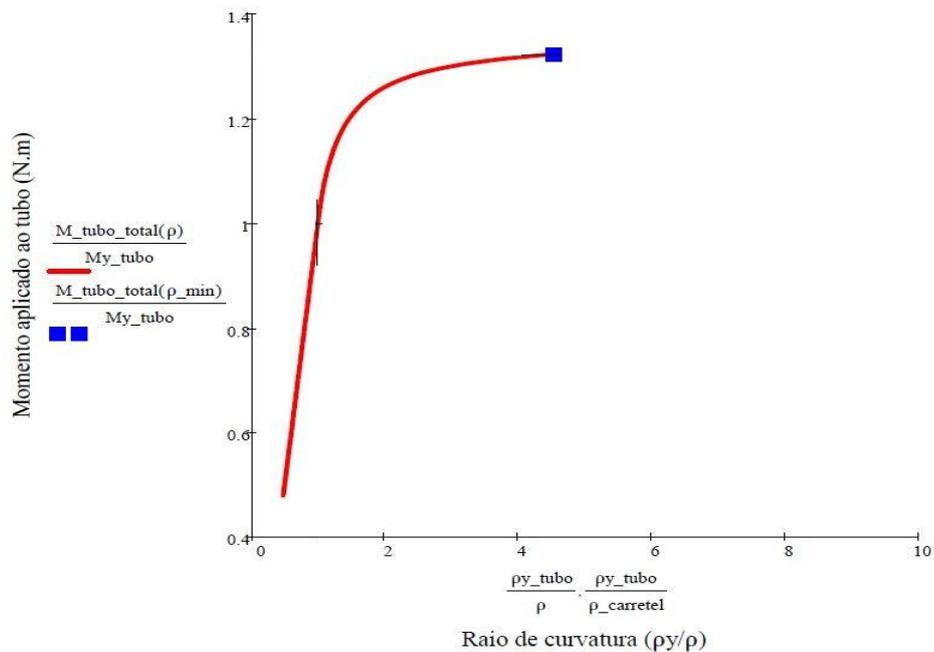


Figura 35: Momento no *riser* rígido em função do raio de curvatura aplicado. (Fonte: Própria)

#### 4.2. CARREGAMENTO DE FLEXÃO

A **Figura 36** mostra a distribuição de tensão gerada pelo carregamento de flexão no *riser* rígido quando temos um  $\rho_{\text{imp}} = 10,6 \text{ m}$ . Foi encontrado um valor de  $\sigma(y)$  nas coordenadas de  $(\pm r_e)$  de  $\pm 456,2 \text{ MPa}$ .

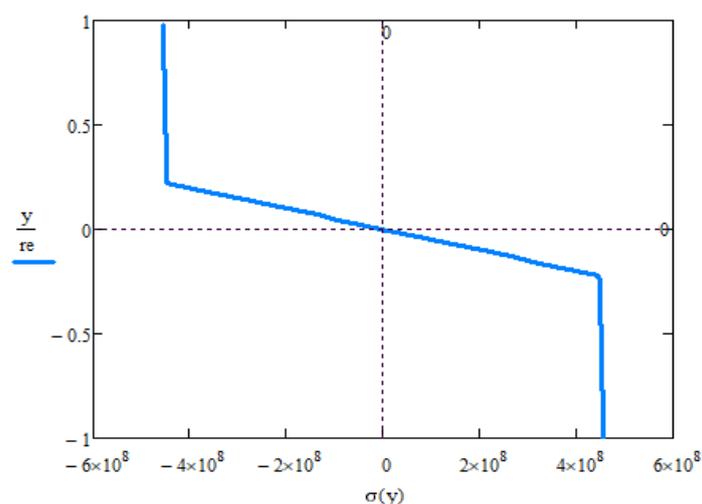
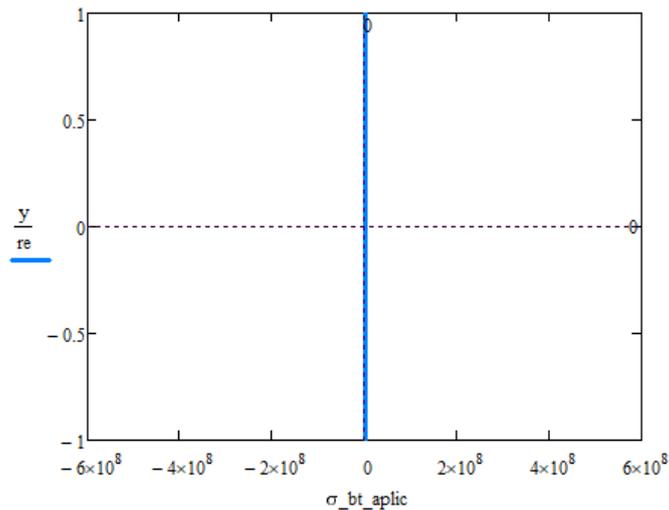


Figura 36: Distribuição na seção transversal de tensões de flexão do carregamento aplicado ao *riser* rígido. (Fonte: Própria)

#### 4.3. CARREGAMENTO DE TRAÇÃO

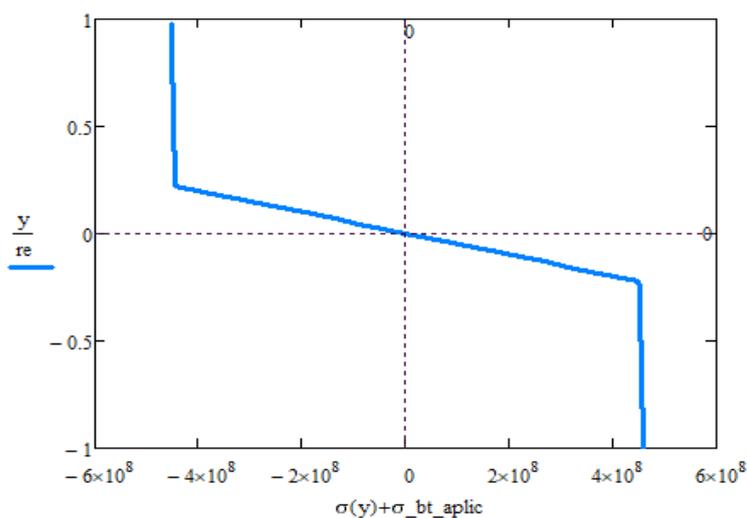
A **Figura 37** mostra o gráfico de distribuição de tensão para a solicitação axial (*back tension*). Foi encontrado um valor de  $\sigma_{bt\_aplic}$  de 2,65 MPa.



**Figura 37:** Distribuição na seção transversal de tensões provenientes do carregamento de tração aplicado ao *riser* rígido. (Fonte: Própria)

#### 4.4. SOMATÓRIO DOS CARREGAMENTOS

A **Figura 38** mostra a soma das distribuições das tensões de flexão e axial (*back tension*).

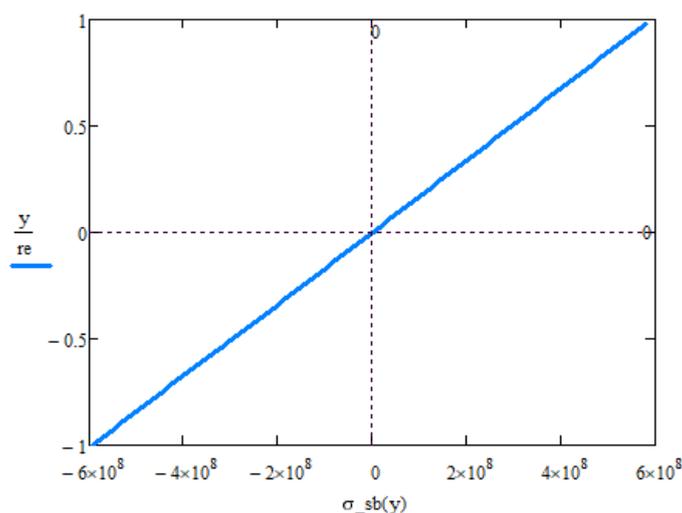


**Figura 38:** Distribuição na seção transversal de tensões provenientes do carregamento de flexão e tração aplicados ao *riser* rígido. (Fonte: Própria)

Apesar da semelhança gráfica entre a **Figura 38** e a **Figura 36**, a **Figura 38** não é simétrica, devido ao acréscimo da contribuição da  $\sigma_{bt\_aplic}$  de  $2,65\text{ MPa}$ . Os pontos principais da **Figura 38** são  $\sigma(yy) = -445,4\text{ MPa}$ ,  $\sigma(-yy) = 450,6\text{ MPa}$ ,  $\sigma(re) = -453,6\text{ MPa}$  e  $\sigma(-re) = 458,9\text{ MPa}$ .

#### 4.5. SPRINGBACK

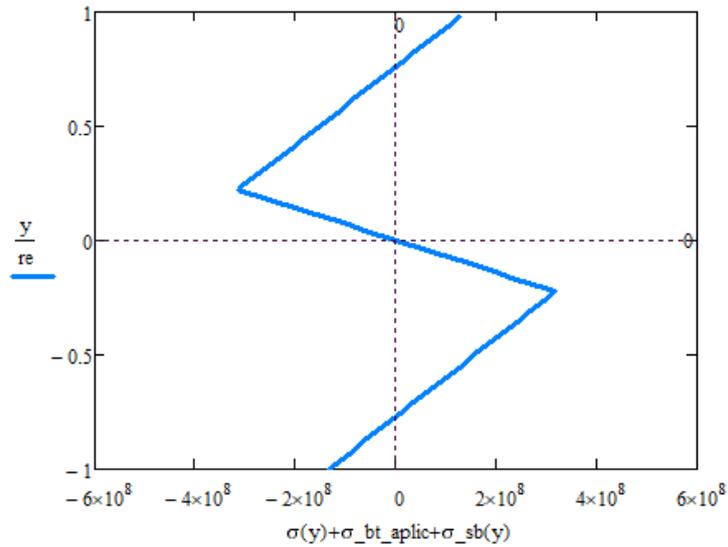
A **Figura 39** apresenta a distribuição de tensões do *springback* para o *riser* rígido utilizado no estudo de caso. Foi encontrado um valor de  $\sigma_{sb}(y)$  de  $\pm 592,6\text{ MPa}$  nas coordenadas de  $(\pm r_e)$  e de  $\pm 131,9\text{ MPa}$  nas coordenadas de  $(\pm y_y)$



**Figura 39: Tensões de springback na seção transversal do riser rígido. (Fonte: Própria)**

#### 4.6. TENSÃO RESIDUAL

A tensão residual é resultante da soma da distribuição tensões de carregamento (flexão + tração) e do *springback*. A **Figura 40** mostra a distribuição de tensões residuais no *riser* rígido.



**Figura 40: Distribuição na seção transversal das tensões residuais no riser rígido.**  
(Fonte: Própria)

Os pontos principais da **Figura 40** são:  $\sigma(-r_e) = -133,7$  MPa ,  $\sigma(-y_y) = 318,7$  MPa,  $\sigma(y_y) = -313,4$  MPa e  $\sigma(r_e) = 139$  MPa.

O **APÊNDICE A** apresenta os cálculos desenvolvidos no software *Mathcad*.

## 5. CONCLUSÃO

Com a utilização do modelo analítico proposto foi viável estimar o momento fletor aplicado ao *riser* rígido ao conformá-lo em torno da curvatura do carretel. A distribuição das tensões provocadas pelos carregamentos de flexão e axial (*back tension*), bem como do *springback*, foram acessados para a geração da distribuição das tensões residuais na seção transversal do *riser* rígido. Pode-se observar que o efeito do *back tension* foi mínimo, sendo quase imperceptível o desvio da simetria das tensões residuais resultantes.

Em outra conclusão deste trabalho observou-se que os maiores valores de tensões residuais se localizavam na fronteira elastoplástica (em  $-y_y$  e  $+y_y$ ), e não nos pontos superior e inferior da seção transversal (em  $-r_e$  e  $+r_e$ ).

## BIBLIOGRAFIA

- Açotubo, G. (28 de setembro de 2021). *Açotubo*. Fonte: [acotubo.com.br: https://acotubo.com.br/wp-content/uploads/2016/08/ACO\\_005\\_Catalogos\\_Acotubo2016\\_OnLine\\_02\\_TubosAco.pdf](https://acotubo.com.br/content/uploads/2016/08/ACO_005_Catalogos_Acotubo2016_OnLine_02_TubosAco.pdf)
- Bastos, C. (agosto de 2012). *ANÁLISE DO EFEITO DE CARGAS TRATIVAS NO CURVAMENTO DE TUBOS À FRIO*. Rio de Janeiro.
- Bioenergia, U. N. (02 de Agosto de 2021). *UDOP*. Fonte: UDOP: <https://www.udop.com.br/noticia/2021/08/02/como-o-brasil-quer-se-tornar-o-quarto-maior-produtor-de-petroleo-ate-2030y.html#:~:text=O%20Brasil%20ocupa%20a%20s%C3%A9tima,quarta%20e%20a%20quinta%20posi%C3%A7%C3%A3o.>
- Campos, L. P. (Novembro de 2019). *CEFET/RJ*. Fonte: CEFET/RJ: [http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202019\\_2%20An%C3%A1lise%20Tens%C3%B5es%20no%20Curvamento%20de%20Riser%20R%C3%ADgido%20Caudeado.pdf](http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Projeto%20Final%202019_2%20An%C3%A1lise%20Tens%C3%B5es%20no%20Curvamento%20de%20Riser%20R%C3%ADgido%20Caudeado.pdf)
- CBIE. (24 de maio de 2019). Fonte: <https://cbie.com.br/artigos/qual-o-ranking-do-brasil-na-producao-de-petroleo-global/>
- CBIE. (03 de Abril de 2020). Fonte: <https://cbie.com.br/artigos/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-producao-de-petroleo/>
- Charnaux, C. R. (Março de 2008). *Maxwell vrac Puc Rio*. Fonte: Maxwell vrac Puc Rio: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12152/12152\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12152/12152_3.PDF)
- E. A. de Souza Neto, D. Perić, D. R. J. Owen. (2008). *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. In D. P. E. A. de Souza Neto, *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. Wiley.
- Enginoor. (2018, April 21). *Enginoor*. Retrieved from Enginoor.com: <https://www.enginoor.com/what-is-a-spoolbase/>
- Fachini, R. T. (01 de Março de 2015). *Repositório politécnica UFRJ*. Fonte: Repositório politécnica UFRJ: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012961.pdf>
- FEM, F. d. (26 de Setembro de 2021). *PETRÓLEO - do latim Petra(pedra) e Oleum(óleo)*. Fonte: <https://www.fem.unicamp.br/index.php/pt-br/o-que-e-petroleo-dep>
- Ferreira, D. P. (2013). *Repositório Marinha do Brasil*. Fonte: Repositório Marinha do Brasil: <https://www.repositorio.mar.mil.br/bitstream/ripcmb/843944/1/00000522.pdf>
- Globo, O. (17 de Outubro de 2013). *O Globo*. Fonte: O Globo: <https://acervo.oglobo.globo.com/fatos-historicos/campanha-petroleo-nosso-mobilizou-brasil-no-final-da-decada-de-40-10401791>
- Institute, A. P. (2021, 09 23). *API*. Retrieved from API: <https://www.api.org/products-and-services/pt/standards>
- Jianxing Yu, W. X. (2021, August 09). Local Buckling Characteristics of Stainless-Steel Polypropylene Deep-Sea Sandwich Pipe under Axial Tension and External Pressure. *MDPI*, pp. 11-12.
- Jorge Luis Moretti de Souza, E. C. (2018). *Uso Racional de Energia*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

- Kenedi, P. P. (2021). *Apostila de Tensões Residuais*. Rio de Janeiro.
- Mattos, D. H. (01 de Setembro de 2012). *COPPE UFRJ*. Fonte: COPPE UFRJ:  
[http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc\\_download&gid=2310&Itemid=](http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docman/?task=doc_download&gid=2310&Itemid=)
- Menezes, B. (2005). *Estudo da diversificação energética das empresas de petróleo*. São Paulo.
- Ming Ju, X. X. (27 de maio de 2021). Numerical simulations and experimental study on the reeling process of submarine pipeline by R-Lay Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, pp. 2-18.
- Monte, I. R. (2013). *Teses USP*. Fonte: Teses USP:  
[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-07102013-114545/publico/EMD13002\\_C.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-07102013-114545/publico/EMD13002_C.pdf)
- Morilla, C. M. (2012). Aços de Alta resistência e baixa liga em oleodutos e gasodutos. *UNISANTA - Science and Technology*.
- Oliveira et al. (2016). PETRÓLEO E GÁS: UMA BREVE HISTÓRIA DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA NO. *Revista de Trabalhos Acadêmicos UNIVERSO São Gonçalo*.
- Oliveira, A. d. (2012). Pré-Sal: A oportunidade e seus desafios. *Revista USP*, 23-32.
- Petrobrás. (26 de Setembro de 2021). Fonte: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>
- Petrobrás. (03 de outubro de 2021). Fonte: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>
- Petróleo, O. (16 de junho de 2017). *opetroleo*. Fonte: opetroleo:  
<https://opetroleo.com.br/afinal-o-que-onshore-e-offshore/>
- Portas, A. M. (2017). *Glossário Técnico Ilustrado para a Indústria Offshore*. Macaé: Editora Clube dos Autores.
- Ricardo Miranda Alé, C. A. (2014). Desenvolvimento de Aço API 5L X65 para Dutos Resistentes ao Serviço Ácido. *69º Congresso Anual da ABM - Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*. São Paulo.
- Salgado et al. (2016). *UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE*. Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE:  
<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/2843/1/TCC%20Ana%20Luiza%20e%20Deborah.pdf>
- SILVA, É. A. (2012). ESTUDO DO EFEITO SPRINGBACK EM AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA APLICADOS A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA. Guaratinguetá, São Paulo, Brasil.
- Silva, V. R. (01 de Junho de 2011). *Pantheon UFRJ*. Fonte: Pantheon UFRJ:  
<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9650/1/monopoli10006969.pdf>
- Souza, A. (11 de março de 2019). *Linkedin*. Fonte: LinkedIn:  
<https://pt.linkedin.com/pulse/risers-almir-carvalho-1e>
- Subsea 7. (2021, setembro 28). Retrieved from  
<https://www.subsea7.com/content/dam/subsea7-corporate2018/Datasheets/Vessel/Seven%20Vega.pdf.downloadasset.pdf>
- Vale, L. M. (2013). *Repositório da Politécnica*. Fonte: Repositório da Politécnica:  
<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006311.pdf>

Xavier, M. L. (01 de Junho de 2006). *Livros Grátis*. Fonte: Livros Grátis:  
<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp018716.pdf>

**APÊNDICE A - Desenvolvimentos no Software *Mathcad***

---

Propiedades mecánicas

$$S_y := 448 \cdot 10^6$$

$$E := 210 \cdot 10^9$$

$$\epsilon_y := \frac{S_y}{E} \quad \epsilon_y = 2.133 \times 10^{-3}$$

$$E_t := 1.107 \cdot 10^9$$

---

Propiedades mecánicas

---

Propiedades geométricas

$$d_e := 8 \cdot 0.0254 \quad d_e = 0.203$$

$$t := 0.277 \cdot 0.0254 \quad t = 7.036 \times 10^{-3}$$

$$d_i := d_e - 2 \cdot t \quad d_i = 0.189$$

$$r_e := \frac{d_e}{2} \quad r_e = 0.102$$

$$r_i := \frac{d_i}{2} \quad r_i = 0.095$$

$$\rho_{\text{carretel}} := 10.5$$

$$\rho_{\text{imp}} := \rho_{\text{carretel}} + r_e \quad \rho_{\text{imp}} = 10.602$$

$$A := \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_i^2) \quad A = 4.336 \times 10^{-3}$$

$$I := \frac{\pi}{64} \cdot (d_e^4 - d_i^4) \quad I = 2.088 \times 10^{-5}$$

---

Propiedades geométricas

---

Cálculos de momentos

$$M_y := I \cdot \frac{S_y}{r_e} \quad M_y = 9.208 \times 10^4$$

$$\rho_y := \frac{E \cdot I}{M_y} \quad \rho_y = 47.625$$

$$y_y := \epsilon_y \cdot \rho_{\text{imp}} \quad y_y = 0.023$$

$$M_{\text{aplic}} := 2 \cdot \left[ \int_0^{yy} y \cdot \left( \frac{y}{yy} \cdot S_y \right) \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2 - y^2} - \sqrt{ri^2 - y^2} \right) dy + \int_{yy}^{ri} y \cdot \left[ S_y + Et \cdot \left( \frac{y}{\rho_{\text{imp}}} - \epsilon y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2} \right) \right]$$

$$M_{\text{aplic}} = 1.218 \times 10^5$$

$$M_p := 2 \cdot \left[ \int_0^{ri} y \cdot \left[ S_y + Et \cdot \left( \frac{y}{\rho_{\text{imp}}} - \epsilon y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2 - y^2} - \sqrt{ri^2 - y^2} \right) dy + \int_{ri}^{re} y \cdot \left[ S_y + Et \cdot \left( \frac{y}{\rho_{\text{imp}}} - \epsilon y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2} \right) dy \right]$$

$$M_p = 1.229 \times 10^5$$

▲ Cálculos de momentos

---

▼ Estimativa de força e tensão (back tension)

---

$$F_{\text{bt}_y} := \frac{M_y}{\rho_{\text{imp}}} \quad F_{\text{bt}_y} = 8.686 \times 10^3$$

$$F_{\text{bt}_\text{aplic}} := \frac{M_{\text{aplic}}}{\rho_{\text{imp}}} \quad F_{\text{bt}_\text{aplic}} = 1.149 \times 10^4$$

$$\sigma_{\text{bt}_y} := \frac{F_{\text{bt}_y}}{A} \quad \sigma_{\text{bt}_y} = 2.003 \times 10^6$$

$$\sigma_{\text{bt}_\text{aplic}} := \frac{F_{\text{bt}_\text{aplic}}}{A} \quad \sigma_{\text{bt}_\text{aplic}} = 2.65 \times 10^6$$

▲ Estimativa de força e tensão (back tension)

---

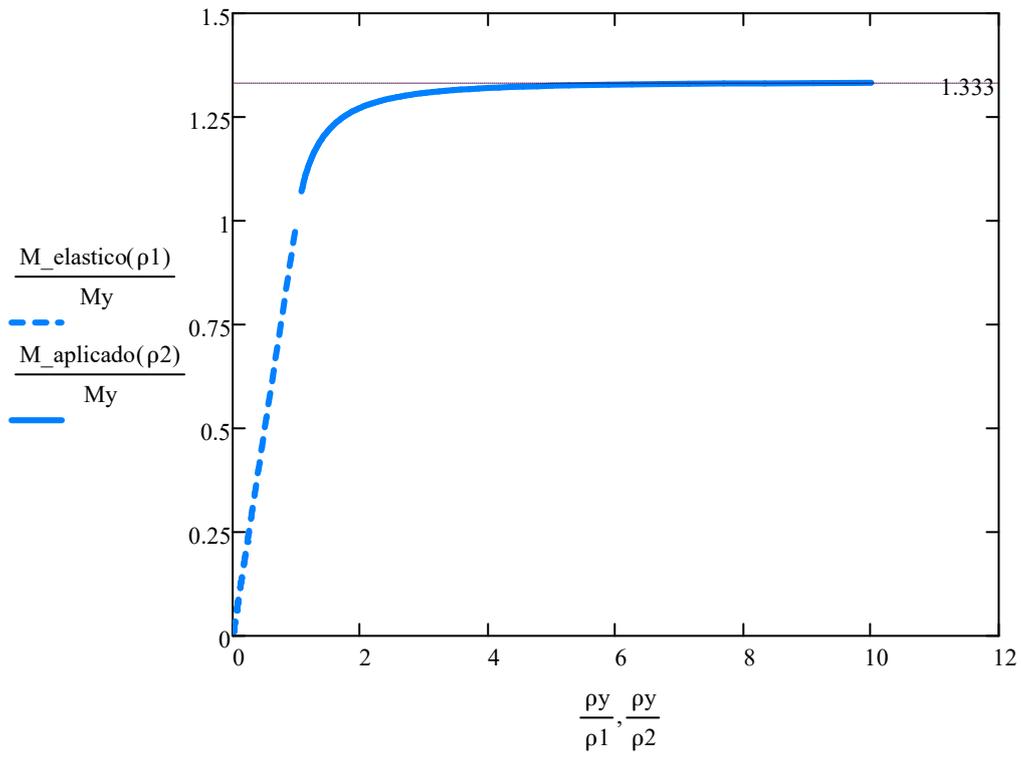
$$\rho_1 := 100 \cdot \rho_y, 99.9 \cdot \rho_y, \rho_y$$

$$M_{\text{elastico}}(\rho_1) := \left( \frac{E \cdot I}{\rho_1} \right)$$

$$\rho_2 := \rho_y, 0.99 \cdot \rho_y, 0.1 \cdot \rho_y$$

$$M_{\text{aplicado}}(\rho_2) := 2 \cdot \left[ \int_0^{\rho_2 \cdot \epsilon y} y \cdot \left( \frac{y}{\rho_2 \cdot \epsilon y} \cdot S_y \right) \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2 - y^2} - \sqrt{ri^2 - y^2} \right) dy + \int_{\rho_2 \cdot \epsilon y}^{ri} y \cdot \left[ S_y + Et \cdot \left( \frac{y}{\rho_{\text{imp}}} - \epsilon y \right) \right] \cdot 2 \cdot \left( \sqrt{re^2} \right) dy \right]$$

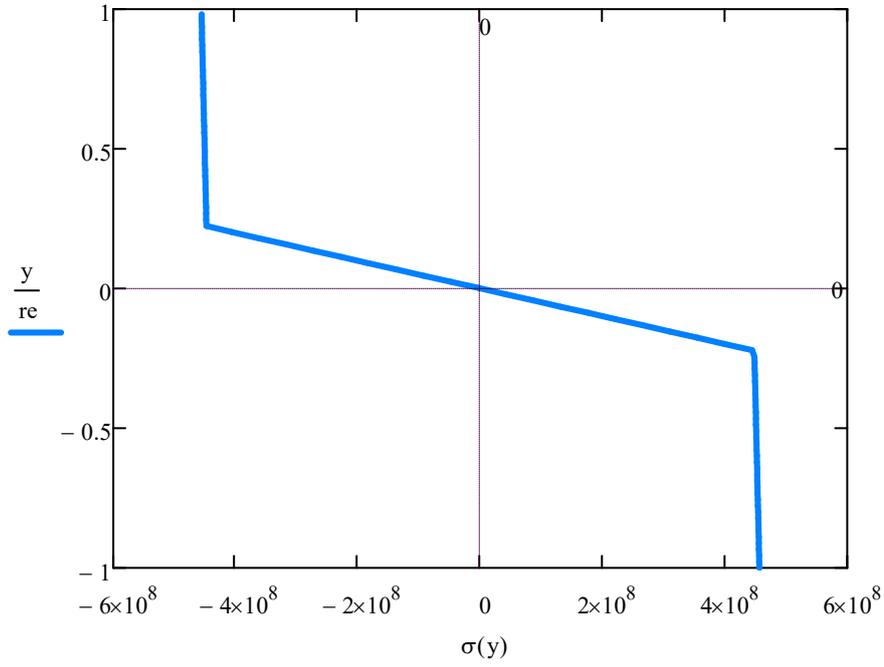
## Distribuição de tensões



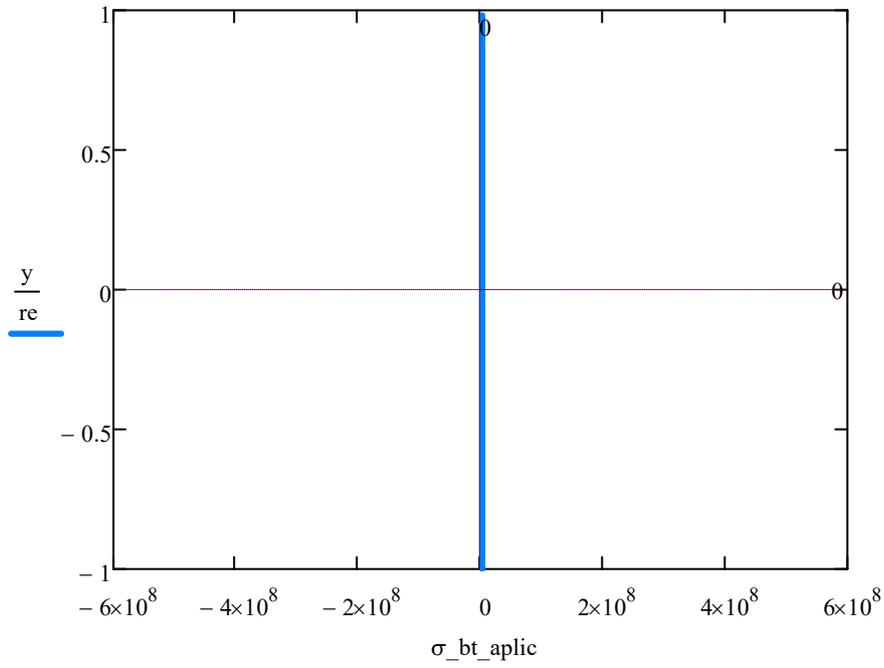
$$y := -re, \left( -re + \frac{yy}{10} \right) .. re$$

$$\sigma(y) := \begin{cases} \left[ -Sy - Et \cdot \left( \frac{y}{\rho\_imp} - \epsilon y \right) \right] & \text{if } yy < y \leq re \\ \left( \frac{-y}{yy} \right) \cdot Sy & \text{if } -yy \leq y \leq yy \\ \left[ Sy - Et \cdot \left( \frac{y}{\rho\_imp} + \epsilon y \right) \right] & \text{if } -re \leq y < -yy \end{cases}$$

Carregamento de flexão



Carregamento de tração



$$\sigma_{\text{tubo\_mais\_re}} := \sigma(\text{re}) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} \quad \frac{\sigma_{\text{tubo\_mais\_re}}}{S_y} = -1.012$$

$$\sigma_{\text{tubo\_mais\_re}} = -4.536 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{tubo\_mais\_yy}} := \sigma(\text{yy}) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} \quad \frac{\sigma_{\text{tubo\_mais\_yy}}}{S_y} = -0.994$$

$$\sigma_{\text{tubo\_mais\_yy}} = -4.454 \times 10^8$$

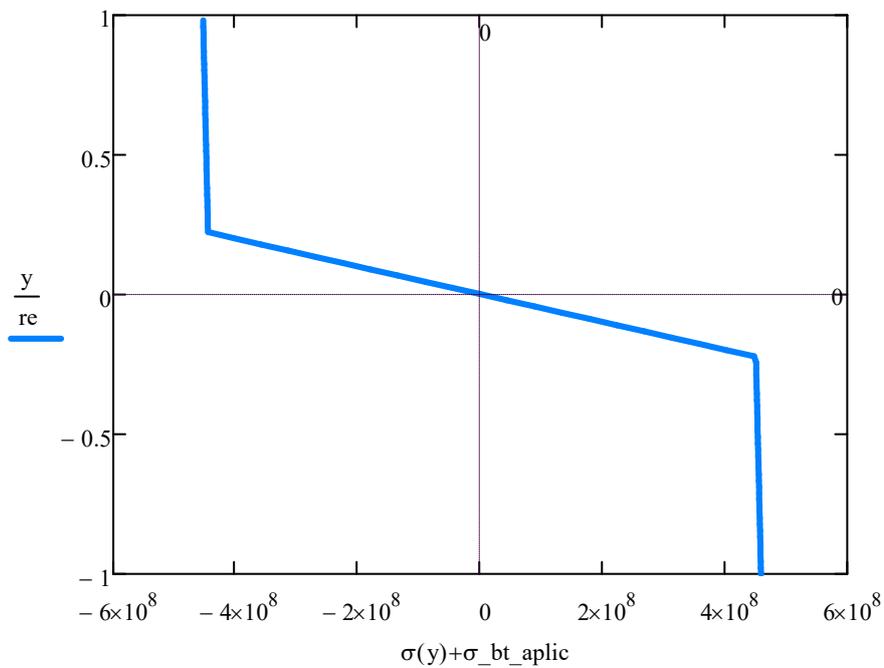
$$\sigma_{\text{tubo\_menos\_yy}} := \sigma(-\text{yy}) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} \quad \frac{\sigma_{\text{tubo\_menos\_yy}}}{S_y} = 1.006$$

$$\sigma_{\text{tubo\_menos\_yy}} = 4.506 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{tubo\_menos\_re}} := \sigma(-\text{re}) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} \quad \frac{\sigma_{\text{tubo\_menos\_re}}}{S_y} = 1.024$$

$$\sigma_{\text{tubo\_menos\_re}} = 4.589 \times 10^8$$

### Somatório dos Carregamentos



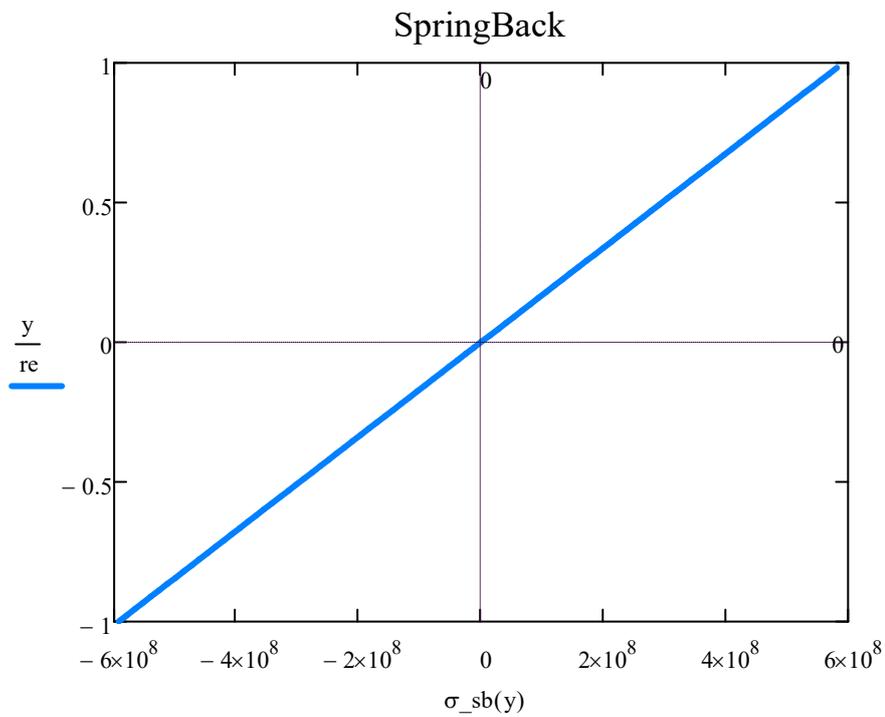
$$\sigma_{sb}(y) := M_{aplic} \cdot \frac{y}{I}$$

$$\sigma_{sb}(re) := \frac{M_{aplic} \cdot (re)}{I} \quad \sigma_{sb}(re) = 5.926 \times 10^8$$

$$\sigma_{sb}(yy) := \frac{M_{aplic} \cdot (yy)}{I} \quad \sigma_{sb}(yy) = 1.319 \times 10^8$$

$$\sigma_{sb}(-yy) := \frac{M_{aplic} \cdot (-yy)}{I} \quad \sigma_{sb}(-yy) = -1.319 \times 10^8$$

$$\sigma_{sb}(-re) := \frac{M_{aplic} \cdot (-re)}{I} \quad \sigma_{sb}(-re) = -5.926 \times 10^8$$



$$\sigma_{\text{res\_tubo}}(\rho, y1) := \sigma(y) + \sigma_{\text{sb}}(y)$$

$$\sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_re}} := \sigma(-re) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} + \sigma_{\text{sb}}(-re)$$

$$\frac{\sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_re}}}{S_y} = -0.298 \quad \sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_re}} = -1.337 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_re}} := \sigma(re) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} + \sigma_{\text{sb}}(re)$$

$$\frac{\sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_re}}}{S_y} = 0.31 \quad \sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_re}} = 1.39 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_yy}} := \sigma(-yy) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} + \sigma_{\text{sb}}(-yy)$$

$$\frac{\sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_yy}}}{S_y} = 0.711 \quad \sigma_{\text{res\_tubo\_menos\_yy}} = 3.187 \times 10^8$$

$$\sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_yy}} := \sigma(yy) + \sigma_{\text{bt\_aplic}} + \sigma_{\text{sb}}(yy)$$

$$\frac{\sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_yy}}}{S_y} = -0.7 \quad \sigma_{\text{res\_tubo\_mais\_yy}} = -3.134 \times 10^8$$

