

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA (CEFET/RJ)

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Marcos Ferreira Barci

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TENSÕES RESIDUAIS NOS ARAMES DE  
ARMADURA APÓS A MONTAGEM DE CONECTORES EM RISERS FLEXÍVEIS**

RIO DE JANEIRO – RJ

2022

**Marcos Ferreira Barci**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TENSÕES RESIDUAIS NOS ARAMES DE  
ARMADURA APÓS A MONTAGEM DE CONECTORES EM RISERS FLEXÍVEIS**

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: Paulo Pedro Kenedi D. Sc.

RIO DE JANEIRO – RJ

2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B243 Barci, Marcos Ferreira

Avaliação dos efeitos de tensões residuais nos arames de armadura após a montagem de conectores em risers flexíveis / Marcos Ferreira Barci. — 2022.

66f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.

Bibliografia : f. 63-66

Orientador: Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Tubulações. 3. Tensões residuais. 4. Dutos flexíveis. 5. Encruamento (Metalurgia). I. Kenedi, Paulo Pedro. (Orient.). II. Título.

CDD 621

Dedico este trabalho à minha família, por todo o suporte e segurança mental proporcionada para a saudável e confortável conclusão deste ciclo.

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que é a razão de tudo que existe, ter vindo a se tornar existente. Razão dos ares em meus pulmões, e força vital no meu ser. Sem o amor de Deus, na forma de seu filho amado, Jesus Cristo, hoje eu não poderia me apresentar em sua presença como se o pecado nunca tivesse existido, sequer entrado no mundo, me tornou sua justiça, justiça de Deus “Àquele que não conheceu pecado, o fez pecado por nós; para que nele fôssemos feitos justiça de Deus - 2 Coríntios 5:21”

Adicionalmente, gostaria de expressar meu agradecimento a todas as pessoas que estiveram comigo no decorrer desta caminhada - minha família, minha namorada, Fernanda, pelo seu amor, carinho e suporte em todos os momentos que precisei me ausentar para hoje estar celebrando este encerramento. Gostaria ainda de agradecer a todos os meus amigos que são parte fundamental da minha história. Certamente todos vocês tiveram papel fundamental para o sucesso desse ciclo, que atualmente se encerra. Um dedicado agradecimento à minha mãe, Simone, por ter me suportado e guiado em todo caminho de justiça, desde a infância, ao meu pai, Marcelo, por ter me ensinado o que é ser um homem íntegro, amoroso e paciente. Vocês são minha referência, minha base. Obrigado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. D. Sc. Paulo Pedro Kenedy, pelo suporte, atenção e todo comprometimento que fez parte dessa trajetória me guiando.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Este estudo visa analisar as tensões residuais no ponto de ancoragem dos arames da camada armadora de tração dos flexíveis ao conector. Durante a montagem das extremidades terminadas dos *risers*, os conectores, esses arames são submetidos a carregamentos de curvamento, para que o processo de montagem possa ser concluído. Durante esse processo, esse curvamento precisa ser controlado, caso contrário há a plastificação excessiva do material, devido ao baixo raio de curvatura imposto durante curvamento. Dessa forma, esse trabalho irá abordar esse problema fazendo o uso de um modelo analítico pensado considerando o encruamento do material curvado, buscando aproximar o estudo da realidade. Dessa maneira, o estudo irá avaliar como as tensões envolvidas no curvamento, dado o raio de curvatura imposto, se comportam. Será observado no decorrer do estudo, que quanto menor o raio de curvatura imposto, maiores serão as tensões de carregamento, o que resultará em maiores tensões residuais, uma vez que o curvamento tenha ultrapassado o regime elástico. Assim, o objetivo desse trabalho é mensurar um range de raios distintos de curvatura que tornaria essa atividade segura, sem comprometer excessivamente a estrutura mecânica do produto.

**Palavras-chave:** Conectores. Armadura. Curvamento. Encruamento. Tensões.

## ABSTRACT

This study aims to analyze the residual stresses at the anchoring point of the wires of the traction reinforcement layer of the flexibles to the connector. During the assembly of the finished ends of the risers, the connectors, these wires are subjected to bending loads, so that the assembly process can be completed. During this process, this bending needs to be controlled, otherwise there is excessive plasticization of the material, due to the low bending radius imposed during bending. In this way, this work will address this problem using an analytical model designed considering the work hardening of the curved material, seeking to bring the study closer to reality. In this way, the study will evaluate how the stresses involved in the bending, given the imposed bending radius, behave. It will be observed in the course of the study that the smaller the imposed bending radius, the greater the loading stresses, which will result in greater residual stresses, once the bending has exceeded the elastic regime. Thus, the objective of this work is to measure a range of different radii of curvature that would make this activity safe, without excessively compromising the mechanical structure of the product.

**Keywords:** Connector. Armor. Bending. Hardening. Residual Stress.

## Lista de Figuras

FIGURA 1: EMBARCAÇÃO DE LANÇAMENTO E INSTALAÇÃO DE RISERS.[15].....	13
FIGURA 2: PLATAFORMA JAQUETA. [16].....	14
FIGURA 3: TORRE COMPLACENTE. [17].....	15
FIGURA 4: PLATAFORMA AUTOELEVÁVEL. [18].....	15
FIGURA 5: PLATAFORMA POR GRAVIDADE. [19].....	16
FIGURA 6: PLATAFORMA SEMISUBMERSÍVEL. [24].....	17
FIGURA 7: NAVIO SONDA. [20].....	17
FIGURA 8: UNIDADE DE PERNA TENSIONADA. [21].....	18
FIGURA 9: PLATAFORMA SPAR.[22].....	18
FIGURA 10: UNIDADE ESTACIONÁRIA DE PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E TRANSFERÊNCIA (FPSO). [23].....	19
FIGURA 11: SISTEMA DE TUBOS FLEXÍVEIS [29].....	19
FIGURA 12: CATENÁRIA LIVRE. [5].....	21
FIGURA 13: CONFIGURAÇÃO DE INSTALAÇÃO STEEP-S E LAZY-S. [5].....	21
FIGURA 14: ESQUEMÁTICO DE INSTALAÇÃO STEEP WAVE E LAZY WAVE. [5].....	22
FIGURA 15: CAMADAS DO TUBO FLEXÍVEL.....	22
FIGURA 16: PERFIL DE INTERTRAVAMENTO DA CARÇAÇA. [5].....	23
FIGURA 17: VISTA LATERAL EM CORTE DE UM CONECTOR.[4].....	24
FIGURA 18: VIGA SOLICITADA EM ESFORÇOS DE FLEXÃO QUE PLASTIFICAM PARCIALMENTE A SEÇÃO TRANSVERSAL. [9].....	27
FIGURA 19: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO NOS PONTOS A E B DE VIGA DE MATERIAL EPP SOB FLEXÃO. [9].....	27
FIGURA 20: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO NOS PONTOS A E B DO MATERIAL ECE SOB FLEXÃO. [9].....	28
FIGURA 21: TENSÕES NORMAIS EM UMA VIGA DE MATERIAL ECE SOB FLEXÃO. (1) CARREGAMENTO; (2) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (3) TENSÕES RESIDUAIS. [9].....	28
FIGURA 22: DEFORMAÇÕES LONGITUDINAIS EM UMA VIGA DE MATERIAL ECE SOB FLEXÃO. (1) CARREGAMENTO; (2) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (3) DEFORMAÇÕES RESIDUAIS.[9].....	29
FIGURA 23: ARAME SUBMETIDO AO CURVAMENTO NA MONTAGEM DO CONECTOR. ....	29
FIGURA 24: PONTO DE FORMAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS DURANTE O CURVAMENTO DO ARAME NA MONTAGEM DO CONECTOR.....	30
FIGURA 25: EXTENSÔMETROS (STRAIN GAGES) (A) UNIAXIAL E (B) ROSETA. [10].....	31
FIGURA 26: CIRCUITO DE ¼ PONTE DE WHEATSTONE. [5].....	31
FIGURA 27: CIRCUITO 1/4 DE PONTE COM 3 FIOS.[5].....	32
FIGURA 28: STRAIN GAGE TIPO ROSETA.[8].....	32
FIGURA 29: ILUSTRAÇÃO DA ETAPA DE FABRICAÇÃO DA ARMADURA DE TRAÇÃO.[28].....	35
FIGURA 30: VIGA SOB ESFORÇOS CORTANTES E DE FLEXÃO. [26].....	36
FIGURA 31: VIGA SOB MOMENTO FLETOR PURO. [9].....	37
FIGURA 32: DIMENSÕES DA SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR DA VIGA. [9].....	37
FIGURA 33: DISTRIBUIÇÃO NA SEÇÃO TRANSVERSAL DAS TENSÕES NORMAIS. ....	38
FIGURA 34: DIAGRAMA TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE MATERIAL ELÁSTICO COM ENCRUAMENTO. [9].....	40
FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES PARA $M(P) < M_Y$ . [9].....	40



FIGURA 36: DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES PARA $M(P) = M_Y$ . [26].....	41
FIGURA 37: CURVA TENSÃO DE CARREGAMENTO X ALTURA DA SEÇÃO TRANSVERSAL PARA $M_Y < M(P) < M_P$ . [9] .....	42
FIGURA 38: CURVA TENSÃO DE CARREGAMENTO X ALTURA PARA $M(P) = M_P$ . [9] .....	43
FIGURA 39: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,4$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	48
FIGURA 40: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,386$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	50
FIGURA 41: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,35$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	52
FIGURA 42: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,30$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	54
FIGURA 43: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,25$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	56
FIGURA 44: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,172875$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	58
FIGURA 45: DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES PARA $P = 0,17$ M: (A) CARREGAMENTO, (B) DESCARREGAMENTO (SPRING-BACK) E (C) TENSÕES RESIDUAIS. ....	60

## Lista de Tabelas

TABELA 1: CAMADAS DO TUBO FLEXÍVEL. ....	23
TABELA 2: ETAPAS DE CURVAMENTO DO ARAME DA ARMADURA DE TRAÇÃO. [4].....	35
TABELA 3: DADOS DA SEÇÃO GEOMÉTRICA E PROPRIEDADES DO MATERIAL MODELADO. ....	45
TABELA 4: RAIOS DE CURVAMENTO UTILIZADOS. ....	45
TABELA 5: LIMITES ADMISSÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS. ....	61
TABELA 6: TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS GERADAS EM ARAMES DE ARMADURA DE RISER FLEXÍVEL EM FUNÇÃO DOS RAIOS DE CURVATURA EM PONTOS NOTÁVEIS. ....	61

## Sumário

agradecimentos .....	5
Resumo .....	6
abstract .....	7
Capítulo I – Introdução.....	12
Capítulo II - Revisão Bibliográfica .....	13
Embarcações.....	13
Plataformas Marítimas.....	13
II.1.1 Plataformas Marítimas Fixas.....	14
II.1.2 Plataformas Marítimas Móveis .....	16
II.1.3 Tubos Flexíveis.....	19
II.1.4 <i>Risers</i> e <i>Flowlines</i> .....	20
II.1.5 Camadas do Tubo Flexível .....	22
II.1.6 Conectores.....	24
II.1.7 Mecanismos de Falhas dos Tubos Flexíveis .....	25
II.1.8 Tensões Residuais .....	26
Capítulo III – Modelo Analítico .....	34
Considerações Iniciais do Modelo .....	34
Descritivo do Problema .....	34
Vigas em Flexão.....	36
Distribuição de Tensões Residuais .....	39
Hipóteses .....	45
Capítulo IV – Resultados .....	46
Raio de curvatura: 0,4m .....	47
Raio de curvatura: 0,386m .....	49
Raio de curvatura: 0,35m .....	51
Raio de curvatura: 0,3m .....	53
Raio de curvatura: 0,25 m .....	55
Raio de curvatura: 0,172875m .....	57
Raio de curvatura: 0,17 m .....	59
Capítulo V – Conclusão .....	62
Referência Bibliográfica .....	63

## Capítulo I – Introdução

No atual cenário mundial, cada vez mais se tem demandado pela exploração de recursos naturais não renováveis, para poder suprir a matriz energética oriunda de combustíveis fósseis, como o Petróleo. A demanda atual global desta matriz é enorme. Dessa maneira, a busca por novos campos de produção tem sido uma constante nos últimos anos. A descoberta desses novos campos, sobretudo em águas profundas e ultra profundas como o Campo de Tupi, Campo de Lula, Campo de Búzios, Campo do Roncador, Parque das Baleias, com 2200 m, 2156 m, 1940 m, 1730 m e 1300 m de lâmina d'água respectivamente, têm sido feitas rotineiramente. Nesses campos do pré sal, o petróleo é encontrado a profundidades que excedem 5000 m. Ou seja, houve um grande desenvolvimento tecnológico para extrair-se petróleo nessas condições de profundidade e temperatura.

No mercado de produção, muitos equipamentos submarinos são envolvidos nesse processo. Sistemas de Tubos Flexíveis e os Sistemas de Produtos Submarinos são os principais, realizando toda a comunicação e interface entre o poço e as plataformas. Os principais produtos de cada sistema podem ser descritos como os *risers*, *flowlines*, conectores – Sistema de Tubos Flexíveis; assim como Árvores de Natal Molhadas e *manifolds*, que são exemplos dos principais equipamentos dos sistemas de produtos submarinos.

O processo de fabricação dos tubos flexíveis pode ser dividido em dois estágios: o primeiro que consiste em montar as diversas camadas, dando forma ao tubo flexível (*Pipe Production*), e na segunda etapa, o de completação, sendo então montados os conectores em suas duas pontas (*Pipe Completion*). Além da montagem, em *Pipe Completion* também ocorre o rebobinamento dos tubos, a marcação decamétrica, assim como a tipagem do projeto, também os testes de aceitação de fabricação e embalagem final ao cliente.

Este trabalho é sobre o processo de montagem de conectores submarinos em *risers*, especificamente na camada de arames de tração, em que pode haver a geração de tensões residuais indesejadas. Como resultado final, este trabalho busca minimizar os efeitos das tensões residuais geradas no processo de montagem dos conectores, e conseqüentemente, reduzir a possível incidência de falhas em campo.

A preocupação das empresas produtoras, que fazem uso destes flexíveis no processo produtivo com essa camada de armadura, tem sido uma constante. Nos últimos anos, a Petrobras passou a exigir em suas especificações técnicas que o conector possibilitasse, mesmo que em operação, executar a avaliação se o anular está alagado, e com isso, novas tecnologias e mudanças no design dos flexíveis e conectores precisaram ser desenvolvidas. Portanto, é um assunto que recebe de fato muita atenção, e é um ponto crítico do processo que envolve a montagem dos conectores.

## Capítulo II - Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feito um relato do sistema de produção, desde a superfície com a exposição das principais embarcações e plataformas envolvidas no fluxo de produção, até os equipamentos submarinos, como eles se comunicam, se complementam e atuam em conjunto de forma a executar o processo produtivo de forma segura e eficiente.

### Embarcações

As embarcações têm funções primordiais no processo de produção. Elas são as responsáveis por realizar as instalações submarinas de árvores de natal molhadas, *manifolds*, lançamentos de *risers*, *flowlines*. É através dos usos destas embarcações que os reparos e manutenções das linhas são possíveis. Na Figura 1 é possível observar um PLSV executando uma atividade de lançamento de linha.



Figura 1: Embarcação de Lançamento e Instalação de *risers*. [15]

### Plataformas Marítimas

As plataformas marítimas são instalações industriais de produção localizadas em alto mar e são destinadas a realizar e viabilizar a exploração de petróleo e gás. O controle dos sistemas submarinos produtivos, perfuração, produção são executados nestas. Também ocorre a separação primária do óleo, em água, petróleo e gás. E por fim, ainda podem realizar a completação seca ou molhada do poço. [2]

Essas unidades podem ainda armazenar o óleo produzido, até que seja viabilizado o seu escoamento para navios aliviadores. Elas podem ser subdivididas em Plataformas Marítimas Fixas e Móveis.

## II.1.1 Plataformas Marítimas Fixas

As plataformas fixas são estruturas localizadas de forma permanente. Elas são unidades de perfuração ou de produção fixadas no leito marinho. Essa é uma de suas características – geralmente são utilizadas em uma lâmina d’água de até 300 metros, que acaba se tornando um limitante para utilização deste tipo de plataforma em poços mais profundos. Contudo, sua estabilidade acaba conferindo a característica de ser uma ótima escolha para completação seca, uma vez que os movimentos das plataformas são mínimos, devido a sua estrutura metálica fixada ao leito marinho. [2]

### II.1.1.1 Plataformas Jaqueta

Um exemplo deste tipo de estrutura é a plataforma “Jaqueta”. Construída em aço, possui uma vida útil compreendida entre 20 e 30 anos. Geralmente, devido ao seu grande fluxo de processamento, é projetada para atender a mais de um campo de exploração. Devido a esses fatores, é uma estrutura com projeto e custos operacionais e de fabricação elevados. Sendo assim considerada uma plataforma de alto investimento. A Figura 2 ilustra um exemplo desta plataforma.

Além disso, não é possível armazenar grandes quantidades de óleo originários na produção, assim sendo é demandado um escoamento direto (através de tubulações ou navios aliviadores).[2]



Figura 2: Plataforma Jaqueta. [16]

### II.1.1.2 Plataforma Torre Complacente

Possui estrutura semelhante a torre jaqueta, contudo sua base é mais estreita e flexível, conforme pode ser observado na Figura 3, o que confere maior capacidade a absorver deflexões, dessa maneira, aumentando a estabilidade a lâminas d'água superiores a 400 metros.



Figura 3: Torre Complacente. [17]

### II.1.1.3 Plataforma Autoelevável (ou Jack up)

As plataformas autoelevatórias são ancoradas no leito marinho por estruturas metálicas treliçadas. Elas possuem esse nome dada sua característica principal que é de poder regular sua altura frente a profundidade da lâmina de água do poço a ser explorado. A Figura 4 traz um exemplo de uma plataforma desta categoria. É um tipo de plataforma destinado a perfuração de poços, e opera em profundidades de até 150 metros. [2]



Figura 4: Plataforma autoelevável. [18]

#### II.1.1.4 Plataformas de Gravidade

Essas plataformas são fixadas no solo marinho, assim como as demais plataformas fixas. Suas características colunas de concreto, conforme pode ser observado na Figura 5, conferem à plataforma de gravidade altíssima estabilidade, não sendo necessária então a utilização de âncoras e sistemas de amarração.

Sua exploração pode ser dar em profundidades de até 400 metros de lâmina d'água. Assim como a plataforma de Jaqueta, essas plataformas conseguem realizar o escoamento da produção de óleo e gás por navios aliviadores ou dutos. Além disso, elas possuem maior capacidade para armazenamento interno da produção. Somando-se a essas atividades que são possíveis serem realizadas neste tipo de plataforma, pode-se acrescentar ainda a completação seca, devido também a sua estabilidade estrutural. [7]



Figura 5: Plataforma por Gravidade. [19]

#### II.1.2 Plataformas Marítimas Móveis

As plataformas marítimas móveis são embarcações que desempenham papel produtivo ou de apoio. Atuam diretamente na prospecção, extração, produção e/ou armazenagem do petróleo e gás produzido. Essas plataformas podem ser agrupadas em Semisubmersíveis, Auto eleváveis, Navios Sonda, Unidades de Pernas Tensionadas (“*Tension Leg*”), Unidades de Calado Profundo (“*Spar*”), Unidade Estacionária de Produção, Armazenagem e Transferência (FPSO), e de Armazenagem e Transferência (FSU). [2]



### II.1.2.1 Plataformas Semisubmersíveis

As plataformas semisubmersíveis são tidas como plataformas flutuantes, como mostrado na Figura 6. Diferentemente das fixas, elas possuem um sistema de ancoragem no leito marinho realizado por “torpedos-âncora”, amarras e guinchos. Elas também são instalações de produção, prospecção, perfuração e armazenamento de óleo e gás. Essas plataformas podem possuir sistema de propulsão próprio, e diferentemente das plataformas fixas, possuem maior versatilidade, podendo operar em águas profundas e ultra profundas. [7]



Figura 6: Plataforma Semisubmersível. [24]

### II.1.2.2 Navios Sonda

Os navios sonda, assim como as plataformas semissubmersíveis, são unidades flutuantes, e podem produzir, prospectar, armazenar e escoar o óleo produzido. Um exemplo dessa embarcação pode ser observado na Figura 7. Essas embarcações surgiram da necessidade de exploração em águas profundas e ultra profundas, oriundas das descobertas do pré sal, assim também como a exploração em poços no Golfo do México, Mar do Norte. Dessa forma, são responsáveis por ampliar a capacidade produtiva diária do campo, garantindo aderência a atual alta demanda por produção. [7]



Figura 7: Navio Sonda. [20]

### II.1.2.3 Unidades de Pernas Tensionadas (*Tension Leg*)

São plataformas flutuantes que podem exercer funções diversas como perfurações e produção de petróleo e gás, como na Figura 8. A diferença dessa plataforma para a semissubmersível é que esta fica ancorada por tendões de aço ao fundo do mar, e seus cabos de ancoragem ficam sempre tensionados. Assim, o movimento vertical da plataforma é minimizado, possibilitando então a completação seca do poço, facilitando o controle do fluxo de óleo, aumentando assim a segurança em todo o processo de produção, pressurização e selagem do poço.[7]

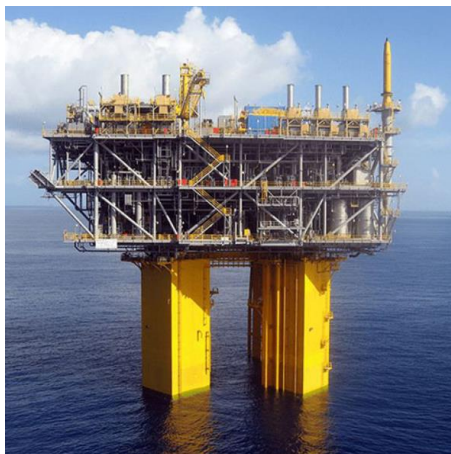


Figura 8: Unidade de Perna Tensionada. [21]

### II.1.2.4 Plataformas de Calado Profundo (SPAR)

Essas plataformas são utilizadas em exploração que ocorrem em águas profundas (até 1650 metros). A sua movimentação na vertical, dentre as plataformas flutuantes, é a menor. Isso ocorre devido ao seu calado profundo, o que confere estabilidade a toda estrutura - Figura 9. Dessa maneira, com toda essa estabilidade conferida pela sua propriedade geométrica estrutural, é possível realizar a completação seca de poços, assim como também a instalação de tubos rígidos para viabilizar a produção.[7]



Figura 9: Plataforma SPAR.[22]

### II.1.2.5 Unidades Estacionárias de Produção e Armazenamento (FPSO)

Estas plataformas possuem altíssima mobilidade, e podem ser utilizadas em lugares remotos, como mostrado na Figura 10. Sua capacidade de exploração em águas profundas e ultraprofundas é um de seus diferenciais. Atualmente é possível realizar a produção de óleo e gás utilizando essas FPSOs em profundidades superiores a 2000m. É possível ainda realizar o armazenamento do óleo produzido, o que se torna muito importante quando a produção está sendo feita em locais distantes da costa, onde a instalação de tubulações para escoamento da produção é inviável. Assim, posteriormente, a produção é escoada através de navios aliviadores. Já o gás é escoado por tubulações. Sua fixação ao solo marinho é realizada através de sistemas de âncoras.[7]



Figura 10: Unidade Estacionária de Produção, Armazenamento e Transferência (FPSO). [23]

### II.1.3 Tubos Flexíveis

Os tubos flexíveis são sistemas dinâmicos que realizam o escoamento e fluxo de fluídos de produção (Gás, óleo, água, químicos). São divididos em *risers*, *flowlines*, *jumpers* e umbilicais. Os flexíveis possuem uma vantagem bem característica frente aos tubos rígidos: o transporte. Em uma bobina pode contar cerca de 2.000m de linha flexível, e sua instalação é feita a partir de embarcações lançadoras. A vida útil da linha flexível é compreendida entre 25 a 30 anos. Na Figura 11 é possível observar um sistema de arranjo submarino com o uso de tubos flexíveis, os chamados *risers* (linhas suspensas), e *flowlines* (linhas assentadas no leito marinho).

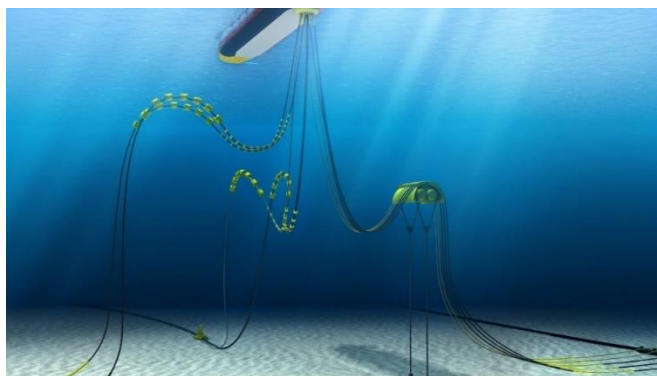


Figura 11: Sistema de Tubos Flexíveis [29]

Os *risers* flexíveis são compostos por camadas poliméricas e metálicas. As camadas poliméricas proporcionam vedação, evitando que o fluido de produção escoe pelas laterais do tubo, assim como busca-se evitar o ingresso da água do mar na sua região anular. Além da vedação, as camadas poliméricas podem proporcionar isolamento térmico, proteção contra a corrosão, assim como reduzir o atrito entre as camadas – neste último caso, tem-se as fitas adesivas anti desgaste que desempenham também este papel. As armaduras de tração desempenham funções estruturais no tubo. São dispostas ao longo do comprimento deste, durante a manufatura, em formato de hélice. Elas conferem ao tubo resistência a tração, garantindo assim que toda a linha suporte todo o carregamento estrutural e de produção.

#### **II.1.4 *Risers e Flowlines***

Os dutos flexíveis podem ser agrupados em *risers* e *flowlines*. Os *risers* são os dutos que sofrem esforços dinâmicos. Em geral eles estão na posição vertical no esquemático de produção, logo estão sujeitos aos esforços transferidos pelo movimento horizontal e vertical da UEP (Unidade Estacionária de Produção) assim como os esforços das correntes marinhas. Já os *flowlines* são dutos flexíveis que ficam na horizontal em contato com o leito marinho – eles não sofrem esforços dinâmicos, estão expostos apenas a carregamentos estáticos. *Risers* e *flowlines* podem executar o transporte de fluidos de produção (Gás, óleo e água).

##### **II.1.4.1 Instalações dos *Risers***

Devido às aplicações dinâmicas dos *risers*, no sistema de instalação podem ser utilizados conjuntos de catenárias livres ou boias/flutuadores (*lazy wave*) para alívio de carregamento vertical. A aplicação desses sistemas varia de acordo com a profundidade de lâmina d'água de produção. Para águas profundas utiliza-se sistemas de catenárias livres, por ser mais estável, contudo, em decorrência do longo trecho de lançamento do tubo, os carregamentos axiais se tornam elevados, dessa forma, a instalação de flutuadores é recomendada visando o alívio deste carregamento.

Em águas rasas o movimento da embarcação associado à movimentação do *riser* implica em uma movimentação do sistema indesejada, que pode ser atenuada pela instalação de flutuadores, de maneira a reduzir a transferência do movimento da embarcação para o *riser*, respeitando seu raio mínimo de curvatura. O empuxo realizado pelo fluido de entorno com relação aos flutuadores, proporciona esse alívio de carregamento.

#### II.1.4.1.1 Catenária Livre (*Free Hanging*)

Nessa configuração o *riser* flexível é assentado diretamente no leito marinho, como mostrado na Figura 12. É uma configuração simples, e por seus baixos custos de instalações, ela se torna interessante para muitas aplicações. No entanto, tem-se que considerar que nesta configuração de lançamento do *riser*, todo o esforço axial mecânico está concentrado no conector de topo que realiza a conexão da linha flexível com a UEP.

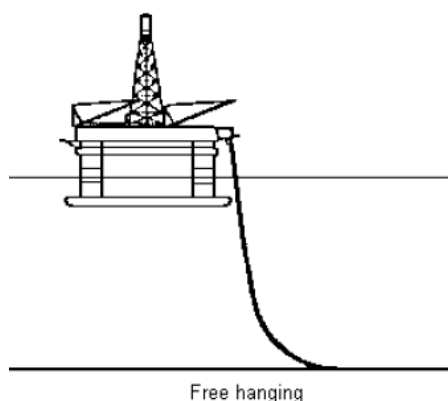


Figura 12: Catenária Livre. [5]

#### II.1.4.1.2 Esquemático de Instalação *Steep-S* e *Lazy-S*

Estas configurações de lançamento são caracterizadas pela presença de um flutuador fixo ancorado ao leito marinho. Este flutuador desempenha a função de apoio estático para a linha flexível ser assentada sobre, antes de alcançar a profundidade máxima do leito marinho. Assim, ele é responsável por reduzir o carregamento axial exercido sobre a conexão de topo.

A diferença entre essas duas configurações de instalação do *riser* reside em que no *Steep-S* a transição de direção vertical-horizontal do *riser* se dá devido a uma conexão fixa. Enquanto na configuração *Lazy-S* é adotado uma curvatura do próprio tubo com relação ao leito marinho de produção, como pode ser observado na Figura 13.

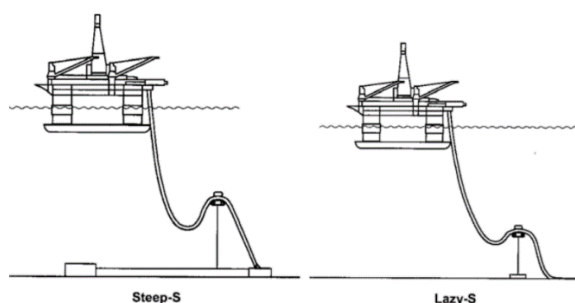


Figura 13: Configuração de Instalação *Steep-S* e *Lazy-S*. [5]

### II.1.4.1.3 Esquemático de Instalação *Steep Wave* e *Lazy Wave*

Neste esquemático existe a utilização de bóias na sessão intermediária do tubo, como mostrado na Figura 14. Diferentemente das configurações *Steep-S* e *Lazy-S*, não há a presença de um flutuador único ancorado no leito marinho. Neste esquemático são observados sistemas de bóias instaladas na seção intermediária do *riser*. A utilização destas boias visa a transferência da força de empuxo exercida pelo fluido ao tubo flexível, de maneira a reduzir o carregamento axial na conexão de topo.

Assim como na configuração *Steep-S*, a transição da seção vertical e horizontal ocorre por meio de uma conexão fixa. Já no esquemático de instalação *Lazy Wave* essa transição ocorre pela curvatura do flexível no leito marinho.

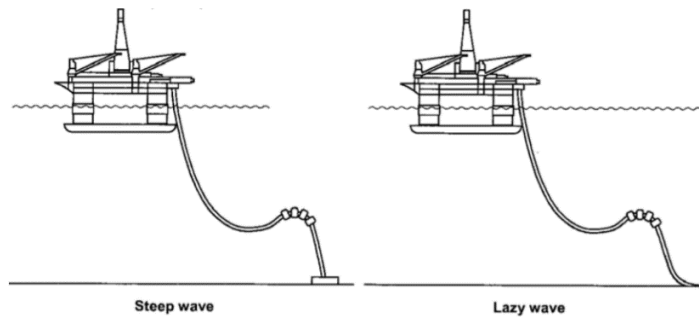


Figura 14: Esquemático de Instalação *Steep Wave* e *Lazy Wave*. [5]

### II.1.5 Camadas do Tubo Flexível

Os tubos flexíveis são feitos de diversas camadas metálicas que conferem propriedades estruturais, e camadas poliméricas que garantem a vedação e isolamento térmico do *bore* de produção, como mostrado na Figura 15.



Figura 15: Camadas do Tubo Flexível

Cada camada possui propriedades e aplicação específica, para um eficaz funcionamento da linha. Uma breve descrição a respeito da funcionalidade de cada camada pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Camadas do tubo flexível.

#	Camada	Descrição
1	Carcaça	Camada metálica responsável por suportar esforços de esmagamento (anti colapso).
2	Barreira de Pressão	Camada polimérica responsável por garantir a vedação da linha.
3	Armadura de Pressão	Camada metálica anti explosão. Responsável por resistir à pressão de produção do poço.
4	Camadas auxiliares	Camada de fita anti desgaste.
5	Armadura de Tração	Camada metálica responsável por conferir resistência de tração ao <i>riser</i> flexível.
6	Camada Externa	Camada polimérica externa.

#### II.1.5.1 *Flexbody* / Carcaça

A carcaça é a camada mais interna do flexível. Ela é responsável por resistir ao colapso, devido às condições extremas de produção de profundidade/pressão. Esta camada é formada por aço com alta soldabilidade, alta resistência mecânica e também alta resistência a corrosão. Usualmente é aplicado o aço super duplex para escolha de material desta camada.



Figura 16: Perfil de intertravamento da Carcaça. [5]

Esta camada é composta por segmentos conformados em perfil de travamento que são posteriormente soldados e unidos (soldas de inter-travamento) como mostrado na Figura 16. Na fábrica, esta é a primeira camada a ser produzida. Utiliza-se um gabarito na linha de produção nomeada “Carcass” que confere ao flexível o diâmetro interno escolhido (4”, 6” ou 8”) – em alguns casos podendo chegar a 9” ou diâmetros maiores.

#### II.1.5.2 Barreira de Pressão (*Flexbarrier*)

A *Flexbarrier* terá função de garantir a vedação da produção e a resistência à pressão externa exercida em decorrência da profundidade que o flexível se encontra. Além disso, essa camada desempenha tanto a função impermeabilizante, quanto de isolante térmica.

### II.1.5.3 Armadura de Pressão (*Flexlok*)

A camada *Flexlok* é responsável por conferir ao *riser* resistência de explosão. Ou seja, esta camada é responsável por garantir que as altas pressões de trabalho do poço não colapsarão a linha, de dentro para fora. Assim sendo, esta camada desempenha papel fundamental para garantir o funcionamento operacional da linha nas condições extremas de temperatura e pressão encontrados em produção.

### II.1.5.4 Camadas Auxiliares (Anti desgaste)

As camadas auxiliares são compostas de fitas adesivas que são instaladas ao longo de todo o tubo, após a manufatura das seguintes camadas: *Flexlok*, *Flextensile* 1 e *Flextensile* 2. Esta camada desempenha função de antidesgaste para as camadas metálicas.

### II.1.5.5 Armadura de Tração (*Flextensile*)

A armadura de tração é composta por uma série de arames que têm seção retangular (em geral), podendo variar para seção circular conforme a aplicação. Estes arames compõe a chamada camada *Flextensile* do tubo. Cada arame é instalado com uma angulação de aproximadamente 45° em formato helicoidal. Após a completa instalação da primeira camada, uma segunda camada é sobreposta à primeira no sentido contrário, visando anular o efeito de torção no tubo.

### II.1.5.6 Capa Externa

Esta camada polimérica é responsável por realizar a vedação do fluido proveniente do ambiente externo (ambiente submarino) em relação ao interior do tubo - o anular. Sua composição varia de acordo com a especificação do cliente, podendo ser composta por Nylon PA11/PA12 ou HDPE.

## II.1.6 Conectores

Os conectores são as terminações do tubo flexível. Cada segmento de *riser* ou *flowlines* possui um conector em cada extremidade. Eles são compostos por diversas partes, e são montados em etapas na fábrica. A Fig. 17 mostra um exemplo de um corte em um conector montado na extremidade de um *riser* flexível.

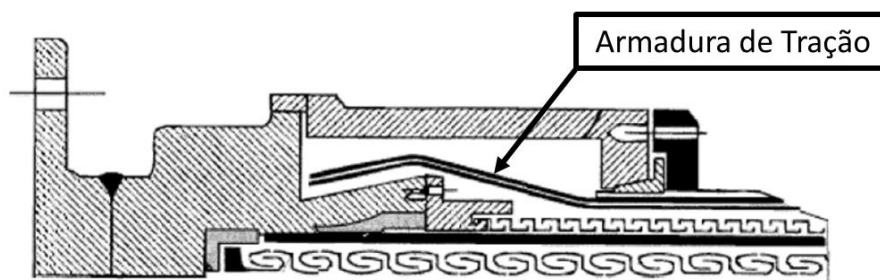


Figura 17: Vista lateral em corte de um Conector.[4]



Sua etapa de montagem é posterior à completa manufatura do tubo, portanto quando a montagem dos conectores é iniciada, o tubo está completamente fabricado; tendo inclusive já recebido as demarcações de tipagem de projeto e cotas de decametroagem.

A etapa de montagem do conector implica em realizar uma dissecação do tubo, na região onde o conector será montado. Assim, a montagem se dá pela sobreposição, camada por camada sobre o conector. O conector é projetado para realizar a perfeita interface com o tubo a ser conectado. O conector realiza a ligação mecânica do flexível com a plataforma (topo) e com Equipamentos Submarinos de Produção, como árvores de natal molhada e *manifolds*.

Diante de tamanha importância desta terminação do tubo, é possível visualizar a criticidade das operações que envolvem a sua montagem. Uma delas é a instalação do corpo do conector, no qual será ancorada a armadura de tração da linha flexível. Para realizar a sua instalação é necessário primeiro levantar os arames, os posicionando com ferramentas de processo, de forma a manter os arames metálicos curvados para trás, posteriormente estes arames são assentados sobre o conector.

Além dos desafios de realizar a montagem de todas as peças, dissecar todas as camadas e ir montando o conector sobre cada camada, o fator estanqueidade é uma constante ao longo de todo o processo. Assim, é crucial que o processo de montagem, e posteriormente os testes de aceitação de fábrica garantam que os terminais estão estanques. Esta condição se faz necessária devido às pressões de trabalho, e a profundidade a qual todo sistema estará exposto, para que não haja vazamentos nem do anular para o ambiente submarino, nem no sentido oposto, ou seja, que todos os mecanismos de vedação funcionem perfeitamente. Ao longo do processo de montagem todas as interfaces são testadas.

### **II.1.7 Mecanismos de Falhas dos Tubos Flexíveis**

A etapa de montagem dos conectores se torna crítica pois é necessário conformar os arames da armadura de tração, para que então os mesmos possam ser instalados sobre o corpo interno do conector. Considera-se que cada arame que compõe a camada da armadura de tração já possui tensões residuais oriundas da sua fabricação por laminação. Em seguida ocorre o bobinamento no tambor do fornecedor primário. Assim o arame de armadura é conformado e adquire certo raio de curvatura, de acordo com o diâmetro externo do “coil” escolhido para armazenamento.

Na fábrica deve ocorrer a troca de “coils”, pois a máquina armadora (responsável por instalar o arame no tubo) demanda uma bobina de carregamento específica, assim os arames passam pelo processo de desbobinamento/rebobinamento, de forma a atender a especificação de abastecimento da máquina armadora. Depois os arames de são instalados no tubo. O movimento circular da máquina da armadora, associado ao movimento linear do flexível confere a camada da armadura de tração no formato helicoidal.

Portanto, pode-se afirmar que muitas etapas de conformação são impostas aos arames de armadura, antes mesmo de iniciar a montagem do conector. Assim, as tensões residuais, que podem ter sido geradas em cada uma dessas etapas, podem se “somar”.

Os mecanismos de falhas de um tubo flexível podem ser diversos, pois devido ao processo de montagem, sobretudo do terminal de conectores, ser manual, é difícil estabelecer um padrão de montagens semelhantes. Por isso, diversos testes durante o processo, assim como testes de materiais que compõem as camadas do tubo flexível, são realizados. Um deles é o teste de H<sub>2</sub>, realizado no material que forma a armadura de tração. Especificações técnicas descritas pelo cliente, em concordância com as normas internacionais – como a API 17J, que regulamentam a operação de extração de petróleo por tubos flexíveis, determinam quais são os critérios aceitáveis ou não a serem fornecidos pela empresa que fabrica e fornece estes tubos flexíveis manufaturados.

A atmosfera de produção (extração do petróleo) é extremamente reativa. O fluido de produção é capaz de estar desempenhando papel nocivo à estrutura do tubo flexível, por isso é fundamental levar todos os parâmetros de operação em consideração na etapa de concepção de projetos. Em virtude de um estudo que a Petrobrás realizou, a NR-2409 foi desenvolvida. Nela estão descritos os principais tipos de falhas que podem ocorrer quando o tubo flexível se encontra em operação. De acordo com este estudo, o principal mecanismo de falha apontado está direcionado à camada da armadura de tração do tubo flexível, na região próxima ao local onde ela encontra-se ancorada ao conector. A falha é ocasionada em função do rompimento dos arames, devido a fadiga ocasionada pelos esforços trativos em conjunto com as tensões residuais existentes.

Esta região onde normalmente falha é a mesma onde ocorre todo o processo manual de levantamento e assentamento dos arames. Este trabalho visa estimar a distribuição de tensões residuais geradas nos arames durante o processo de montagem do conector.

### **II.1.8 Tensões Residuais**

Não é incomum a presença de tensões residuais em peças/estruturas submetidas a processos de fabricação de conformação mecânica e/ou soldagem. As tensões residuais podem atingir valores tão altos quanto o limite do escoamento do material. Em geral, estas tensões são adquiridas através de deformações elastoplásticas heterogêneas. Podem ser observadas estas deformações, por exemplo, no curvamento dos arames de armadura de tração dos tubos flexíveis, de forma a garantir o raio de curvatura definido para execução do processo.

Regiões plastificadas podem ocorrer em barras chatas retangulares, ou vigas, para momentos fletores que plastificam parcialmente a seção transversal. A Fig. 18 mostra uma viga submetida a momento fletor puro, e que com a retirada do mesmo, após o “*spring-back*”, resulta em uma viga em formato curvo.

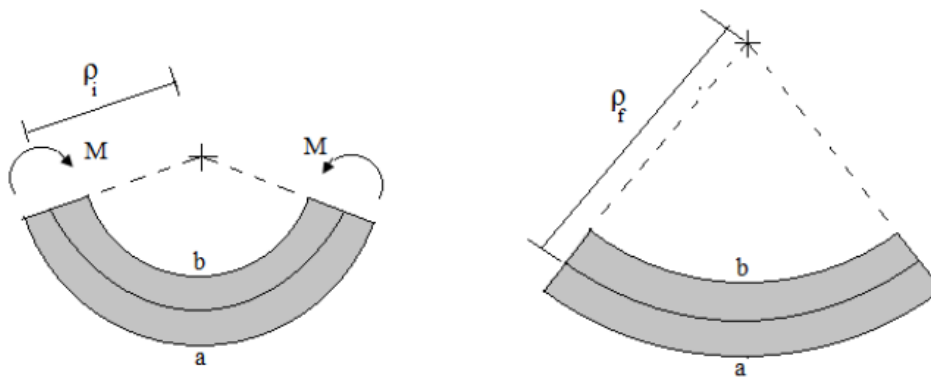


Figura 18: Viga solicitada em esforços de Flexão que plastificam parcialmente a seção transversal. [9]

Na Figura 19 mostra o acompanhamento dos pontos a e b da viga de material elástico perfeitamente plástico (EPP) da Fig. 18 em gráficos  $\sigma$  versus  $\epsilon$ .

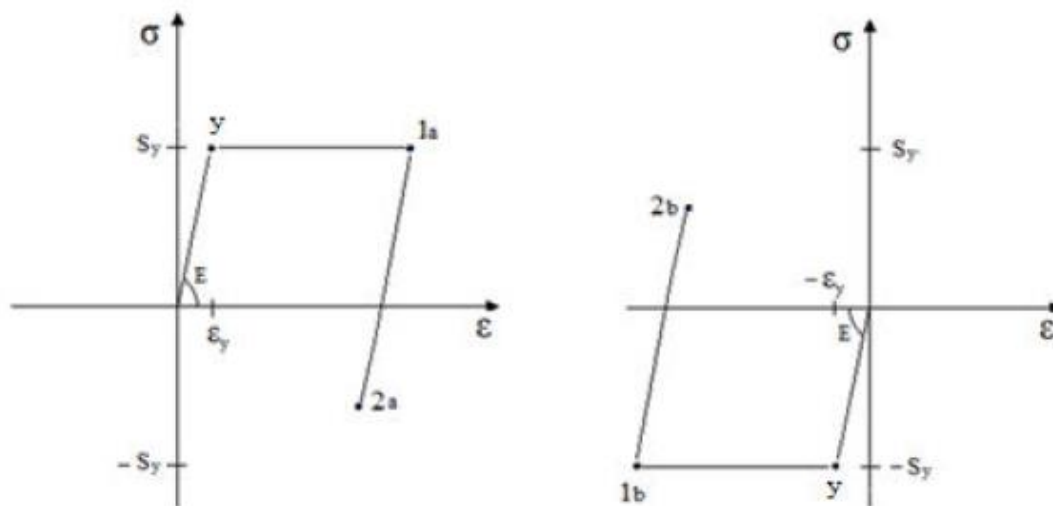


Figura 19: Distribuição de tensão x deformação nos pontos a e b de viga de material EPP sob flexão. [9]

A Figura 20 mostra diagramas equivalentes aos da Figura 19 para o material elástico com encruamento (ECE).

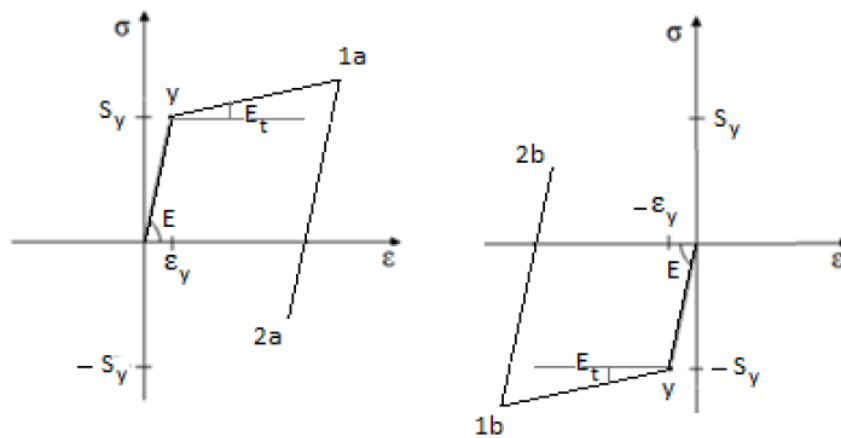


Figura 20: Distribuição de tensão x deformação nos pontos a e b do material ECE sob flexão. [9]

Através do método da superposição, pode ser realizada uma aproximação da distribuição das tensões residuais após determinado carregamento de flexão em uma viga, ou barra chata. Inicialmente é considerado o carregamento dado pelo momento fletor  $M$  aplicado, que plastifica parcialmente a seção transversal. Posteriormente este carregamento é removido (*spring-back*), resultando em uma distribuição de tensões/deformações residuais, como mostrado na Fig. 21, para as tensões e na Fig. 22 para as deformações.

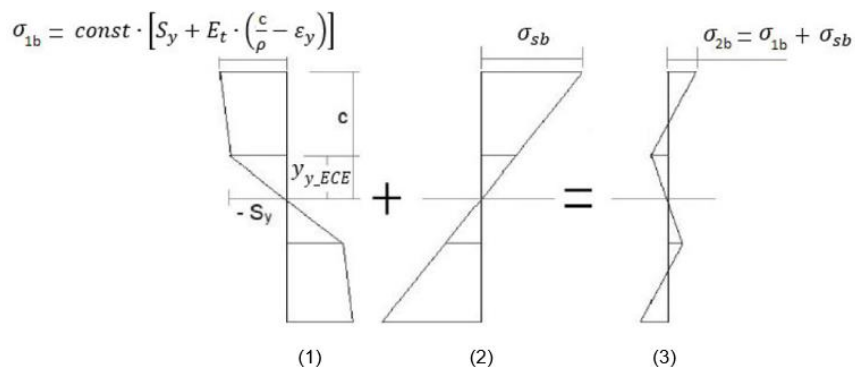


Figura 21: Tensões normais em uma viga de material ECE sob flexão. (1) carregamento; (2) descarregamento (*spring-back*) e (3) tensões residuais. [9]

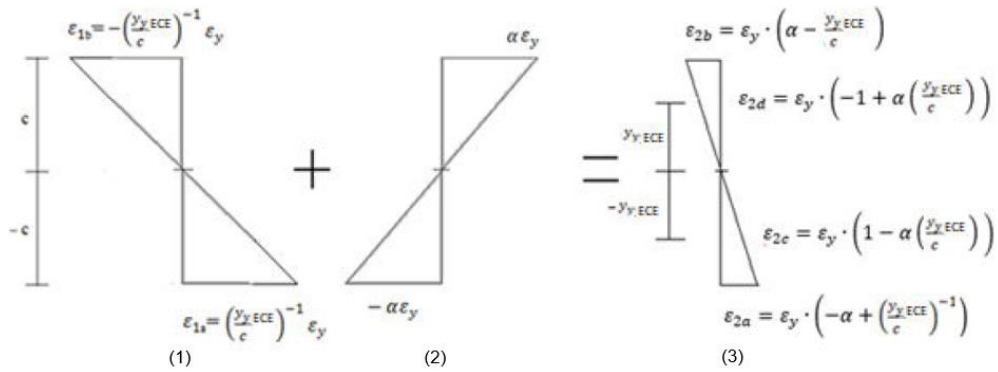


Figura 22: Deformações longitudinais em uma viga de material ECE sob flexão. (1) carregamento; (2) descarregamento (*spring-back*) e (3) deformações residuais.[9]

Onde  $S_y$  é a resistência ao escoamento do material,  $c$  a distância da linha neutra à um ponto na superfície da viga,  $y$  a distância da linha neutra à fronteira elasto-plástica e  $\alpha$  é um fator multiplicativo que mostra a relação entre o momento aplicado  $M$  e o momento que começa a escoar a seção transversal  $M_y$ .

### II.1.8.1 Aplicação Conceitual ao Estudo

O processo de terminação do flexível consiste na montagem do conector, que em uma etapa específica precisa curvar os arames de armadura, impondo determinado raio de curvatura  $\rho$ , como mostrado na Figura 23.

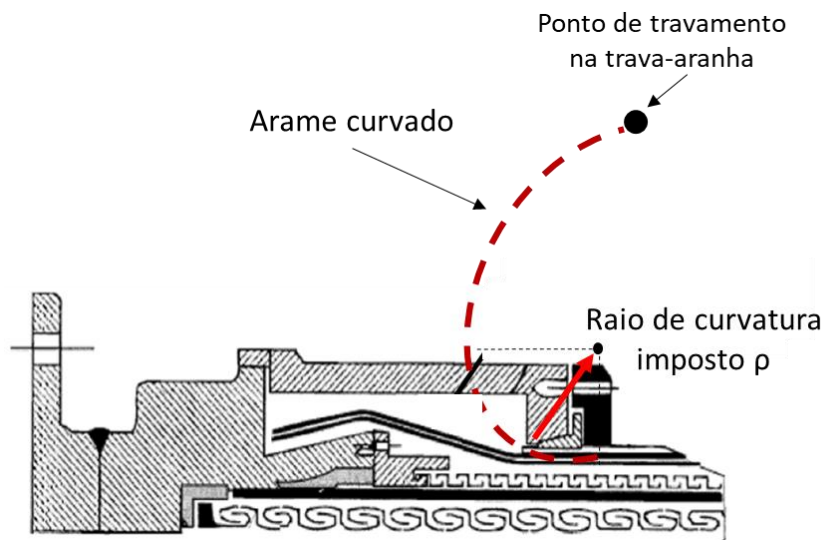


Figura 23: Arame submetido ao curvamento na montagem do conector.

O estudo acerca das tensões residuais geradas durante o processo de montagem do conector é de fundamental importância para evitar possíveis falhas de *risers* flexíveis em operação, além de conferir maior segurança a atividade petrolífera de produção. As tensões residuais são geradas na região destacada na Figura 24.

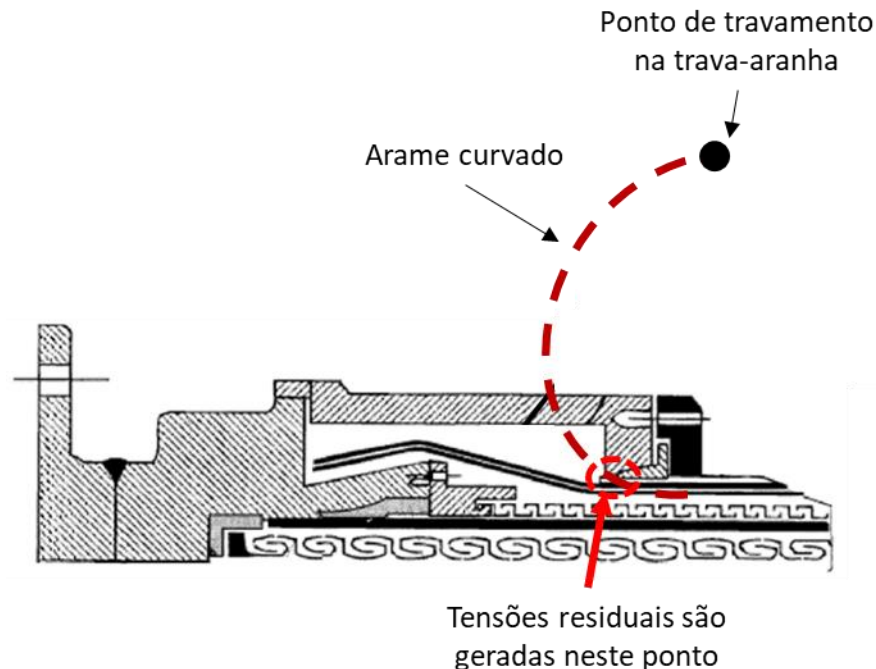


Figura 24: Ponto de formação das tensões residuais durante o curvamento do arame na montagem do conector.

### II.1.8.2 Formação das Tensões Residuais

As tensões residuais macroscópicas podem ser oriundas, segundo de diversos processos de fabricação e manufatura, como por exemplo laminação, dobramento, fundição, tratamentos térmicos, usinagem. Neste trabalho analisa-se a geração de tensões residuais na etapa de curvamento da armadura de tração na etapa de montagem dos conectores de *risers* flexíveis. [1]

### II.1.8.3 Técnicas para Medição das Tensões Residuais

De acordo com, as principais técnicas para medição das tensões residuais presentes em determinada estrutura são: difração de raios X, ultrassom, difração de nêutrons e as técnicas de alívio mecânico das tensões, como as técnicas do furo cego e da remoção de camadas. [1]

#### II.1.8.4 Extensometria

Embora a extensometria por si só não seja um método para medição experimental das tensões residuais, no caso de estruturas submetidas apenas a flexão, como os arames de armadura de *risers* flexíveis, é possível obter experimentalmente as deformações residuais e em sequência as tensões residuais. O processo consiste em instalar sensores de deformação (*strain gages*) na superfície de interesse da peça antes da imposição do carregamento, e monitorá-los até após o *spring-back*. [5]. Na Figura 25 são mostrados alguns exemplos de *strain gages*.

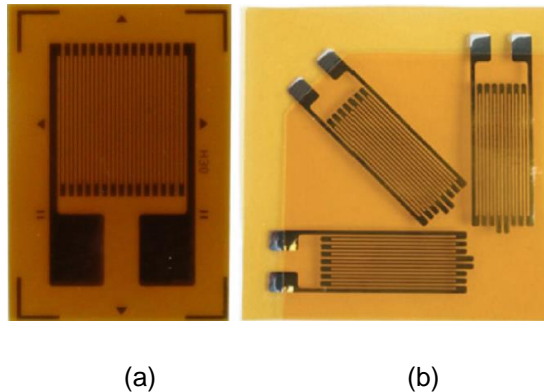


Figura 25: Extensômetros (*strain gages*) (a) uniaxial e (b) roseta. [10]

O *strain gage* relaciona as deformações da região em que está colado, com a variação de sua resistência, conforme mostrado na equação (II.1).

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon \quad (\text{II.1})$$

Sendo  $GF$  uma constante dos extensômetros (*gage fator*), normalmente em torno de 2, e  $\varepsilon$  é a deformação em m/m. A resistência elétrica  $R$  de um *strain gage* pode ser, por exemplo, de  $120\Omega$  ou de  $350\Omega$ . Utiliza-se a Ponte de Wheatstone na instrumentação dos extensômetros, pois consegue separar a variação da queda de tensão elétrica causada por  $\Delta R$ , da queda de tensão elétrica relativa a  $R$ . [4]. A Figura 26 mostra um desenho esquemático de ponte de Wheatstone para um único *strain gage* (1/4 de ponte).

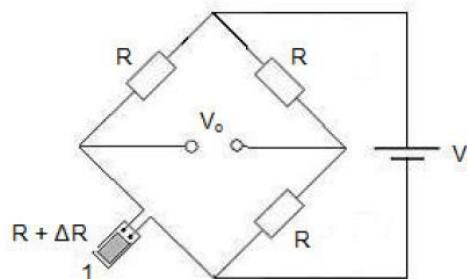


Figura 26: Circuito de 1/4 Ponte de Wheatstone. [5]

Pode-se ainda utilizar ¼ de Ponte com três fios, como mostrado na Figura 27, para minimizar erros relativos ao comprimento do cabo utilizado na extensometria. [4]

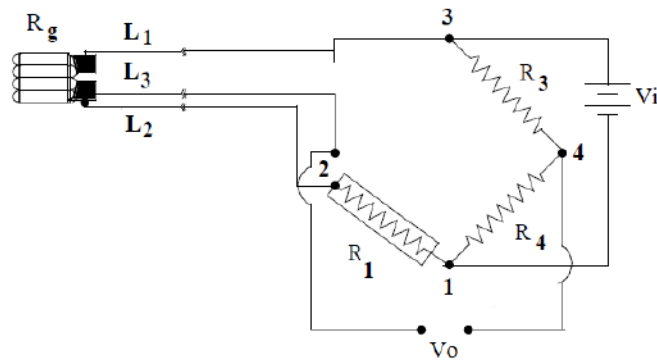


Figura 27: Circuito 1/4 de ponte com 3 fios.[5]

A equação (II.2) mostra a relação que existe entre a deformação  $\epsilon$  e a saída de sinal do circuito de ¼ de ponte de Wheatstone  $V_o$ , alimentada por uma fonte de tensão  $V_i$ .

$$\epsilon_{medido} \approx \frac{4}{GF \cdot V_i} \cdot V_o \quad (II.2)$$

### II.1.8.5 Método do Furo Cego

É considerado atualmente como um dos principais métodos experimentais para estimativa de tensões residuais, devido a sua simplicidade de execução, além de possuir seus procedimentos normalizados.

Inicialmente foi elaborado por J. Mathar em 1934 que utilizou a solução de Kirsh e o princípio da superposição no intuito de obter a quantificação das tensões por intermédio do alívio mecânico das tensões provocado pelo furo. Nesse processo de medição, alguns *strain gages* são utilizados para mensurar as deformações causadas pelo furo cego. Usualmente, opta-se pela utilização dos extensômetros tipo roseta, como pode ser visto na Figura 28. Este arranjo consiste em uma associação de *strain gages* com orientações e posições pré estabelecidas.

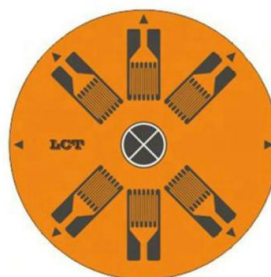


Figura 28: *Strain Gage* tipo Roseta.[8]



Feita a colagem da roseta, a furação é realizada no centro dela, e então observa-se a variação de resistência nos *strain gages* registrada em um sistema de aquisição de dados. [1].

Do ponto de vista matemático, visando modelar o sistema de medição de tensões residuais pelo método do furo cego, grande parte das vezes considera-se estado plano de tensões, isotropia, e homogeneidade do material, além do módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*. Lançando mão do método inicialmente utilizado por Kirsch e fazendo uso do princípio da superposição, chega-se a soluções analíticas exatas para campos de tensão uniaxial ou biaxial em placas finas infinitas, onde tem-se o furo passante e admite-se tensão constante com a profundidade. Assim, tomando por referência as relações constitutivas para a elasticidade linear, pode-se, através das deformações medidas, calcular as tensões principais e suas orientações. [1].

### **Capítulo III – Modelo Analítico**

Neste capítulo são mostradas as equações do modelo analítico utilizado para desenvolver este trabalho, através da utilização do Software Mathcad 15.0.

O objetivo do modelo é modelar a geração de tensões residuais em arame da camada da armadura dos tubos flexíveis de tração em função do raio de curvatura imposto no processo de montagem do conector.

#### **Considerações Iniciais do Modelo**

A imposição do raio de curvatura, e respectivo momento fletor gerado, é o carregamento usado no modelo analítico para simular a geração de tensões residuais nos arames de armadura de tração de *riser* flexível no processo de montagem do conector.

No assentamento do arame será desconsiderado o efeito de torção, decorrente do assentamento helicoidal. Este trabalho irá considerar apenas o esforço de flexão pura ao imprimir o raio de curvatura  $\rho$ . A resistência ao escoamento do arame da armadura é de  $S_y=1088$  MPa. A seção transversal do arame de armadura de *riser* flexível é de 12 mm x 4 mm. O encruamento do material é considerado.

#### **Descritivo do Problema**

As etapas de conformação a frio ao longo do processo de fabricação, por exemplo de arame de armadura de *riser* flexível, podem gerar tensões residuais que ficam “armazenadas” à estrutura do produto fabricado. Essas tensões residuais podem causar consequências adversas na estrutura, principalmente, quando elas são combinadas às cargas de trabalho, expostas à possibilidade de falha por fadiga com o decorrer do tempo.

Problemas adversos como corrosão sob tensão, para estruturas expostas a uma atmosfera corrosiva, em presença de enxofre, por exemplo, que faz parte da realidade dos desafios enfrentados na atualidade no meio do óleo e gás, pode tornar a presença de tensões residuais mais deletéria ainda.

Na Figura 29, é ilustrado o processo fabril de confecção desses tubos flexíveis, com ênfase na etapa de instalação da camada metálica que compõe a armadura.



Figura 29: Ilustração da etapa de fabricação da armadura de tração.[28]

De fato, após o processo de fabricação primário dos arames de armadura, pode-se levar em consideração que ele passa por pelo menos 7 etapas de curvamento, que envolvem bobinamento, desbobinamento, em sequência até o assentamento final do arame para terminação do conector - Tabela 2.

Tabela 2: Etapas de curvamento do arame da armadura de tração. [4]

Etapa		Aplicação do Momento
1ª Etapa	Bobinamento do arame após fabricação	Negativo
2ª Etapa	Desbobinamento do arame da bobina do fornecedor	Positivo
3ª Etapa	Bobinamento do arame na bobina da máquina armadora	Negativo
4ª Etapa	Desbobinamento do arame na máquina armadora	Positivo
5ª Etapa	Instalação do arame ao longo do tubo (Enrolamento)	Negativo
6ª Etapa	Levantamento do Arame + Travamento na Trava Aranha	Positivo
7ª Etapa	Assentamento do arame no Body	Negativo

No processo de fabricação do tubo flexível, a penúltima e última etapa consiste em executar a terminação da linha flexível. Nessa etapa os arames são levantados e travados nas ferramentas denominadas “trava aranha”. De forma a controlar o raio de curvatura do arame durante seu levantamento e posicionamento da trava aranha, é utilizado um colar de curvatura que possui um perfil de raio, que atende os requisitos de projeto específico do *riser* flexível, assim, funciona como um gabarito de curvatura, apresentando um raio de curvatura aceitável, superior ao raio mínimo admissível.

No presente trabalho, o modelo analítico proposto fará a estimativa da distribuição das tensões residuais nas seções transversais de arames de armadura de *riser* flexíveis durante o levantamento, e o posterior descarregamento (*spring-back*) necessários para o assentamento dos arames de armadura em sua posição de instalação. Os cálculos são feitos para diversos raios de curvatura e relacionados com a distribuição das tensões residuais geradas.

## Vigas em Flexão

Vigas submetidas a flexão podem ter duas solicitações de esforços ao longo de seu eixo longitudinal: Momento Fletor ( $M$ ) e Força Cortante ( $V$ ), conforme mostrado, esquematicamente, na Fig. 30. Neste trabalho não serão considerados os esforços cortantes nos arames de armadura, apenas o momento fletor gerados na imposição de curvamento no ato de levantar o arame para posterior montagem do conector.

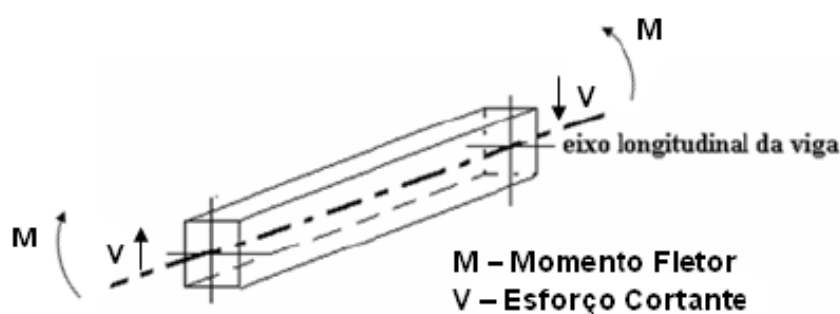


Figura 30: Viga sob esforços Cortantes e de Flexão. [26]

O carregamento é considerado como sendo de flexão pura, e o arame é considerado como uma barra-chata de seção transversal retangular. Ademais, o encruamento do material também será considerado. Na Fig. 30, observa-se a viga flexionando mediante a ação do binário fletor. Em função desses esforços fletores, a linha neutra que anteriormente era uma linha reta, toma o formato de curvado ilustrado na Figura 31. [26]

Ainda pode ser observado que a linha da face superior da viga reduz de comprimento quando a viga é flexionada ( $M > 0$ ) e de maneira oposta, a linha da face inferior da viga se torna mais longa, mediante o mesmo esforço de flexão. Isso mostra que a parte superior da viga está sofrendo tensão  $\sigma_x$  e deformação  $\epsilon_x$  negativas (compressão), e na parte inferior observa-se o inverso: tensão e deformação positivas (tração). A origem do sistema está situada sobre a linha neutra e a distância vertical de qualquer ponto presente na viga até a linha neutra é representado por  $y$ . [26]

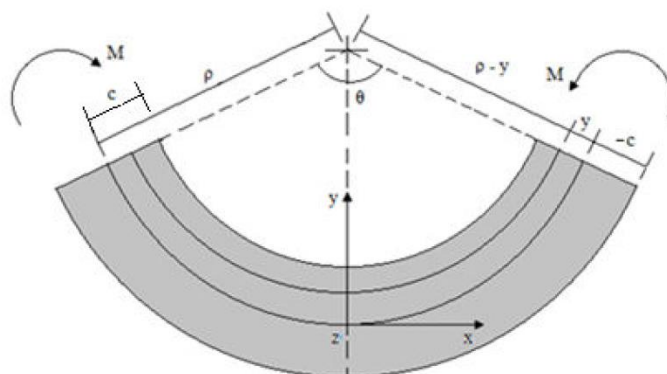


Figura 31: Viga sob momento fletor puro. [9]

Sendo  $\theta$  o ângulo formado em decorrência da aplicação dos momentos e pelo cruzamento de dois raios de curvatura, traçando-se as linhas a partir da extremidade da viga. O raio de curvatura é dado por  $\rho$  e  $L$  é o comprimento que passa pela linha neutra da viga, antes ( $L$ ) e após ( $L'$ ) a aplicação dos momentos.

$$L = \rho\theta \quad (\text{III.1})$$

$$L' = (\rho - y)\theta \quad (\text{III.2})$$

Assim, feitas algumas relações algébricas, e considerando  $y$  como sendo a distância de qualquer ponto ao longo da viga até a linha neutra, pode-se definir também a deformação linear  $\epsilon_x$  e a deformação máxima  $\epsilon_{\max}$ , onde essa deformação será correspondente ao valor máximo de  $y$ ,  $c$ , como mostrado na Figura 32.

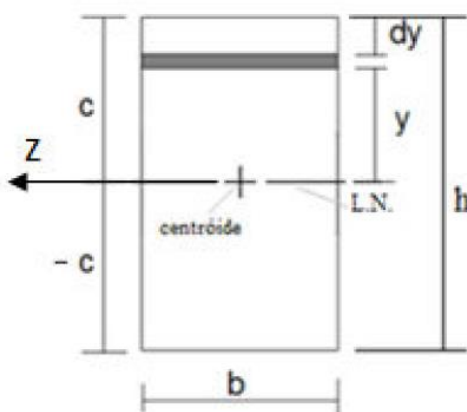


Figura 32: Dimensões da seção transversal retangular da viga. [9]

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad (\text{III.3})$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{c}{\rho} \quad (\text{III.4})$$

A distribuição de deformações em função de  $y$  pode ser obtida por (III.3) e (III.4):

$$\varepsilon_x(y) = -\frac{y}{c} \varepsilon_{max} \quad (\text{III.5})$$

No regime elástico, o momento fletor aplicado tem valores de tensões abaixo do limite de escoamento  $S_y$  e estão dentro do limite de proporcionalidade.

Pela Lei de Hooke tem-se:

$$\sigma_x(y) = E \varepsilon_x(y) \quad (\text{III.6})$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade e associando (III.5) a (III.6), obtêm-se:

$$\sigma_x(y) = -\frac{y}{c} \sigma_{max} \quad (\text{III.7})$$

Onde  $\sigma_{max}$  é o valor máximo de tensão. Na Figura 33 é mostrado a distribuição de tensões elástica na seção transversal.

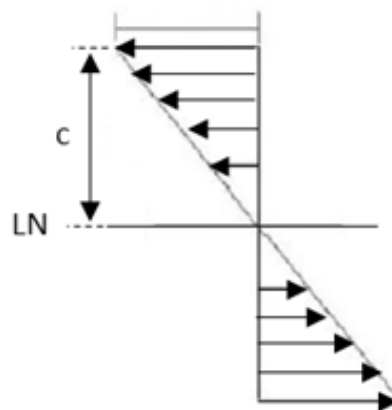


Figura 33: Distribuição na seção transversal das tensões normais.

A equação de equilíbrio dos momentos de flexão pode ser escrita como: [26]

$$\int y\sigma_x dA = -M \quad (\text{III.8})$$

Sabe-se que o momento estático da área de seção transversal em relação a linha neutra deve ser zero. Isto é, para barras submetidas a flexão pura, a linha neutra passa pelo centro geométrico da seção, enquanto as tensões permanecem em regime elástico. [26] A tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ) gerada é obtida a partir da seguinte equação:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (\text{III.9})$$

Sendo  $I$  o momento de inércia que para barras de seções retangulares é dado por:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{III.10})$$

Associando as equações (III.7) e (III.9) obtêm-se:

$$\sigma_x(y) = -\frac{My}{I} \quad (\text{III.11})$$

Essa é a conhecida equação da flexão em regime elástico [26].

### **Distribuição de Tensões Residuais**

Neste trabalho é considerada uma viga composta por material elástico com encruamento e submetida a flexão pura. Sua seção transversal tende a plastificar parcialmente. É utilizado para o desenvolvimento das equações o modelo de material elástico com encruamento, conforme Figura 34.

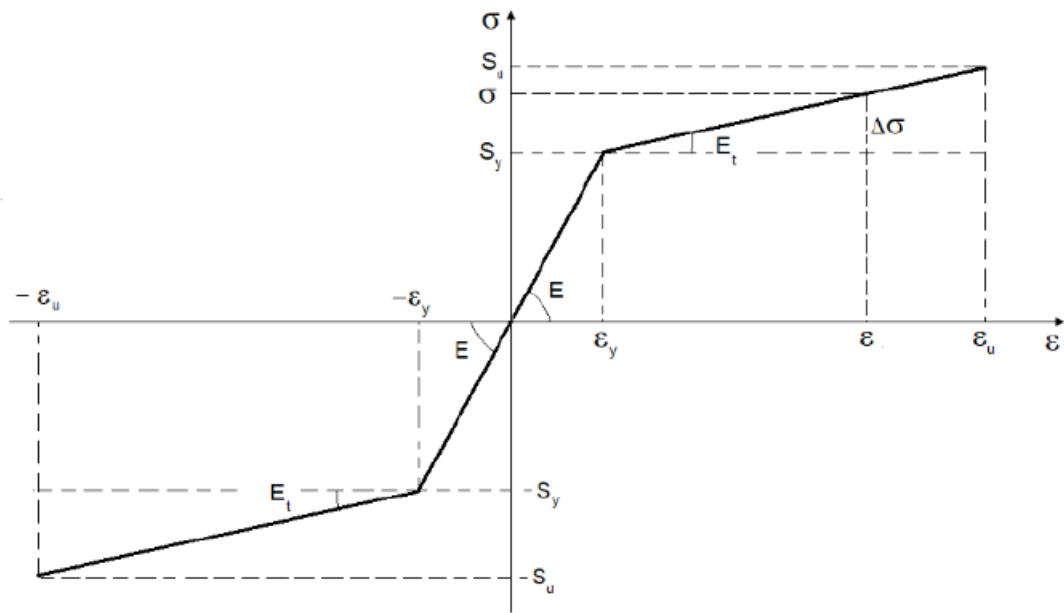


Figura 34: Diagrama tensão x deformação de material elástico com encruamento. [9]

A distribuição de tensões elásticas de flexão na seção transversal para  $M(\rho) < M_y$  (equação III.13) é mostrado na Fig. 35.

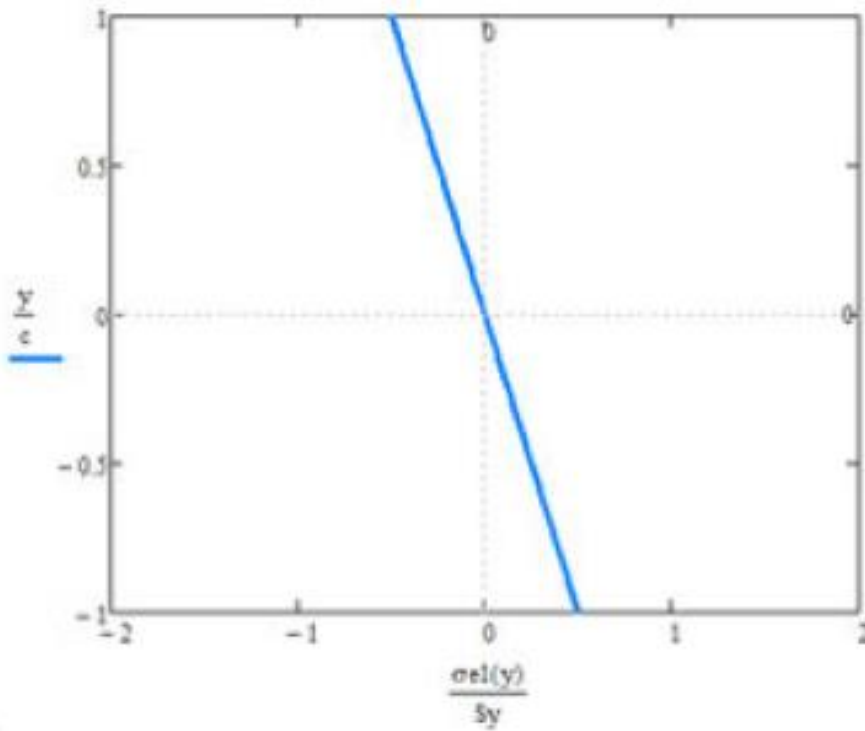


Figura 35: Distribuição das tensões para  $M(\rho) < M_y$ . [9]



Quando o momento fletor  $M$  aumenta, atingindo valor equivalente ao momento fletor de início de escoamento  $M_y$ , a tensão normal alcança o valor da tensão de escoamento  $S_y$ . Assim, pode-se observar na Figura 36 a distribuição de tensões.

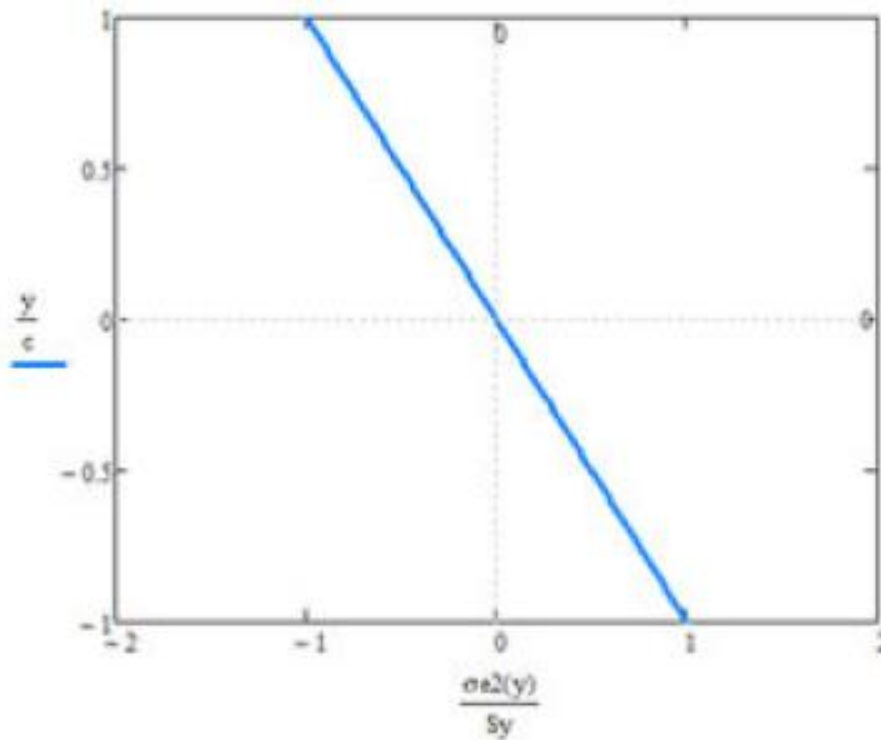


Figura 36: Distribuição das tensões para  $M(\rho) = M_y$ . [26]

Manipulando-se a equação III.11 pode-se obter a seguinte expressão para o momento de escoamento  $M_y$ .

$$M_y = \frac{I \cdot S_y}{c} \quad (\text{III.12})$$

Sendo  $M_y$  o momento elástico. Assim, tendo em vista a seção retangular considerada, outra equação de  $M_y$  e uma equação de  $M_p$  (momento plástico) são dados por:

$$M_y = \frac{2}{3} bc^2 S_y \quad (\text{III.13})$$

$$M_p = bc^2 S_y \quad (\text{III.14})$$

Ao aumentar-se ainda mais o momento fletor exercido na viga, ultrapassando  $M_y$ , já é possível observar o evento de plastificação parcial na viga, como mostrado na Figura 37.

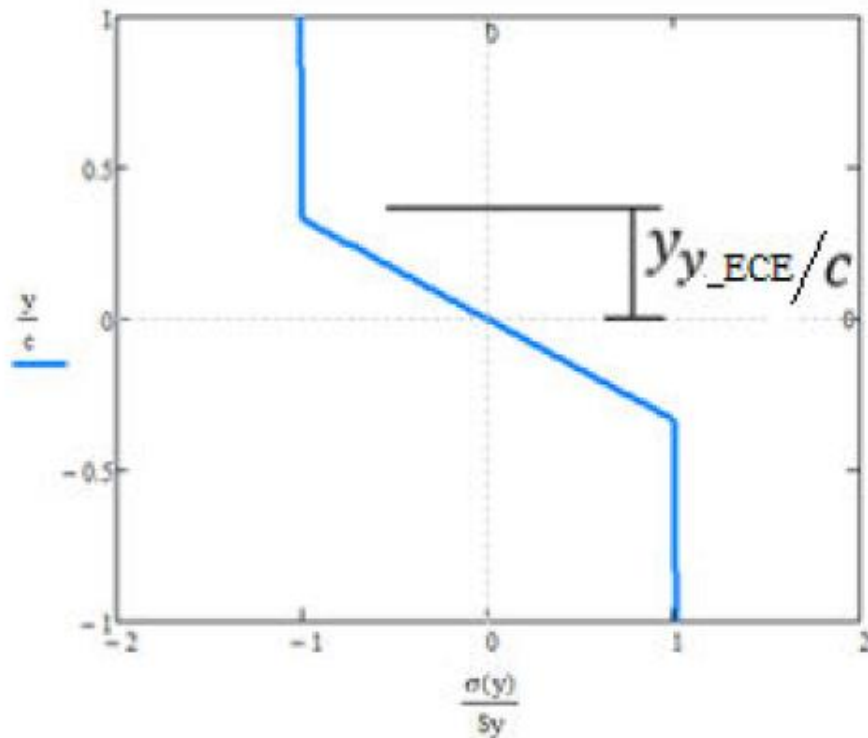


Figura 37: Curva tensão de carregamento x altura da seção transversal para  $M_y < M(\rho) < M_p$ . [9]

Entre as áreas plastificadas, tem-se um núcleo elástico, onde a tensão varia linearmente. Essa região é delimitada por  $-y_{y\_ECE}$  e  $+y_{y\_ECE}$ .

$$\sigma_{ECE}(\rho, y) = - \frac{y}{y_{y\_ECE}} S_y \quad (\text{III.15})$$

$$y_{y\_ECE}(\rho) = \varepsilon_y \cdot \rho \quad (\text{III.16})$$

Onde,  $\varepsilon_y$  a deformação de escoamento. Quando o momento fletor assume valores maiores, assumindo o valor máximo  $M = M_p$ , observa-se que a região plastificada ganha maior proporção,  $y_{y\_ECE}$  tendendo a zero, como mostrado na Figura 38.

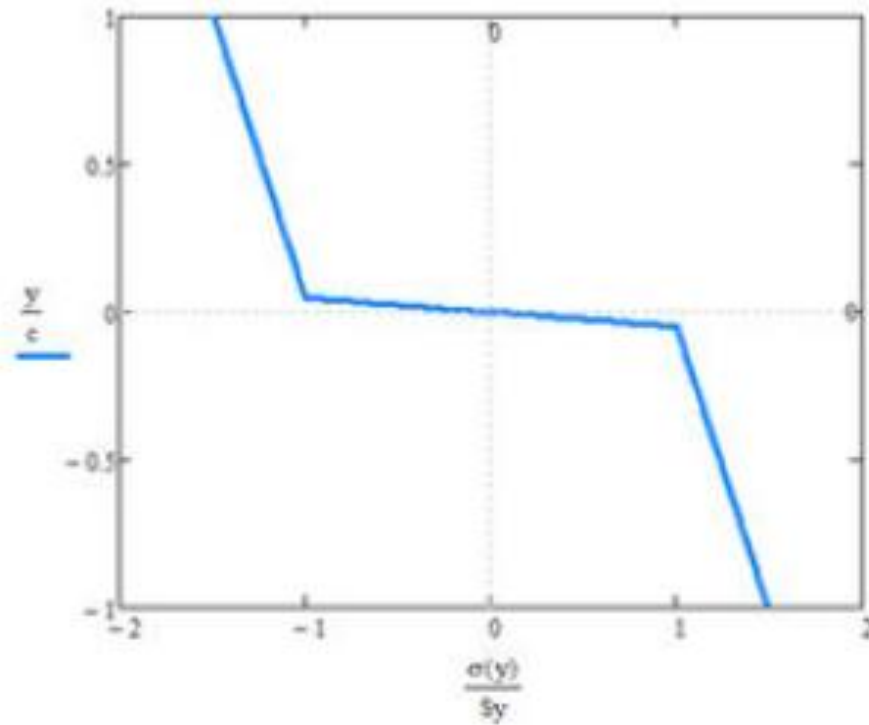


Figura 38: Curva tensão de carregamento x altura para  $M(\rho) = M_p$ . [9]

A partir da equação III.4, obtêm-se a seguinte relação entre raio de curvatura ( $\rho$ ) e deformação máxima ( $\varepsilon_{max}$ ):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_{max}}{c} \quad (III.17)$$

Da equação III.18, estima-se a máxima tensão ( $\sigma_{max}$ ):

$$\sigma_{max} = E \cdot \varepsilon_{max} \quad (III.18)$$

Substituindo III.18 e III.9 em III.17, obtêm-se a relação entre o raio de curvatura ( $\rho$ ) e o momento aplicado ( $M$ ):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (III.19)$$

Para o momento  $M$  ( $M_y \leq M \leq M_p$ ) pode-se estabelecer a seguinte equação de equilíbrio:

$$M(y_{y_{ECE}}) = 2 \left[ \int_0^{y_{y_{ECE}}} y \left( \frac{y}{y_{y_{ECE}}} \cdot \sigma_y \right) b dy + \int_{y_{y_{ECE}}}^c y \left( S_y + E_t \cdot \left( \frac{y}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right) b dy \right] \quad (III.20)$$

Após algumas manipulações algébricas, tendo em vista a substituição da equação III.13 em III.20, para  $(M_y \leq M \leq M_p)$ , têm-se:

$$M(y_{y_{ECE}}) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{y_{y_{ECE}}}{c} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{y_{y_{ECE}}}{c} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad (\text{III.21})$$

Quando o momento  $M(y_{y_{ECE}})$  for igual a  $M_y$ , momento elástico máximo, a substituição dos valores de  $y_{y_{ECE}}$  e  $\rho$  deve ocorrer ( $y_{y_{ECE}} = c$  e  $\rho = \rho_y$ ) na equação III.16. Onde  $\rho_y$  é o raio de curvatura no momento elástico máximo.

$$c = \varepsilon_y \cdot \rho_y \quad (\text{III.22})$$

Comparando-se a equação III.16 em III.22, têm-se:

$$\frac{\rho}{\rho_y} = \frac{y_{y_{ECE}}}{c} \quad (\text{III.23})$$

Ao substituir a equação III.23 em III.21 consegue-se obter uma relação entre o raio de curvatura ( $\rho$ ) e o momento gerado na conformação do arame da armadura de tração ( $M(\rho)$ ) para  $\rho \leq \rho_y$  e  $M_y \leq M \leq M_p$ .

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad (\text{III.24})$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad (\text{III.25})$$

Substituindo-se na equação III.19  $M$  por  $M_y$ , obtém-se o menor raio de curvatura ( $\rho_y$ ) que a estrutura pode ser curvada e se manter no regime elástico.

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} \quad (\text{III.26})$$

O raio de curvatura final, após o descarregamento, pode ser encontrado com a seguinte equação:

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left( \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right) \quad (\text{III.27})$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} \quad (\text{III.28})$$

## Hipóteses

Algumas condições foram admitidas ao modelo tratado neste trabalho. Não é considerado nenhum tipo de tensão residual proveniente no processo de fabricação, ou de armazenamento dos arames da armadura de tração. Assim sendo, as tensões residuais admitidas neste estudo são originadas no processo de montagem do conector no *riser* flexível. Além disso, não entra no modelo a disposição helicoidal da camada ao longo do comprimento do *riser* flexível. A Tabela 3 mostra alguns dados da seção geométrica e de propriedades do material do arame de armadura de *riser* flexível utilizado neste trabalho.

Tabela 3: Dados da seção geométrica e propriedades do material modelado.

$S_y$ [MPa]	$S_{ut}$ [MPa]	$b$ [m]	$h$ [m]	$c$ [m]	$E$ [MPa]	$E_t$ [MPa]
1088	1237	0,012	0,004	0,002	$210 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^3$

O modelo irá analisar o carregamento e formação de tensões residuais para diferentes cenários de  $\rho$  imposto. Os raios de curvatura usados no modelo foram definidos de forma a aproximar o modelo da realidade da montagem do conector no *riser* flexível. É esperado que quanto maior for o raio, melhor, pois o curvamento poderia até ocorrer no regime elástico. Contudo, isso não retrata a realidade, onde é necessário que seja imposto um raio de curvatura relativamente pequeno, que é menor que o raio mínimo para se trabalhar no regime elástico, o  $\rho_y$ . Na Tabela 4, observa-se a lista de raios de curvatura utilizados no modelo analítico.

Tabela 4: Raios de curvamento utilizados.

$\rho$ imposto [m]
0,4
0,386
0,35
0,3
0,25
0,172875
0,17

## Capítulo IV – Resultados

Os resultados encontrados neste estudo foram provenientes do modelo analítico descrito neste trabalho, considerando todas as hipóteses e condições de contorno que definem o problema. Esses valores têm o objetivo de realizar um estudo de como o arame de armadura de *riser* flexível se comporta frente aos curvamentos impostos para montagem do conector na extremidade de um *riser* flexível. Foram, então, simulados o carregamento do arame por diversos raios de curvatura impostos.

A distribuição de tensão residual ao longo da seção transversal de um arame de armadura de *riser* flexível  $\sigma_{2b}$  em função de um raio de curvatura imposto ( $\rho$ ) é dado pela soma da tensão de carregamento  $\sigma_{1b}$  e a tensão de *spring-back*  $\sigma_{sb}$ :

$$\sigma_{2b} = \sigma_{1b} + \sigma_{sb} \quad (\text{IV.1})$$

A tensão de carregamento, no ponto  $c$ , pode ser definida como:

$$\sigma_{1b} = \sigma_y + E_t \left( \frac{c}{\rho} - \varepsilon_y \right) \quad (\text{IV.2})$$

A tensão máxima no *spring-back*, no ponto  $c$ , pode ser estimada, para o  $\rho$  imposto, como:

$$\sigma_{sb}(\rho, y) = \frac{E \cdot c}{\rho} \quad (\text{IV.3})$$

Assim, utilizando IV.1, IV.2 e IV.3, a tensão residual é obtida pela equação IV.4.

$$\sigma_{2b}(\rho, y) = \left[ \sigma_y + E_t \left( \frac{c}{\rho} - \varepsilon_y \right) \right] + \left( \frac{E \cdot c}{\rho} \right) \quad (\text{IV.4})$$

A seguir os diversos cálculos executados são explicitamente mostrados.

### Raio de curvatura: 0,4m

O raio de curvatura imposto de 0,4 m é maior que  $\rho_y$ .

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3} (b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,034 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$yy = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 0,002 \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{yy}{c} \right)^{-1} \right] = -9,932 \times 10^{-6}$$

$$\frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{1b_c} = \frac{-(E \cdot c)}{\rho} = -1050 \text{ MPa}$$

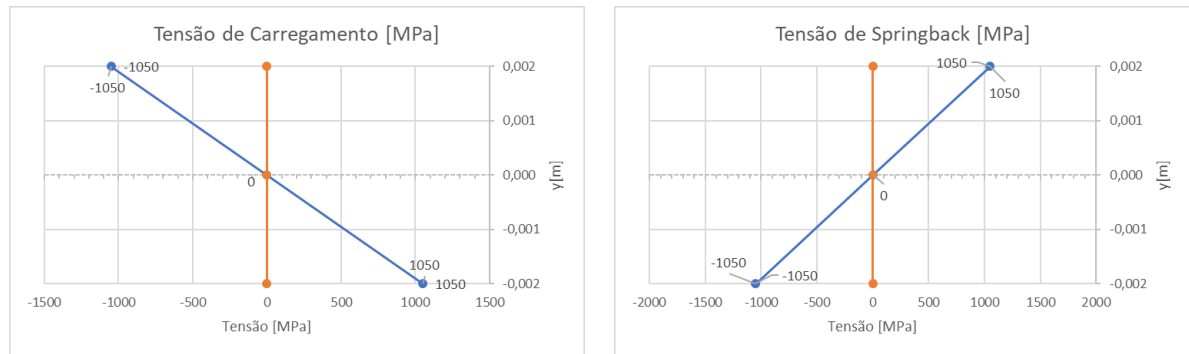
$$\sigma_{1b_{yy}} = \frac{-(E \cdot c)}{\rho} = -1050 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb_c} = \frac{(E \cdot c)}{\rho} = 1050 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb_{yy}} = \frac{(E \cdot c)}{\rho} = 1050 \text{ MPa}$$

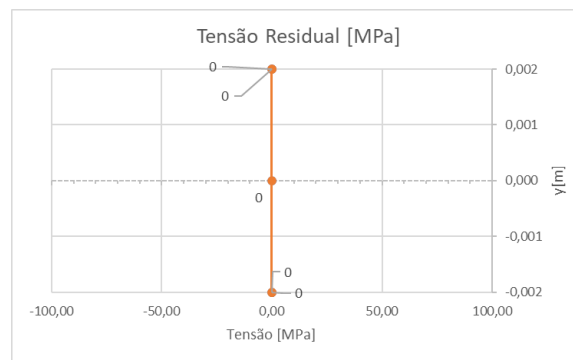
$$\sigma_{2b_c} = \sigma_{1b_c} + \sigma_{sb_c} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b_{yy}} = \sigma_{1b_{yy}} + \sigma_{sb_{yy}} = 0 \text{ MPa}$$



(a)

(b)



(c)

Figura 39: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,4$  m: (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

Para o raio de curvatura imposto de 0,4 m é maior que  $\rho_y$ , portanto não há a formação de tensões residuais na estrutura conforme mostra a Figura 39.c.



### Raio de curvatura: 0,386m

O raio de curvatura imposto de 0,386 m é igual a  $\rho_y$ .

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3} (b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 1,813 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -45,115 \times 10^{-12}$$

$$\sigma_{1b\_c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1b\_yy} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_c} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_c} = \sigma_{1b\_c} + \sigma_{sb\_c} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_yy} = \sigma_{1b\_yy} + \sigma_{sb\_yy} = 0 \text{ MPa}$$

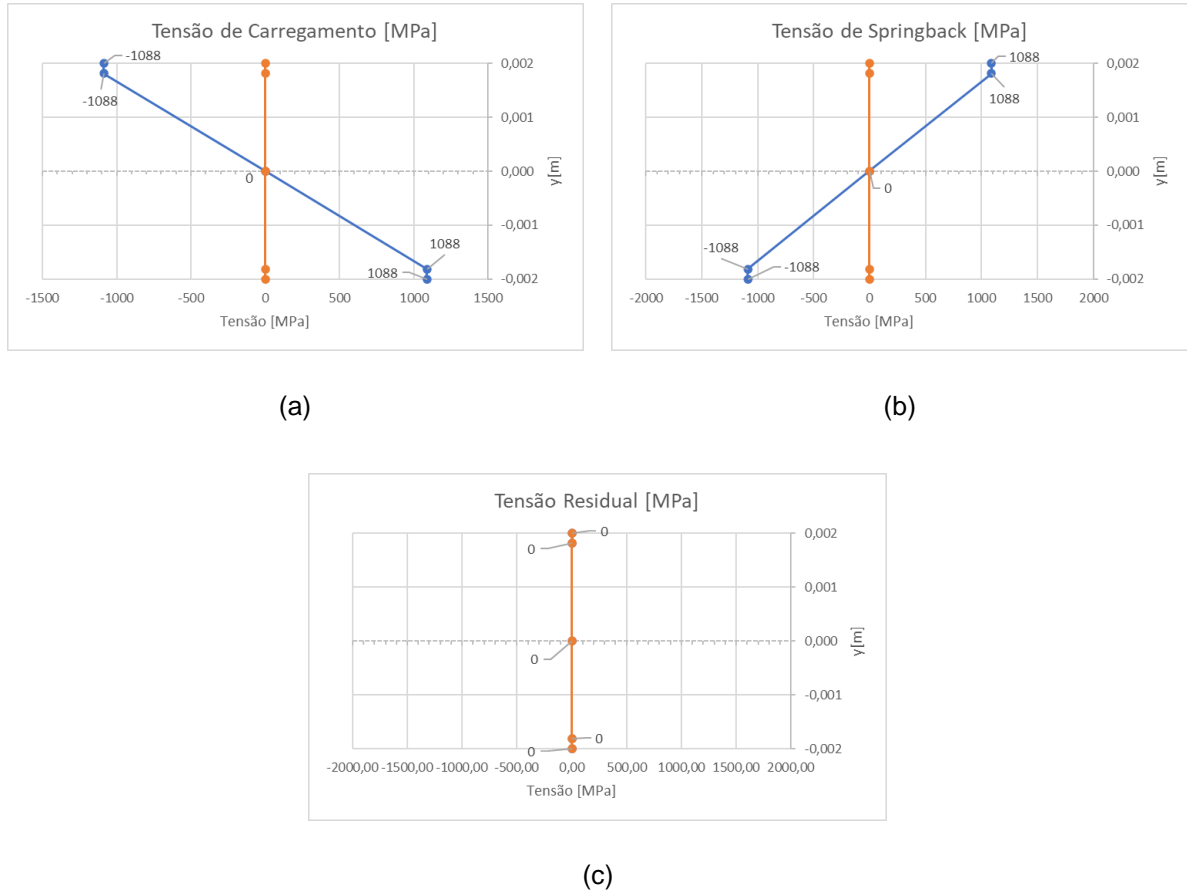


Figura 40: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,386\text{m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

Este curvamento foi exatamente no raio de curvatura, que é o ponto limite para se trabalhar no regime elástico,  $\rho_y$ . Em função disso, a tensão de carregamento em -c e em +c, ficou igual ao limite de escoamento do material, como pode ser observado na Figura 40. Dessa forma, também não houve a geração de tensões residuais.

### Raio de curvatura: 0,35m

O raio de curvatura imposto de 0,35 m já é menor que  $\rho_y$ .

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3}(b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,038 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha = \frac{M(\rho)}{M_y} = 1,089$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 1,813 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -72,591 \times 10^{-6}$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} = 27,552 \text{ m}$$

$$\sigma_{1b_c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1089 \text{ MPa}$$

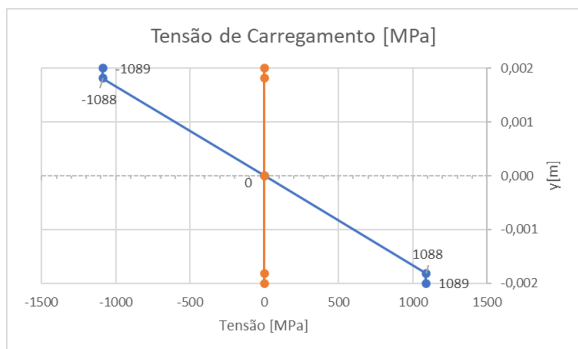
$$\sigma_{1b_{yy}} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb_c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1185 \text{ MPa}$$

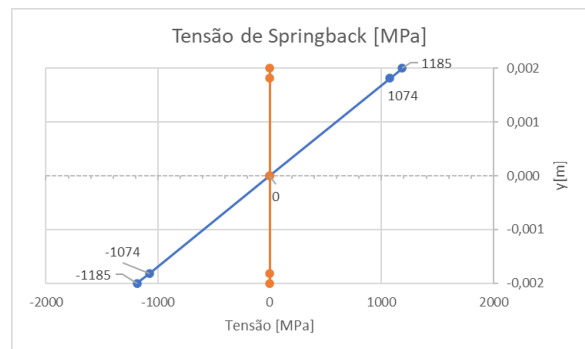
$$\sigma_{sb\_yy} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 1074 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_c} = \sigma_{1b\_c} + \sigma_{sb\_c} = 95,8 \text{ MPa}$$

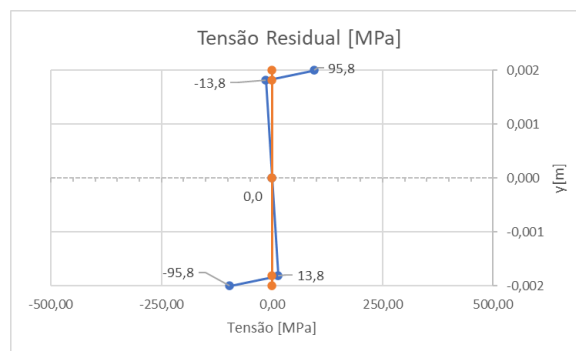
$$\sigma_{2b\_yy} = \sigma_{1b\_yy} + \sigma_{sb\_yy} = -13,8 \text{ MPa}$$



(a)



(b)



(c)

Figura 41: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,35 \text{ m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

Com este raio de curvamento imposto, observou-se na Figura 41 que a tensão de carregamento ultrapassou o limite de escoamento do material, entrando dessa forma no regime plástico. Assim sendo, houve a formação de tensões residuais no material.

### Raio de curvatura: 0,3m

O raio de curvatura imposto de 0,3 m continua menor que  $\rho_y$ .

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3}(b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,042 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 1,552 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -464,978 \times 10^{-6}$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} = 4,3 \text{ m}$$

$$\sigma_{1b_c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1091 \text{ MPa}$$

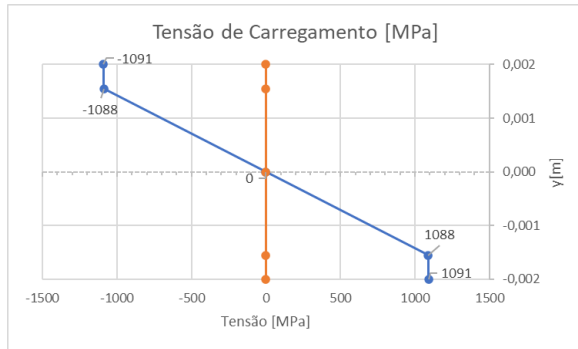
$$\sigma_{1b_{yy}} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb_c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1304 \text{ MPa}$$

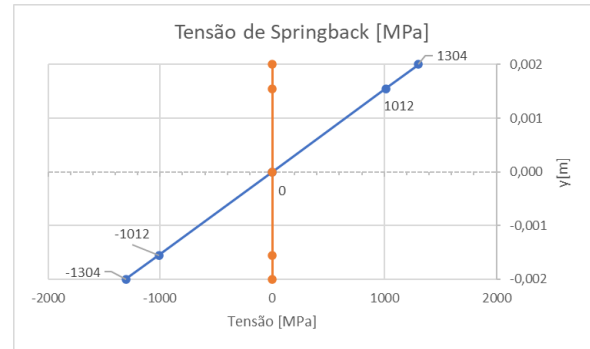
$$\sigma_{sb_{yy}} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 1012 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b_c} = \sigma_{1b_c} + \sigma_{sb_c} = 213,3 \text{ MPa}$$

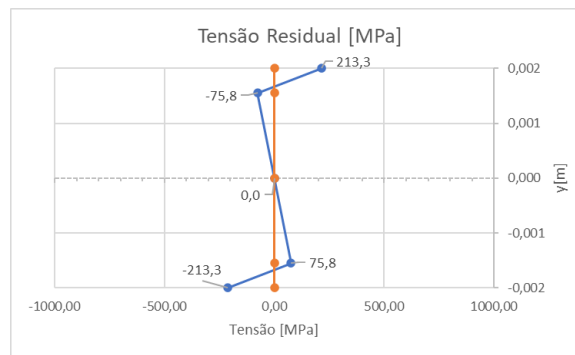
$$\sigma_{2b_{yy}} = \sigma_{1b_{yy}} + \sigma_{sb_{yy}} = -75,8 \text{ MPa}$$



(a)



(b)



(c)

Figura 42: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,30 \text{ m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

Para este raio de curvamento imposto, observou-se na Figura 42 a formação de tensões residuais ainda maiores, o que leva a entender que quanto menor o raio de curvatura, maior as tensões de carregamentos, *spring-back*, e conseqüentemente, maiores são as tensões residuais formadas.

### Raio de curvatura: 0,25 m

O raio de curvatura imposto de 0,25 m continua menor que  $\rho_y$ .

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3} (b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,045 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha = \frac{M(\rho)}{M_y} = 1,293$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 1,287 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -1,351 \times 10^{-3}$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} = 1,481 \text{ m}$$

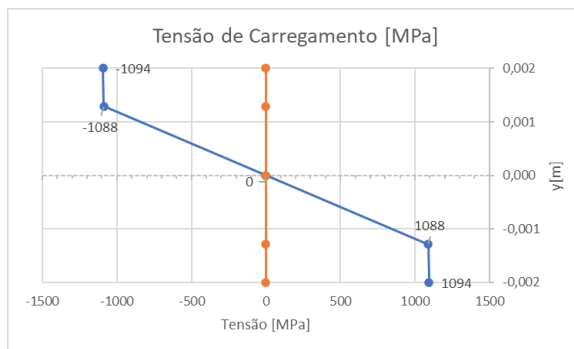
$$\sigma_{1b_c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1094 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1b_{yy}} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

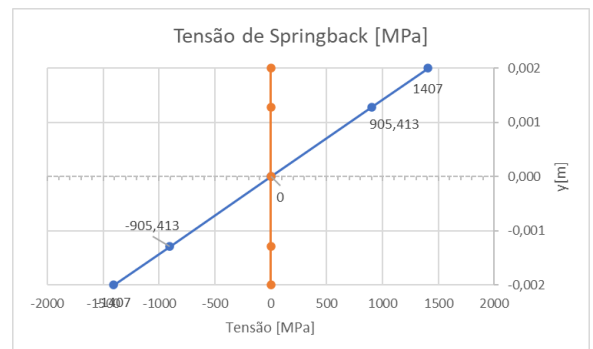
$$\sigma_{sb_c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1407 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_yy} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 905,413 \text{ MPa}$$

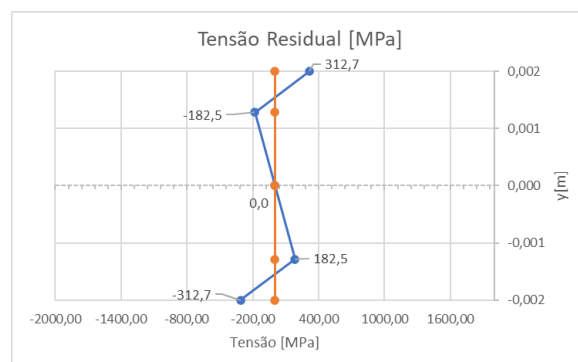
$$\sigma_{2b\_c} = \sigma_{1b\_c} + \sigma_{sb\_c} = 312,7 \text{ MPa}$$



(a)



(b)



(c)

Figura 43: Distribuição de Tensões para  $p = 0,25 \text{ m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*springback*) e (c) tensões residuais.

As tensões encontradas para este curvamento revelou um comportamento relevante a ser analisado. Através da Figura 43, observa-se que as tensões residuais em  $-y_y$  e  $+y_y$  estão aumentando. Tendo isso em vista, o estudo buscou encontrar o ponto onde essas tensões residuais se igualam as tensões em  $-c$  e  $+c$ .



### Raio de curvatura: 0,172875m

As tensões residuais em  $-y_y$  e  $+y_y$  se igualam as tensões residuais em  $-c$  e  $+c$  para  $\rho = 172875$  m.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3} (b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,049 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha = \frac{M(\rho)}{M_y} = 1,408$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{(3 - 2\alpha)} = 0,8576 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -4,794 \times 10^{-3}$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} = 0,417 \text{ m}$$

$$\sigma_{1b.c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1101 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1b.yy} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

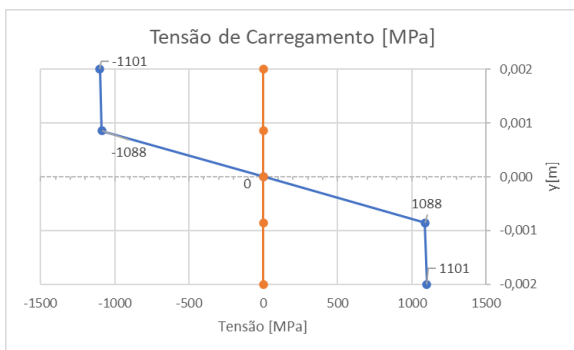
$$\sigma_{sb.c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1532 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_yy} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 656,9 \text{ MPa}$$

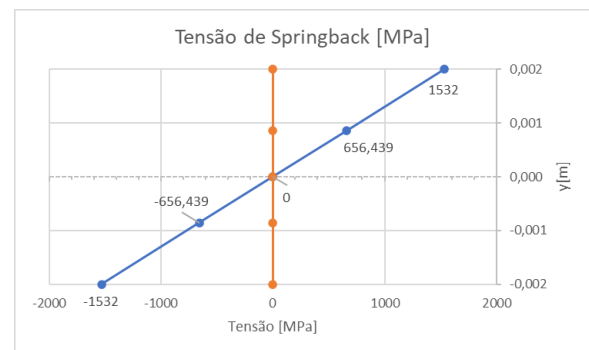
$$\sigma_{2b\_c} = \sigma_{1b\_c} + \sigma_{sb\_c} = 430,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_yy} = \sigma_{1b\_yy} + \sigma_{sb\_yy} = -430,6 \text{ MPa}$$

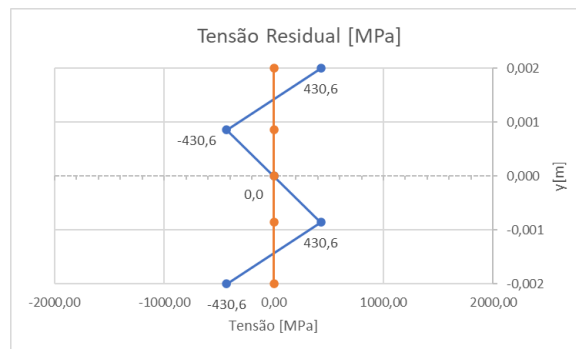
$$\sigma_{2b\_yy} = \sigma_{1b\_yy} + \sigma_{sb\_yy} = -75,8 \text{ MPa}$$



(a)



(b)



(c)

Figura 44: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,172875 \text{ m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

O raio de curvatura imposto para gerar a Figura 44, as tensões residuais trativas e compressivas, em  $-y_y$  e  $+y_y$  e em  $-c$  e  $+c$ , igualam-se.

**Raio de curvatura: 0,17 m**

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 6,4 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$M_y = \frac{2}{3} (b \cdot c^2 \cdot S_y) = 0,035 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\rho_y = \frac{E \cdot I}{M_y} = 0,386 \text{ m}$$

$$M(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( -1 + \frac{E_t}{E} \right) \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^2 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M(\rho) = 0,049 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_p(\rho) = \frac{3}{2} \left[ 1 + \left( \frac{2}{3} \left( \frac{\rho}{\rho_y} \right)^{-1} - 1 \right) \frac{E_t}{E} \right] M_y \quad M_p(\rho) = 0,052 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha = \frac{M(\rho)}{M_y} = 1,412$$

$$y_y = c \cdot \sqrt{3 - 2\alpha} = 0,84043 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_y}{E} = 5,181 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{2b} = \varepsilon_y \left[ \alpha - \left( \frac{y_y}{c} \right)^{-1} \right] = -5,015 \times 10^{-3}$$

$$\rho_f = \frac{c}{|\varepsilon_{2b}|} = 0,399 \text{ m}$$

$$\sigma_{1b\_c} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1102 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1b\_yy} = -S_y - E_t \left[ \left( \frac{y_y}{\rho} \right) - \varepsilon_y \right] = -1088 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_c} = \frac{(M(\rho) \cdot c)}{I} = 1536 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{sb\_yy} = \frac{(M(\rho) \cdot y_y)}{I} = 645,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_c} = \sigma_{1b\_c} + \sigma_{sb\_c} = 434,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2b\_yy} = \sigma_{1b\_yy} + \sigma_{sb\_yy} = -442,1 \text{ MPa}$$

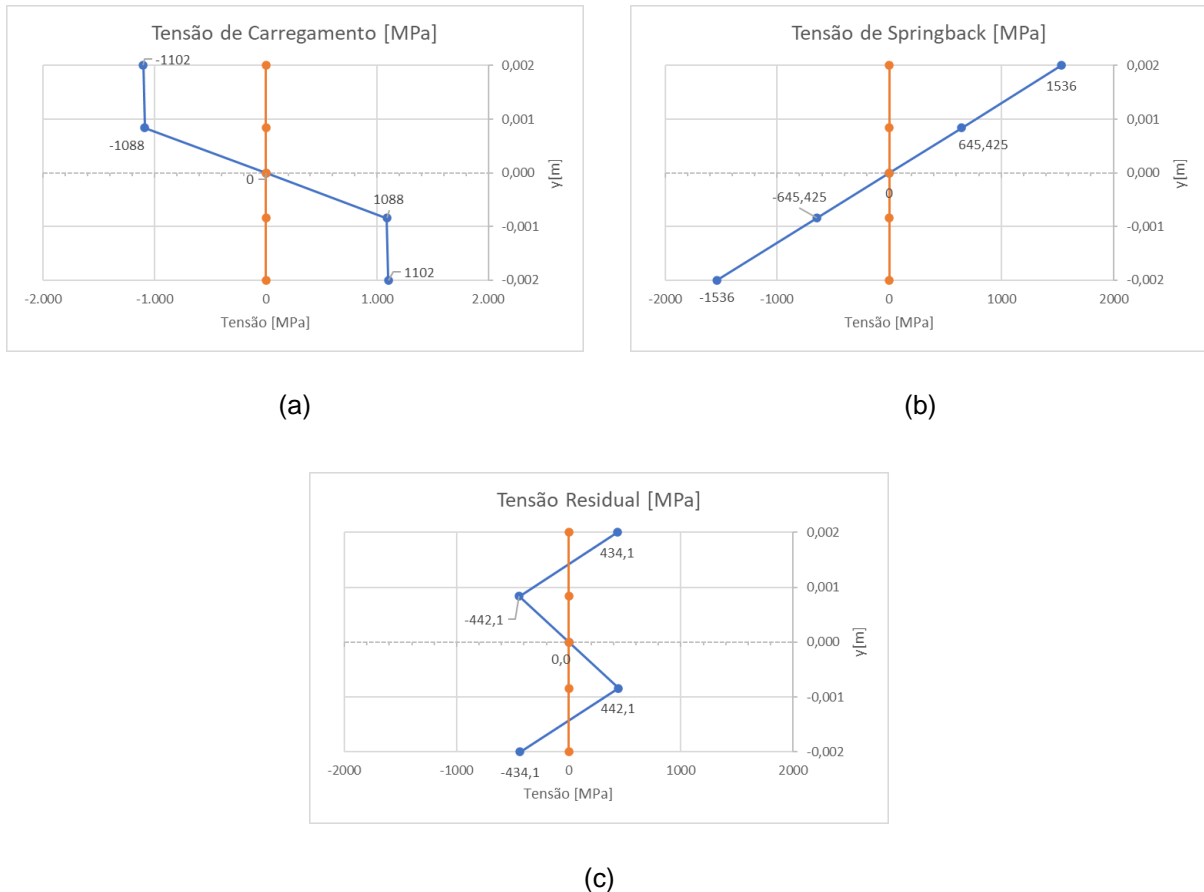


Figura 45: Distribuição de Tensões para  $\rho = 0,17\text{m}$ : (a) carregamento, (b) descarregamento (*spring-back*) e (c) tensões residuais.

Na Figura 45 pode-se observar que as tensões residuais em  $-y_y$  e  $+y_y$  estão com módulos maiores que as tensões residuais em  $-c$  e  $+c$ .

Observa-se que de acordo com o raio de curvatura imposto ao arame, determina-se a distribuição da tensão residual na seção transversal do arame. Sendo esta nula, quando o raio imposto é maior ou igual ao  $\rho_y$ , que é o raio mínimo para iniciar o escoamento na seção transversal do arame.

Observa-se que quanto menor for o raio imposto ao arame de armadura de *riser* flexível, as tensões residuais tendem a aumentar. Em determinado raio de curvatura imposto, observou-se que as tensões em  $y_y$  e  $c$  tendem a se igualar. Este fenômeno, para o caso analisado neste trabalho, ocorreu em  $\rho=0,172875 \text{ m}$ .

Buscou-se estabelecer com esse estudo uma faixa admissível para que a atividade de curvamento dos arames de armadura de *riser* flexível, durante a montagem dos conectores. O estudo entende como admissível, de forma arbitrária, como mostrado na Tabela 5, que esse limite seja de 20% de  $S_y$ . Idealmente, 10% de  $S_y$  seria mais conservador, uma vez que a tensão residual formada seria menor. Sobretudo quando se trata de conectores de topo, que são os que ficam acoplados nas plataformas, e são submetidos aos maiores esforços estáticos (pois todo o comprimento do *riser* flexível está pendurado através deste conector) e dinâmicos, que se dão em decorrência do movimento vertical da plataforma, e diferentes direções de ondas, para diversos períodos de tempo.

Tabela 5: Limites admissíveis de tensões residuais.

$S_y$ [MPa]	$0,1S_y$ [MPa]	$0,2S_y$ [MPa]
1088	108,8	217,6

Na Tabela 6 é possível observar um resumo de como as tensões residuais máximas, em pontos notáveis ( $y_y$  e  $c$ ), são correlacionadas aos raios de curvaturas impostos ao arame de armadura de *riser* flexível no ato da montagem. Nessa mesma tabela ainda é possível identificar pela coloração das linhas a adequação dos raios de curvamentos impostos (de verde – mais adequado, para vermelho – menos adequado).

Tabela 6: Tensões residuais máximas geradas em arames de armadura de *riser* flexível em função dos raios de curvatura em pontos notáveis.

$\rho$ [m]	Tensão Residual em $c$ ( $\sigma_{2b_c}$ ) [MPa]	Tensão Residual em $y_y$ ( $\sigma_{2b_{yy}}$ ) [MPa]	Tensão Residual em $c$ ( $\sigma_{2b_c}$ ) [% $S_y$ ]	Tensão Residual em $y_y$ ( $\sigma_{2b_{yy}}$ ) [% $S_y$ ]
0,4	0	0	0	0
0,386	0	0	0	0
0,35	95,84	-13,8	8,8	1,3
0,3	213,3	-75,8	19,6	7
0,25	312,7	-182,5	28,7	16,8
0,172875	430,6	-430,6	39,6	39,6
0,17	430,1	-442,1	39,9	40,6

Nota-se, Tabela 6, que se o arame de armadura de *riser* flexível for curvado em um raio inferior a aproximadamente 0,3m, para o caso estudado, poderia ser gerado tensões residuais acima de 20% de  $S_y$ , que este estudo preliminar considera excessivo.

## Capítulo V – Conclusão

Após o curvamento para trás dos arames de armadura de *riser* flexível e seu correspondente *spring-back*, o conector é posicionado, e em sequência, os arames são curvados para a frente com raio de curvatura muito grande (maior que  $\rho_y$ ). Este estudo sugere um raio de curvatura mínimo para ser utilizado com o arame de armadura de *riser* flexível escolhido, de forma que o efeito da distribuição de tensões residuais não seja excessivo.

Caso, este limite não possa ser utilizado, por exemplo, por limitações geométricas da montagem do conector, o modelo analítico desenvolvido pode ser utilizado para fazer a estimativa da distribuição das tensões residuais na seção transversal do arame de armadura de *riser* flexível para o raio de curvatura que tiver que ser imposto, através da utilização de colares de curvatura.

De uma maneira geral, este modelo analítico possui algumas limitações, e deve ser considerado como uma estimativa preliminar para a simulação de uma condição real de montagem. De forma a dar-se uma continuidade a este trabalho, em vias de tornar o modelo mais próximo da realidade, sugere-se que seja incluso nos cálculos os esforços de torção no arame, devido a sua disposição helicoidal ao longo do flexível. A utilização de um *software* comercial de elementos finitos também seria importante.

## Referência Bibliográfica

- [1] MIRIM, D. D. C. INVESTIGAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM LASER ENTRE O AÇO CARBONO AISI 1010 E O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304. INVESTIGAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM LASER ENTRE O AÇO CARBONO AISI 1010 E O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304, São Paulo, 2011. 112. Disponível em: <[https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/066/44066049.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/066/44066049.pdf)>. Acesso em: 19 Outubro 2021.
- [2] COSTAS, M. D. B. D. D. P. E.. **Normas de Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto**, 2005. 562. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/normam01\\_0.pdf](https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/normam01_0.pdf)>. Acesso em: 26 Setembro 2021.
- [3] DE ANDRADE DE BRITO,. Análise de Tensão Residual por meio da Difração de Raios-X, Rio de Janeiro, v. 34, p. 2, 2017.
- [4] LOPES, Diogo. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NA MONTAGEM DE CONECTORES EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS. Orientador: Paulo Pedro Kenedi, D. Sc. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado) - CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [5] VARGAS, Felipe. AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO EXPERIMENTAL DA REDE DE BRAGG. Orientador: Paulo Pedro Kenedi, D. Sc. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado) - CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2014.
- [6] FERREIRA, A. Princípios básicos da extensometria – Parte 2. **Kot Engenharia**, 2021. Disponível em: <<https://kotengenharia.com.br/principios-basicos-da-extensometria-parte-2/>>. Acesso em: 20 Outubro 2021.
- [7] FIGUEIREDO, F. R. PLATAFORMAS MARÍTIMAS. **PLATAFORMAS MARÍTIMAS**, Rio de Janeiro, 2014. 44.
- [8] GOOGLE. **Google**. Disponível em: <[https://www.google.com/search?q=strain+gages+rosetas&sxsrf=AOaemvKRr2nb-11NUscCJ84gyieHDLmZxw:1634694367784&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiSj-6i79fzAhWLIJUCHXYXDuaQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=674&dpr=1.25#imgrc=GPIkDbYqauOhPM](https://www.google.com/search?q=strain+gages+rosetas&sxsrf=AOaemvKRr2nb-11NUscCJ84gyieHDLmZxw:1634694367784&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiSj-6i79fzAhWLIJUCHXYXDuaQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=674&dpr=1.25#imgrc=GPIkDbYqauOhPM)>. Acesso em: 19 Outubro 2021.

[9] KENEDI, P. P. Apostila de Tensões Residuais. **Apostila de Tensões Residuais**, Rio de Janeiro, 2021. 33.

[10] KOT Engenharia. **Kot Engenharia**, 30 Março 2021. Disponível em: <<https://kotengenharia.com.br/principios-basicos-da-extensometria-parte-2/>>.

[11] LUKIN, K. **Lei de Bragg e Difração**. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01101/home.html>>. Acesso em: 20 Outubro 2021.

[12] MONTENEGRO, V. D. A. VISÃO COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES EM ENSAIOS DE TUBOS FLEXÍVEIS. 77 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

[13] PETROBRAS. Flexible Pipe. **N-2409 Flexible Pipe Specification CONTEC Comissão de Normalização Técnica SC-21 Materials and Equipment for Petroleum Drilling and Production Revalidation**, Outubro 2003. 88.

[14] VIEIRA, Tábata. Estudo de tensão residual através de difração de raios X em aço carbono 1020. Orientador: Dr. Alice Gonçalves Osorio. 2018. 35 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

[15] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.balticshipping.com%2Fvessel%2Fimo%2F9644330&psig=AOvVaw3afMiNcL89y95hck\\_5WNI5&ust=1635004504446000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOjq78aw3vMCFQAAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.balticshipping.com%2Fvessel%2Fimo%2F9644330&psig=AOvVaw3afMiNcL89y95hck_5WNI5&ust=1635004504446000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOjq78aw3vMCFQAAAAAABAD)>. Acesso em: 24 Setembro 2021.

[16] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw-image%3A%2F%2F%2Fa037ebc7ecf9461f0a9ffe34e4c60d9374fed6380cd7c766a3dd766366e41017&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.aedb.br%2Fseget%2Farquivos%2Fartigos09%2F265\\_Descomissioamento%25202009%2520final.pdf&tbnid=H0b57MfrN6](https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw-image%3A%2F%2F%2Fa037ebc7ecf9461f0a9ffe34e4c60d9374fed6380cd7c766a3dd766366e41017&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.aedb.br%2Fseget%2Farquivos%2Fartigos09%2F265_Descomissioamento%25202009%2520final.pdf&tbnid=H0b57MfrN6)>. Acesso em: 26 Setembro 2021.

[17] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/search?q=Torres+Complacentes+plataforma&tbm=isch&ved=2ahUKEwjr5OO63aLzAhWPh5UCHaQ3Ch0Q2-cCegQIABAA&sq=Torres+Complacentes+plataforma&gs\\_lcp=CgNpbWcQA1CaZVjje2D3fWgAcAB4AIABcYgBjQmSAQQwLjExmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&](https://www.google.com/search?q=Torres+Complacentes+plataforma&tbm=isch&ved=2ahUKEwjr5OO63aLzAhWPh5UCHaQ3Ch0Q2-cCegQIABAA&sq=Torres+Complacentes+plataforma&gs_lcp=CgNpbWcQA1CaZVjje2D3fWgAcAB4AIABcYgBjQmSAQQwLjExmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&)>. Acesso em: 30 Setembro 2021.

[18] PETROBRAS. Tipos de Plataformas. **Petrobras**, 2014. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html#autoelevavel>>. Acesso em: 28 Setembro 2021.



[19] Google. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.energiaquefalacomvocate.com.br%2F2019%2F11%2F08%2Fos-dez-principais-campos-de-petroleo-e-gas-offshore-da-europa%2F&psig=AOvVaw0Jhdf\\_\\_yc6C106zpVMwmD7&ust=1635005559406000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCNDMyb203vMCFQAAAAAdAAAAABAJ](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.energiaquefalacomvocate.com.br%2F2019%2F11%2F08%2Fos-dez-principais-campos-de-petroleo-e-gas-offshore-da-europa%2F&psig=AOvVaw0Jhdf__yc6C106zpVMwmD7&ust=1635005559406000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCNDMyb203vMCFQAAAAAdAAAAABAJ)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[20] GOOGLE. Disponível em: <<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fopropulsormaritimo.info%2Foffshore%2Fconstellation-fecha-contrato-de-navio-sonda-com-a-petrobras%2F&psig=AOvVaw1PsliCJPI9p8mPfrGEIWfi&ust=1635006138172000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOiY3dG23vMC>>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[21] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.modec.com%2Fbusiness%2Ffloater%2Ftlp%2F&psig=AOvVaw31StFok9vX0\\_XwtEERNI75&ust=1635006306595000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCMj7j6K33vMCFQAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.modec.com%2Fbusiness%2Ffloater%2Ftlp%2F&psig=AOvVaw31StFok9vX0_XwtEERNI75&ust=1635006306595000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCMj7j6K33vMCFQAAAAdAAAAABAD)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[22] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fstringfixer.com%2Fpt%2FSpa\\_\(platform\)&psig=AOvVaw2NK1Uo5nibGwKX1Fs9obH-&ust=1635006415875000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOC0hda33vMCFQAAAAAdAAAAABAD](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fstringfixer.com%2Fpt%2FSpa_(platform)&psig=AOvVaw2NK1Uo5nibGwKX1Fs9obH-&ust=1635006415875000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOC0hda33vMCFQAAAAAdAAAAABAD)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[23] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Foglobo.globo.com%2Feconomia%2Fplataforma-servico-da-petrobras-na-bacia-de-santos-a-segunda-com-casos-de-coronavirus-24369424&psig=AOvVaw2IAQTFSADnNvZ6YLuus\\_Ky&ust=1635006549841000&source=images&cd=vfe&ved=>](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Foglobo.globo.com%2Feconomia%2Fplataforma-servico-da-petrobras-na-bacia-de-santos-a-segunda-com-casos-de-coronavirus-24369424&psig=AOvVaw2IAQTFSADnNvZ6YLuus_Ky&ust=1635006549841000&source=images&cd=vfe&ved=>)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[24] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fpetrogasnews.files.wordpress.com%2F2011%2F03%2Fnews\\_26771\\_big\\_20090129203427ff26.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fpetrogasnews.wordpress.com%2F2011%2F03%2F06%2Ftipos-de-plataformas-de-petroleo%2F&tbnid=RpjKcAE](https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fpetrogasnews.files.wordpress.com%2F2011%2F03%2Fnews_26771_big_20090129203427ff26.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fpetrogasnews.wordpress.com%2F2011%2F03%2F06%2Ftipos-de-plataformas-de-petroleo%2F&tbnid=RpjKcAE)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[25] AMOROS, R. T. Avaliação de Tensões Residuais em Chapas Planas de Aço Carbono, Desitnadas a Processos de Corte a Laser, pelo Método da Anisotropia Planar. **Avaliação de Tensões Residuais em Chapas Planas de Aço Carbono, Desitnadas a Processos de Corte a Laser, pelo Método da Anisotropia Planar**, Paraná, Dezembro 2008. 147.7

[26] P. BEER, F.; E. RUSSELL JOHNSTON, J. **Resistência dos Materiais**. 3ª. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

[27] MODEC. **MODEC**. Disponível em: <<https://www.modec.com/business/floater/tlp/>>. Acesso em: 28 Setembro 2021.

[28] GOOGLE. Disponível em: <[https://www.google.com/search?q=Flex+armour+machine+offshore&tbm=isch&ved=2ahUKEwjkkdq3y-f3AhW-N7kGHdDWAvMQ2-cCegQIABAA&oq=Flex+armour+machine+offshore&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1C6DliOKWC5K2gAcAB4AIAB0AKIAbMNkgEHMS42LjluMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=eCKEYuT1C77v5OUP0K2LmA8&bih=714&biw=1536#imgsrc=p9KvkCUy5YTJ9M&imgdii=Q2n1hrUBomyggM](https://www.google.com/search?q=Flex+armour+machine+offshore&tbm=isch&ved=2ahUKEwjkkdq3y-f3AhW-N7kGHdDWAvMQ2-cCegQIABAA&oq=Flex+armour+machine+offshore&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1C6DliOKWC5K2gAcAB4AIAB0AKIAbMNkgEHMS42LjluMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=eCKEYuT1C77v5OUP0K2LmA8&bih=714&biw=1536#imgsrc=p9KvkCUy5YTJ9M&imgdii=Q2n1hrUBomyggM)>. Acesso em: 17 Maio 2022.

[29] GOOGLE. Disponível em: < [https://www.aisltd.com/wp-content/uploads/2021/11/bardot\\_subsea\\_view\\_3D\\_2\\_final-View-simplified-FPSO-risers-flowlines-325x203.jpg](https://www.aisltd.com/wp-content/uploads/2021/11/bardot_subsea_view_3D_2_final-View-simplified-FPSO-risers-flowlines-325x203.jpg)>. Acesso em: 28 Setembro 2021.