

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS DURANTE
PROCEDIMENTO DE REEL-LAYING NA PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS
SUBMARINOS

por

Alfredo Camilo Santos Mariano de França

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, janeiro de 2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Mariano de França, Alfredo Camilo
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS
GERADAS DURANTE PROCEDIMENTO DE REEL-LAYING NA
PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS SUBMARINOS / Alfredo
Camilo Mariano de França. -- 2024.
24 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Coorientador: Cristiano João Brizzi Ubessi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Mecânica dos Sólidos. 2. Método dos Elementos
Finitos. I. Tempel Stumpf, Felipe, orient. II. Brizzi
Ubessi, Cristiano João, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Alfredo Camilo Santos Mariano de França

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS DURANTE
PROCEDIMENTO DE REEL-LAYING NA PRESSÃO DE COLAPSO DE DUTOS
SUBMARINOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Coorientador: Cristiano João Brizzi Ubessi

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf (Presidente)

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Rafael Antônio C. Laranja

Prof. Ignácio Iturrioz

Porto Alegre, janeiro de 2024

DEDICATÓRIA

Ao meu amado tio, Cristóvão Elias dos Santos (em memória).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a quem devo minha formação. Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf e ao meu coorientador Dr. Cristiano João Brizzi Ubessi, dos quais o apoio e auxílio me permitiram superar mais este desafio. Por fim, à Leal e Valerosa Cidade de Porto Alegre, que me serviu de esteio durante toda essa jornada.

Mariano de França, Alfredo. **Avaliação da Influência das Tensões Residuais Geradas Durante Procedimento de Reel-Laying na Pressão de Colapso de Dutos Submarinos.** 2024. 28. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

O mercado de extração de petróleo e gás *offshore* é de suma importância econômica, social e política, e serve como um dos principais motores da pesquisa e desenvolvimento técnico-científico em diversas áreas, em especial na engenharia mecânica. A área de condutos para transporte sob pressão se configura num dos principais desafios da extração *offshore*, demandando processos complexos tanto na fabricação quanto na manipulação de dutos, rígidos ou flexíveis, capazes de suportar as extremas condições de trabalho. Manejar centenas de metros de dutos, ou até mesmo quilômetros, sobre alto mar se mostra uma tarefa complexa, demandando técnicas e processos de engenharia com alto grau de responsabilidade. Entre esses processos se destaca o *reel-laying*, que serve de núcleo de interesse do presente estudo. Este estudo se propõe a realizar uma pré-análise do processo de *reel-laying* para duas configurações de tubo rígido de 16”, referência comercial de parede mais fina, SCH 20, e mais espessa, SCH 160, fabricados em aço API X65 através do método dos elementos finitos com o auxílio do software Simulia Abaqus, tendo por objetivo final verificar a influência do campo de tensões residuais geradas a partir deste processo, e colateralmente da deformação plástica gerada, na pressão de colapso do mesmo, obtida através do método de Riks.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos Elementos Finitos, colapso, risers rígidos, Método de Riks

Mariano de França, Alfredo. **Assessment of the Influence of Residual Stresses Generated During the Reel-Laying Procedure on the Collapse Pressure of Subsea Pipelines.** year. 28. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The offshore oil and gas extraction market is of paramount economic, social and political importance, and serves as one of the main drivers of technical-scientific research and development in several areas, especially mechanical engineering. The area of pipelines for pressure transport is one of the main challenges of offshore extraction, demanding complex processes in both the manufacturing and handling of pipelines, rigid or flexible, capable of withstanding extreme working conditions. Managing hundreds of meters of pipelines, or even kilometers, on the ocean is a complex task, requiring engineering techniques and processes with a high degree of responsibility. Among these processes, reel-laying stands out, which serves as the core of interest of the present study. This study proposes to carry out a pre-analysis of the reel-laying process for two configurations of 16” rigid tube, commercial reference with thinner wall, SCH 20, and thicker wall, SCH 160, manufactured in API X65 steel through the finite element method with the aid of the Simulia Abaqus software, with the ultimate objective of verifying the influence of the residual stress field generated from this process, and collaterally the plastic deformation generated, on the collapse pressure of the same, obtained through the Riks method .

KEYWORDS: Finite Element Method, collapse, rigid risers, Riks Method

NOMENCLATURA

Símbolos

D	Diâmetro nominal	[mm]
$D_{máx}$	Diâmetro maior da seção	[mm]
D_{min}	Diâmetro menor da seção	[mm]
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
F	Vetor de forças	
f_0	Ovalização da seção	
K	Matriz de rigidez global	
P_{co}	Pressão de colapso	[MPa]
P_{el}	Pressão elástica	[MPa]
P_{pl}	Pressão Plástica	[MPa]
t	Espessura da parede	[mm]
u	Vetor de deslocamentos	

Símbolos gregos

ρ	Massa específica do sólido	[kg m ⁻³]
α_{fab}	Qualidade de fabricação	
σ_y	Tensão de escoamento	[MPa]
σ_{vm}	Tensão de Von Mises	[MPa]
σ_r	Tensão radial	[MPa]
σ_t	Tensão tangencial	[MPa]
σ_z	Tensão axial	[MPa]
ν	Coefficiente de Poisson	

Abreviaturas e acrônimos

MEF	Método dos Elementos Finitos
-----	------------------------------

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
3. CASO DE ESTUDO.....	4
3.1 MODELAGEM CAD	4
3.2 VÍNCULOS E CONTATOS	5
3.3 DEFINIÇÃO DO MATERIAL	7
3.4 MALHA.....	9
3.5 DEFINIÇÃO DOS STEPS	9
3.6 ESTUDO ANALÍTICO	11
4. RESULTADOS	11
5. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

O atual esforço global na direção de ampliar a participação de fontes energéticas renováveis na matriz energética dos países teve o curioso efeito de trazer a opinião pública para mais próximo da realidade da produção de energia através de fontes não-renováveis. O interesse crescente da opinião pública na conscientização do impacto humano sobre o meio ambiente faz com que cada vez mais haja o questionamento tanto sobre a natureza dos recursos utilizados quanto sobre a eficiência com que esses recursos são utilizados.

Dentro da indústria do petróleo e gás natural, em especial a exploração offshore, que se destaca como a principal forma de extração no Brasil, a importância de se desenvolver e otimizar processos, tornando-os mais confiáveis e seguros. Perfurar poços de petróleo no fundo do oceano, atravessando diversas camadas de minérios e sais, bem como garantir que o óleo escoe de forma adequada e segura através de centenas de metros de dutos até a plataforma oceânica ou navio se configura em um verdadeiro desafio de engenharia, que envolve um número incontável de profissionais das mais variadas áreas e serve de motor para o desenvolvimento tecnológico, científico e econômico no Brasil e no mundo.

Um dos pontos críticos que concentra esforços dentro da engenharia mecânica em especial é o da tecnologia em fabricação, processamento, transporte e instalação de condutos para escoamento sob as condições de trabalho severas da operação offshore. Esses condutos precisam suportar as altas pressões externas causadas por centenas de metros de coluna d'água, além de possuir flexibilidade o suficiente para se ajustar ao movimento das correntes marinhas sem se romper e resistir tanto externamente quanto internamente ao ambiente corrosivo ao qual são expostos. Para a diversidade de condições envolvidas, o mercado de extração offshore conta com duas grandes classes de condutos para transporte de produto: os dutos rígidos e os dutos flexíveis.

Os dutos rígidos, objeto do presente estudo, possuem especial interesse da indústria por serem menos custosos e de fabricação mais simples se comparados com os dutos flexíveis. Estes geralmente são fabricados sem costura conforme a norma estadunidense ASTM A106 ou alguma variante nacional da mesma, no Brasil sendo utilizada principalmente a NBR 5590. Esses dutos em geral são fabricados a partir de laminação com alguma variação do processo patenteado Mannesmann. Segundo CHO et al (2017), os dutos que utilizados no *reel-lay* passam por um processo em que barras inteiras (comercialmente encontradas em 5 m ou 6 m, dependendo da norma) são conformadas em formato de C, soldadas umas nas outras em geral por arco elétrico e posteriormente enroladas em fábrica num carretel com diâmetro externo entre 8 m e 10 m, que é instalado na estrutura de um tipo especial de navio, próprio para esse fim.

Ao chegar no ponto de instalação da tubulação em alto mar, o navio desfaz o rolo, endireita o duto e o insere no oceano conforme ilustrado na Figura 1.

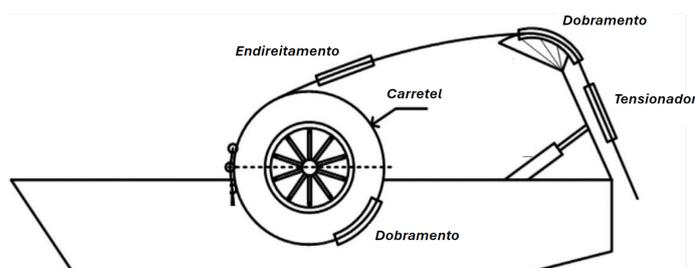


Figura 1 – Adaptado de CHO, et al (2017)

O processo de *reel-lay* bem como o endireitamento induz níveis de encruamento no material que o diferenciam da condição do mesmo após laminado a quente em fábrica. Quanto ao *reel-lay*, como descrito por CHO et al (2017), além do efeito de gerar um campo de tensões residuais o processo acaba induzindo um certo nível de ovalização na seção transversal do duto que reduz a sua resistência ao colapso. Uma ferramenta analítica para cálculo da pressão de colapso que considera o efeito da ovalização é descrita tanto na DNV-ST-F101 (2021) quanto em Kyriakides e Corona (1988) foi utilizada como parâmetro analítico no presente texto. Em linhas gerais, um duto submetido a pressão externa positiva maior que a pressão interna aplicada colapsa em uma pressão tão menor quanto maior for a ovalização de sua seção transversal, podendo esta ser definida em função da diferença entre o diâmetro menor e maior da seção dividida pelo diâmetro médio.

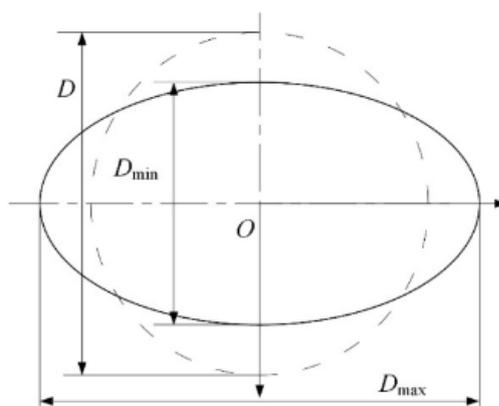


Figura 2 – Fonte: ANDRADE, G. H. S (2017)

No presente estudo, foi realizada a simulação do processo de *reel-lay*, endireitamento, alívio e pressurização/colapso para um duto de 16” em duas configurações comerciais extremas, SCH 20 e SCH 160, sendo respectivamente estes os dutos de parede mais fina e mais espessa disponíveis no mercado para o diâmetro nominal considerado, fabricado em aço API X65, com o intuito de verificar de forma preliminar, o efeito de redução da pressão de colapso do duto devido ao campo de tensões residuais e, colateralmente, devido a ovalização da seção.

O campo de tensões e deslocamentos foi obtido através da modelagem do problema em MEF para o caso plástico não-linear, onde foi considerada a parcela plástica real através da utilização da curva tensão x deformação plástica para o aço API X65. A pressão de colapso foi aferida utilizando o método de Riks que, de forma geral consiste na resolução numérica da equação de equilíbrio discretizando e controlando, simultaneamente, os parâmetros de diferencial de carga e de deslocamento, e de forma analítica através do equacionamento descrito na DNV-ST-F101 (2021), e que será discutido ao longo do presente trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO

A pressão de colapso é uma das principais variáveis que se leva em conta na seleção e especificação de dutos para transporte em condições de instalação submarina. Esta é fortemente afetada pela geometria da seção do duto, onde o mesmo, devido aos processos de conformação durante sua própria fabricação, como por exemplo a laminação, bem como processos posteriores como a soldagem das barras e o *reel-lay*, pode ter sua seção distorcida, sendo alongada em uma dada direção e contraída na direção perpendicular a esta, fenômeno

este conhecido como ovalização e cujo efeito na redução da resistência ao colapso é bem conhecido pela literatura.

Além do efeito da ovalização, no presente trabalho será tratada da hipótese menos abordada pela literatura atual de que o campo de tensões residuais exerce alguma influência sobre a pressão de colapso, a qual agiria no sentido de reduzir a mesma se comparado um duto pré-tensionado com outro sem tensões residuais, mas de mesma geometria, mesmo material e modelado com as mesmas condições de contorno. Ambos os casos, de forma preliminar, podem ser estudados através da modelagem por elementos finitos.

O processo desde o *reel-lay* até a instalação da linha de condutos pode ser entendido, simplificada, em termos de quatro subprocessos distintos. O primeiro processo é o *reel-lay* propriamente dito. Após a soldagem das barras de tubo formando uma linha de tubulação no comprimento especificado, a mesma é enrolada no carretel em fábrica e após isso posicionada no convés da embarcação. O segundo processo ocorre após a embarcação chegar no ponto de instalação da linha em alto mar. O carretel é desbobinado através de um sistema de trens de rolos laminadores que tracionam a linha forçando-a a se desenrolar. Após esse passo esta então é endireitada e a ovalização reduzida através de um outro trem laminador, sendo este o terceiro processo. O quarto e último processo diz respeito a pressurização propriamente dita. A linha inteira é inserida no mar enquanto a embarcação avança e a pressão aumenta conforme a profundidade atingida. Todos esses quatro processos ocorrem de forma contínua, ou seja, a linha é desbobinada, endireitada, laminada a frio e pressurizada continuamente até toda a linha estar posicionada sobre o poço submarino. Por esse motivo os dutos não passam por um processo de alívio de tensão após o *reel-lay* e antes de serem instalados, todo o trabalho mecânico realizado em alto mar é feito a frio, induzindo ainda mais encruamento no material antes do seu carregamento. Essas tensões induzidas podem ser aferidas preliminarmente através de um modelo de elementos finitos, assim como a pressão de colapso do duto tensionado e ovalizado, sendo este o objetivo do presente estudo.

O ponto mais crítico do presente trabalho se encontra na análise do colapso. Esta foi realizada de forma analítica, conforme o equacionamento descrito na DNV-ST-F101 (2021), e de forma numérica utilizando o método de Riks. Segundo Crisfield (1981), este método consiste em solucionar o problema de convergência controlando, simultaneamente, o incremento de força e de deslocamento evitando, assim, a ocorrência de saltos por controle de carga (snap-through) ou saltos por controle de deslocamento (snapback).

Quanto a solução analítica do colapso, a equação trazida na DNV-ST-F101 (2021) prevê que o colapso ocorre no duto quando a pressão externa aplicada atinge a pressão de colapso dada pela Expressão (1), em função da pressão elástica dada pela Expressão (2), da pressão plástica por (3) e do fator de ovalização definido pela Expressão (4).

$$(P_{co} - P_{el}) \left(P_{co}^2 - P_{pl}^2 \right) = P_{co} P_{el} P_{pl} f_0 \frac{D}{t} \quad (1)$$

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

$$P_{pl} = \alpha_{fab} 2 \sigma_y \frac{t}{D} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\grave{m}n}}{D_{nom}} \quad (4)$$

3. CASO DE ESTUDO

A análise em MEF do processo de *reel-lay* se deu através da comparação entre três modelos distintos e contraste com o resultado analítico, para cada uma das duas espessuras de parede, SCH 20 (9 mm) e SCH 160 (40 mm). O primeiro modelo, que foi tratado como duto pré-tensionado, é o modelo que considera o *reel-lay*, endireitamento, laminação, alívio e pressurização. O segundo modelo, tratado como duto virgem, é um duto de mesma geometria, de seção perfeitamente oval igual a máxima ovalização do duto pré-tensionado, mesmo material, mesmas condições de contorno e carregamento e mesmos parâmetros de malha, porém sem tensões residuais. Já o terceiro modelo foi gerado a partir da exata malha deformada do duto pré-tensionado, porém sem as tensões residuais do processo de *reel-lay*. Enquanto o duto pré-tensionado foi submetido a todos os quatro subprocessos (*steps*), o duto virgem foi submetido apenas ao último, correspondente à análise do colapso pelo método de Risk. O objetivo final é usar o duto virgem como parâmetro para aferir a redução da resistência ao colapso do duto pré-tensionado devido ao campo de tensões residuais.

Modelo 1: Duto que passou pelo processo de *reel-lay*. Geometria distorcida. Submetido a pressão de colapso levando-se em conta o campo de tensões residuais. A metodologia de análise do Modelo 1 pode ser resumida em: modelagem da geometria, definição do material, geração da malha, *reel-lay*, endireitamento/laminação, alívio, pressurização e colapso;

Modelo 2: Duto virgem. Seção perfeitamente oval e reto, com diâmetros máximo e mínimo iguais aos da seção de máxima ovalização do Modelo 1. Submetido a pressão de colapso sem tensões residuais. A Metodologia de análise do Modelo 2 pode ser resumida em: modelagem da geometria utilizando como dado de entrada a ovalização obtida após o alívio do Modelo 1, definição do material, geração da malha, pressurização e colapso;

Modelo 3: Importação da geometria distorcida do Modelo 1. Exatamente a mesma geometria do Modelo 1 após o endireitamento e alívio do mesmo. Submetido a pressão de colapso sem tensões residuais. A Metodologia de análise do Modelo 3 pode ser resumida em: importação da geometria deformada após o alívio do Modelo 1 como dado de entrada, definição do material, pressurização e colapso;

Por fim, o resultado de pressão de colapso obtido pelos três modelos foi comparado com o valor de pressão de colapso calculado analiticamente através da Expressão (1).

3.1 MODELAGEM CAD

Para ambos Modelos 1 e 2 foi necessária a elaboração das diversas partes de interesse em CAD. Quando ao Modelo 1, que cobre todos os quatro subprocessos do *reel-lay*, houve a simplificação do processo, de modo a reduzir ao máximo o número de componentes envolvidos àqueles poucos essenciais ao problema. Foi utilizada uma única montagem com quatro sólidos tridimensionais deformáveis, obtidos através da extrusão de um esboço plano: duto, carretel, bloco e rolo. Já para o Modelo 2, o duto virgem, foi utilizada uma única

montagem apenas com o duto. Por fim, a geometria do Modelo 3 foi obtida a partir da importação da malha deformada do Modelo 1 após o Step-3 (alívio).

Com relação ao duto, em ambos os casos Modelo 1 e Modelo 2, a geometria foi modelada conforme o indicado na norma NBR-5590 - Tubos de Aço Carbono para Condução de Fluidos, considerando um tubo de 16" SCH 20. O sólido foi obtido através da extrusão de um esboço plano da seção transversal do duto. Para otimização do problema, o mesmo foi considerado seccionado longitudinalmente por um plano normal à sua seção, coincidente com o plano XY da montagem. O problema foi modelado considerando a hipótese de simetria axial do duto em todos os três casos: Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3.

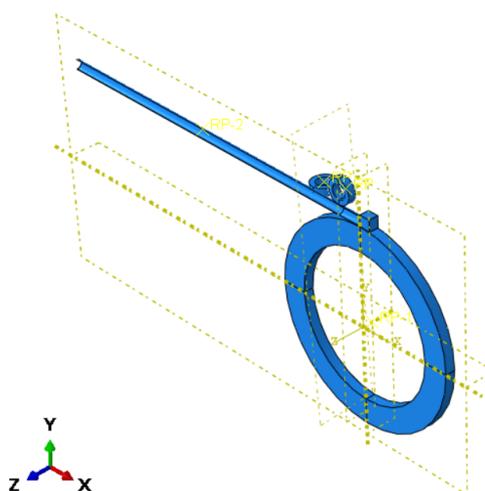


Figura 3 – Vista Isométrica do Modelo 1

O carretel do Modelo 1 também foi modelado como sólido 3d deformável com 4000 mm de diâmetro externo, sendo este o diâmetro do rolo após conformação utilizado na biografia de referência CHO, et al (2017). Para otimização do modelo, o carretel foi considerado vazado em seu interior sendo utilizado um diâmetro interno arbitrário de 2000 mm bem como uma espessura arbitrária de 500mm. Para fixar o duto no carretel, foi modelado um bloco sólido deformável cúbico de 400mm de aresta, fixo no carretel através de um constrain de tie.

O plano de simetria pode ser observado na Figura 1, acumulado na vista frontal, a direita em amarelo. O Modelo 1 foi desenvolvido considerando a hipótese de simetria do problema em relação a este plano, dado a própria simetria geométrica do duto e a a simetria quanto distribuição de cargas normais devido ao contato da superfície externa do duto com a superfície do carretel.

3.2 VÍNCULOS E CONTATOS

Quanto ao Modelo 1, foram utilizados quatro vínculos e três contatos, nomeadamente:

- Vínculo 1: Tie entre a superfície inferior do bloco e a superfície externa do carretel, vide Figura 5;

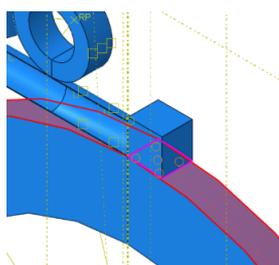


Figura 4 – Tie entre o bloco e o carretel

- Vínculo 2: Tie entre a face da extremidade direita do duto, paralela à seção transversal do mesmo, e a face esquerda do bloco, vide Figura 6;

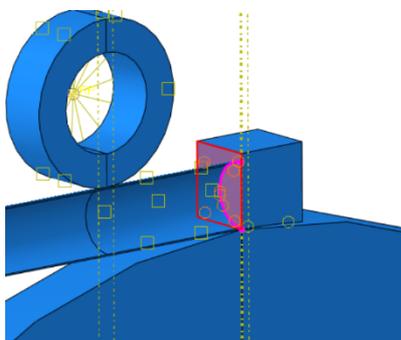


Figura 5 – Tie entre o duto e o carretel

- Vínculo 3: Coupling entre um ponto de referência criado sobre o eixo de rotação do carretel com a parede frontal do mesmo, vide Figura 7.

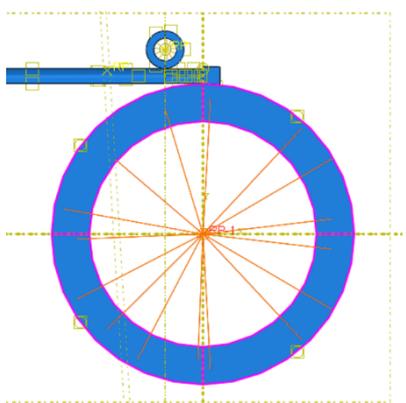


Figura 6 – Coupling entre o carretel e o ponto de referência

As vinculações do tipo tie tratam-se de vínculos onde os elementos de uma dada face mestra são unidos aos elementos de outra face escrava, de modo a não permitir deslocamentos ou rotações relativas dos nós dos elementos da face mestre em relação aos nós dos elementos da face escrava adjacente. De modo geral, o tie funciona como um engastamento de uma face, ou superfície, em outra.

Já a vinculação do tipo coupling utilizada no carretel, fixa uma seleção de geometrias em relação a uma referência. No caso em questão, o coupling fixa as faces selecionadas do carretel em relação ao ponto de referência de modo com que os elementos dessas geometrias selecionadas não se deslocam nem rotacionam, em nenhum eixo, com relação ao ponto de

reverência. Essa vinculação foi necessária para permitir a aplicação da condição de contorno de rotação do carretel utilizada no Step-1. Em resumo, ao rotacionar o ponto de referência em relação a algum eixo, os elementos vinculados rotacionam a mesma quantidade de modo a se manterem fixos em relação ao ponto de referência.

Em relação aos contatos (interactions) do Modelo 1:

- Contato 1: contato tangencial entre a superfície externa do duto e a superfície do rolo vertical, vide Figura 8;

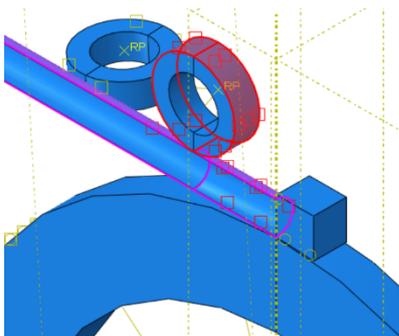


Figura 7 – Contato duto e rolo vertical

- Contato 2: contato tangencial entre a superfície externa do duto e a superfície do carretel, vide Figura 9;

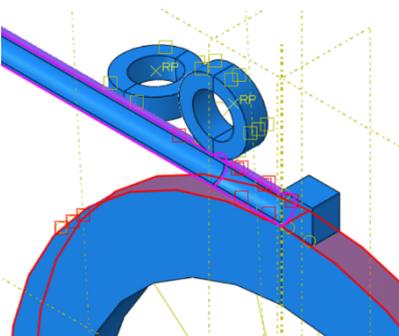


Figura 8 – Contato duto e carretel

- Contato 1: contato tangencial entre a superfície externa do duto e a superfície do rolo horizontal, vide Figura 10;

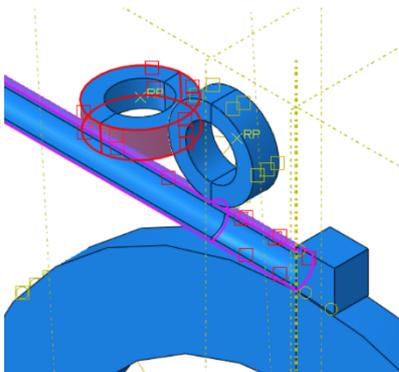


Figura 9 – Contato duto e rolo horizontal

Todos os contatos foram modelados como contatos tangenciais e com atrito, onde foi utilizado um coeficiente de atrito estático arbitrário de 0,3. Por hipótese, o atrito arbitrariamente definido entre todas as superfícies de contato foi considerado desprezível quanto a sua influência no campo de deslocamentos.

3.3 DEFINIÇÕES DO MATERIAL

Para a correta definição do material, considerando a condição de plasticidade, é necessário primeiro a obtenção da curva de tensão versus deformação de engenharia, que pode ser obtida através de ensaio de tração conforme a norma ASTM A370, que é uma das mais utilizadas para a caracterização de metais no Brasil. No presente trabalho, foi utilizado como referência a curva tensão x deformação de engenharia obtida para o API 5L X65 em ensaio de caracterização exposto em PINTO (2016). Com a curva tensão x deformação de engenharia, o próximo passo é a obtenção da deformação plástica em função da tensão aplicada. A mesma pode ser obtida através da curva de tensão versus deformação verdadeira, sendo a deformação total (verdadeira) igual a soma da deformação plástica com a deformação elástica, onde a deformação elástica é simplesmente a tensão aplicada dividida pelo módulo de elasticidade do material. Sendo assim, a deformação plástica para um dado valor de tensão aplicada é igual a diferença entre a deformação verdadeira e a razão entre a tensão aplicada e o módulo de elasticidade, conforme expressões (5), (6) e (7).

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{engenharia}}) \quad (5)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{engenharia}}(1 + \varepsilon_{\text{engenharia}}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{plástico}} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (7)$$

Tensão de Engenharia [MPa]	Deformação de Engenharia	Tensão Verdadeira [MPa]	Deformação Verdadeira	Deformação Plástica Verdadeira
484,8	0,0024	486,0	0,0024	0,0000
502,5	0,0164	510,7	0,0163	0,0137
519,9	0,0220	531,3	0,0218	0,0191
543,7	0,0315	560,8	0,0310	0,0282
558,4	0,0396	580,5	0,0388	0,0359
571,7	0,0510	600,9	0,0497	0,0467
582,2	0,0662	620,7	0,0641	0,0610
586,0	0,0763	630,7	0,0735	0,0704
589,3	0,0969	646,4	0,0925	0,0893
589,7	0,1072	652,9	0,1018	0,0986

Tabela 1 – Propriedades do Aço API 5L X65

3.4 MALHA

A análise de convergência da malha foi realizada da seguinte forma: foi realizada uma partição transversal na região de interesse, mais propensa ao colapso, sendo essa definida como metade do comprimento do duto. Variou-se a quantidade de elementos da malha em cada direção, ou seja, ao longo da espessura e ao longo do perímetro da seção, e para cada número de elementos criados em cada direção foi aplicado o carregamento do step-1 e se verificou a variação do deslocamento no Ponto de Referência, indicado na Figura 11. A partir do valor medido de deslocamento, foi plotado uma curva deslocamento em função do número de elementos em cada direção (espessura e perímetro). O processo foi o mesmo em ambos os casos: tubo SCH 20 e SCH160.

Para o Caso 1 (parede de 9 mm) foram utilizados 20 elementos ao longo da circunferência e 4 elementos ao longo da espessura. Para o Caso 2 (parede de 40 mm) foram utilizados 20 elementos ao longo da circunferência e 12 elementos ao longo da espessura.

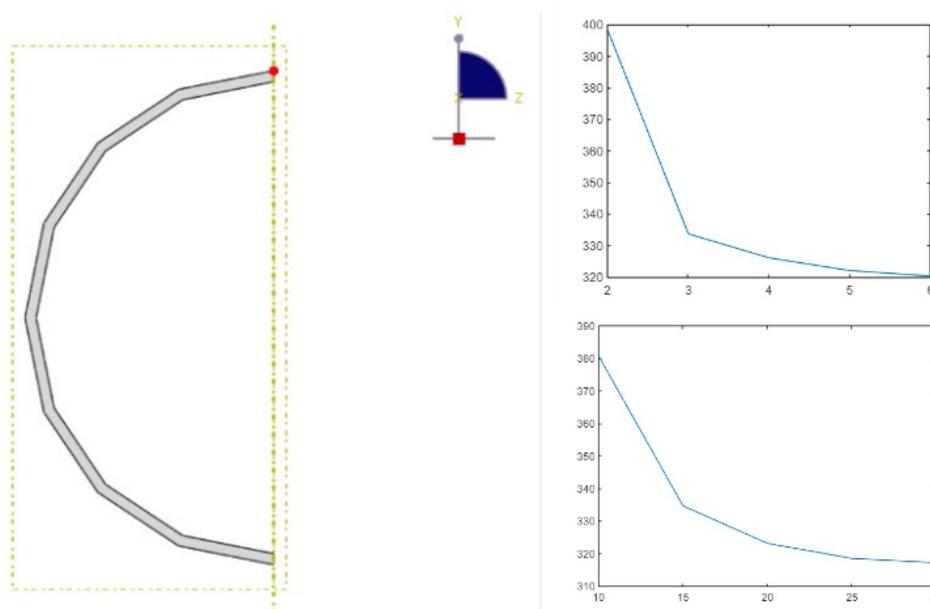


Figura 10: Em sentido anti-horário: ponto de referência (em vermelho), variação na Tensão de Von Mises em função do número de elementos ao longo da circunferência, variação na Tensão de Von Mises em função do número de elementos ao longo da espessura.

3.5 DEFINIÇÕES DOS STEPS

Para o Modelo 1, referente ao duto encruado, a simulação foi realizada com base em 4 Steps, sendo três análises estáticas-gerais e uma análise por Riks. Os resultados de interesse de cada Step serão detalhados no Capítulo 4.

- Step inicial: condição inicial indeformada para referência, vide Figura 11;



Figura 11 - Geometria Indeformada

- Step-1: primeiro subprocesso referente ao *reel-lay*. Análise estática-geral, não-linear. Meia volta em torno do carretel, vide Figura 12. Foi utilizado um período de tempo de 100 unidades, número máximo de incrementos de 10000, tamanho inicial de incremento de 1 unidade de tempo, incremento mínimo de 10^{-5} e máximo de 1 unidade de tempo;



Figura 12 - Reel-Lay

- Step-2: Endireitamento/laminação. Análise estática-geral não linear. Endireitamento do duto e redução da ovalização, vide Figura 13. Foi utilizado um período de tempo de 100 unidades, número máximo de incrementos de 10000, tamanho inicial de incremento de 1 unidade de tempo, incremento mínimo de 10^{-5} e máximo de 1 unidade de tempo;

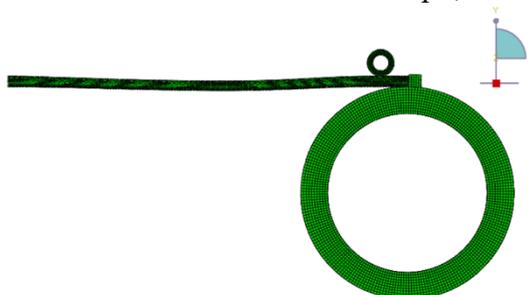


Figura 13 - Endireitamento/laminação

- Step-3: alívio. Análise estática-geral não linear. Suspensão do contato entre os rolos e o duto, retirada das cargas aplicadas e das condições de contorno para permitir o retorno elástico do duto e alívio das tensões devidas aos contatos e restrições. Neste Step, o duto permanece fixo apenas em uma extremidade (do bloco) e livre para se deformar na outra extremidade. Foi utilizado um período de tempo de 100 unidades, número máximo de incrementos de 1000, tamanho inicial de incremento de 1 unidade de tempo, incremento mínimo de 10^{-5} e máximo de 1 unidade de tempo;



Figura 14 - Alívio

- Step-4: colapso. Análise estática por Riks. Aplicação do método da pressão externa pelo método de Riks para obtenção do ponto de colapso. A Figura 2 exibe a geometria deformada após o colapso espelha em relação ao plano de simetria XY. Foi utilizado um período de tempo de 100 unidades, número máximo de incrementos de 10000, tamanho inicial de incremento de 0.001 unidade de tempo, incremento mínimo de 10^{-5} e máximo de 0.1 unidade de tempo;

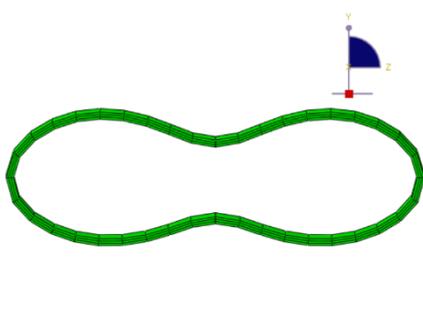


Figura 15 - Colapso – Vista da Seção Transversal

3.6 ESTUDO ANALÍTICO

A pressão de colapso analítica foi obtida através da expressão (1) utilizando o software Matlab, para ambos os casos, tubo SCH 20 e SCH 160. A expressão foi reescrita na forma de um polinômio p do terceiro grau (8) e suas raízes foram determinadas através da função roots (p), onde P_{el} , P_{pl} e f_0 são dados pelas expressões (2), (3) e (4), respectivamente.

$$P(P_{co}) = P_{co}^3 - P_{el} P_{co}^2 - P_{el} P_{pl} f_0 \frac{D}{t} P_{co} + P_{el} P_{pl}^2 \quad (8)$$

4. RESULTADOS

- Caso 1: Tubo de 16" SCH 20 (9mm de parede). Modelos 1 (roxo): tubo encruado, produto do processo e reel-lay. Modelo 2 (verde): tubo de seção perfeitamente oval, sem tensões residuais. Modelo 3 (azul): tubo deformado, geometria importada do Modelo 1 após o step de alívio, sem tensões campo de tensões residuais. A pressão de colapso foi obtida através da curva LPF (Load Proportional Factor) x Comprimento de Arco, onde a pressão de colapso é dada através da expressão (10), onde P é a pressão nominal aplicada, que neste estudo foi de 1 [MPa].

$$P_{co} = LPF \cdot P \quad (9)$$

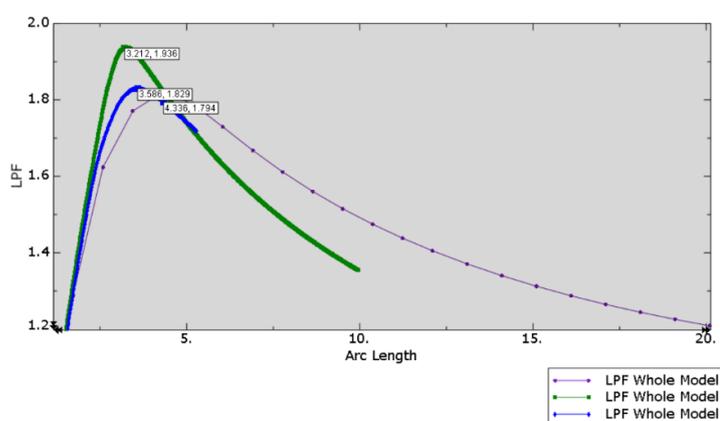


Figura 16 - LPF Caso 1 Modelos 1 (roxo), 2 (verde) e 3 (azul)

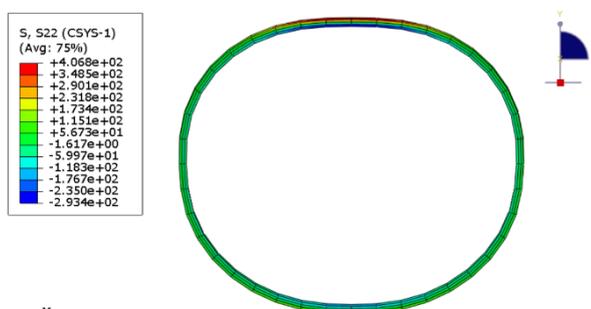


Figura 17 - Caso 1 - Modelo 1 – Campo de tensões circunferenciais após o alívio

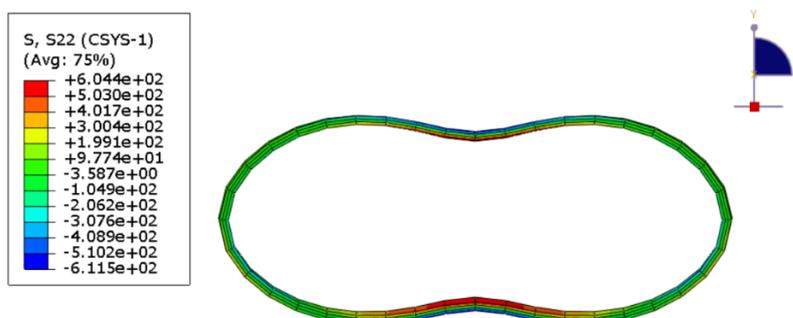


Figura 18 - Caso 1 - Modelo 1 – Campo de tensões circunferenciais após o colapso

- Caso 2: Tubo de 16" SCH 160 (40mm de parede). Modelos 1 (rosa): tubo encruado, produto do processo e reel-lay. Modelo 2 (amarelo): tubo de seção perfeitamente oval, sem tensões residuais. Modelo 3 (vinho): tubo deformado, geometria importada do Modelo 1 após o step de alívio, sem tensões campo de tensões residuais. A pressão de colapso foi obtida através da curva LPF (Load Proportional Factor) x Comprimento de Arco.

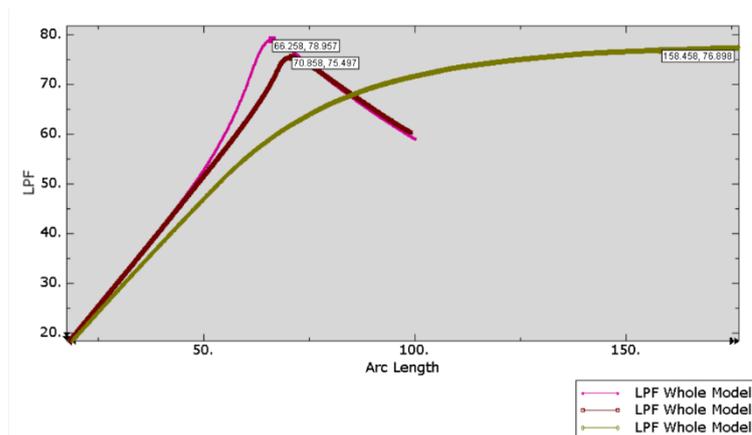


Figura 19 - Caso 2 Modelos 1 (rosa), 2 (amarelo) e 3 (vinho)

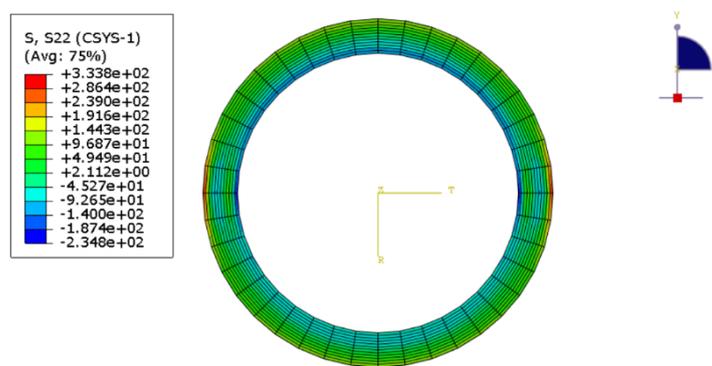


Figura 20 - Caso 2 – Modelo 1 - Campo de tensões circunferenciais após o alívio

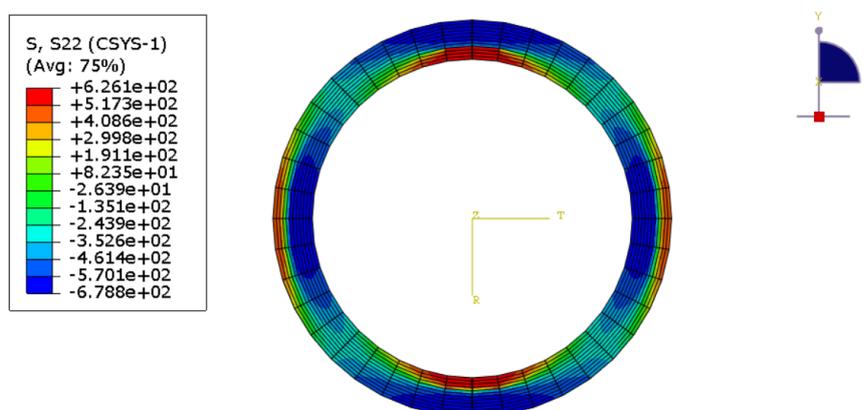


Figura 21 - Caso 2 - Campo de tensões circunferenciais após o colapso

Pressão de Colapso [MPa]				$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	$D_{m\acute{i}n}$ [mm]	f_0 [%]	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3				Análítica
SCH 20	1,794	1,936	1,829	1,800	424	365	15
SCH 160	78,957	76,898	75,497	62,893	414	391	5

Tabela 2 - Pressão de Colapso (Modelos 1, 2 e 3)

Para o Caso 1, tubo de 16" SCH 20 em API 5L X65, a tensão circunferencial máxima após o alívio para o Modelo 1 (tubo encruado do processo de *Reel-Lay*, na seção de referência, foi de 468,12 MPa, tendo uma média de 115 MPa.

Já para o Caso 2, tubo de 16" SCH 160 em API 5L X65, a tensão circunferencial máxima após o alívio para o Modelo 1 (tubo encruado do processo de *Reel-Lay*, na seção de referência, foi de 333,880 MPa, tendo uma média de 96,702 MPa.

	σ_{vm} [MPa]	σ_r [Mpa]	σ_t [MPa]	σ_z [MPa]
SCH 20	375,912	25,497	468,123	367,673
SCH 160	384,280	21,582	333,880	293,761

Tabela 3 - Modelo 1 - Distribuição de Tensões na Seção de Referência após o Alívio (Valores máximos na seção)

A partir dos valores obtidos em cada modelo, foi possível determinar a variação na pressão de colapso do Modelo 1 encruado em relação aos Modelos 2 e 3, de forma a evidenciar o efeito do campo de tensões na pressão de colapso do Modelo 1 contrastando-o com os dois outros modelos não encruados.

5. CONCLUSÃO

Ambos os Modelos 1, tanto do Caso 1 quanto do Caso 2, apresentaram uma distribuição média de tensões equivalentes de circunferenciais da ordem de 100 MPa. Para o Caso 1, tubo de parede fina, a diferença da pressão de colapso obtida para o caso encruado (Modelo 1) e não encruado (Modelo 3) foi de 1,94%, sendo a diferença mais significativa entre o Modelo 1 e o Modelo 2 (tubo de seção perfeitamente oval), 7,9%. Essa diferença pode ser explicada pelo fato da seção ovalizada não ser perfeitamente oval. Desde modo, ficou evidente que para o duto de parede fina e razão entre diâmetro e espessura de 44,4 a influência do campo de tensões residuais para o colapso pode ser negligenciada.

No Caso 2, para o tubo de parede espessa com razão entre diâmetro e espessura de 10,0, a pressão de colapso para o Modelo 1 foi 4,58% maior do que para o Modelo 3, o que vai contra a expectativa inicial de que o encruamento reduziria a resistência ao colapso do duto. Uma possível explicação para esse aumento da pressão de colapso no caso do duto encruado de parede espessa é o aumento da tensão de escoamento. Vale ressaltar que em todos os modelos desenvolvidos não foi considerada uma possível anisotropia devido ao encruamento, o que poderia endurecer o material na região mais encruada e reduzir a resistência ao colapso do duto. De qualquer forma, se verificou que o principal fator de redução da resistência ao colapso é a ovalização da seção, sendo o efeito do campo de tensões residuais pouco efetivo em ambos os casos, sendo ainda menor no caso do duto de parede fina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação - ABNT NBR 14724 2011, 2011.

ANDRADE, G. H. S. Estudo Numérico da Resistência ao Colapso de Tubos de Revestimento na Presença de Imperfeições Geométricas. **Universidade Federal de Alagoas**. Maceió, AL, Brasil, p. 48-50, 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/>>;

CHO, J. R.; JOO, B. D.; CHO, J. R.; MOON, Y. H. Finite Element Analysis of the Offshore Reel-Laying Operations for Double-Walled Pipe. **Advances in Mechanical Engineering** 2017, Vol. 9(10) 1–10, p. 1-10, 2017.

STUMPF, F. T.; KUHN, M. F.; DIAS, A. R. P.; CLARKE, T. G. R.; ILSTAD H.; LEVOLD, E.; ITURRIOZ, I. Stress Triaxiality as a Postponer of the Collapse Pressure of Thick-Walled Submarine Pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**. Porto Alegre, RS, Brasil, p. 4-5, 2023.

SOUSA, W. C. A.; JÚNIOR, I. I. Análise Não-Linear de Estruturas: Aplicação do Método do Comprimento de Arco de Crisfield. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, p 1-10, 2017.