

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

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO DE COLAPSO E FORÇA DE COLAPSO
EM DUTOS SUBMARINOS CLADEADOS

por

Fernando Vendramin

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, setembro de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

VENDRAMIN, FERNANDO
ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO DE COLAPSO E FORÇA
DE COLAPSO EM DUTOS SUBMARINOS CLADEADOS / FERNANDO
VENDRAMIN. -- 2022.
21 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Coorientador: Allan Romário de Paula Dias.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS,
2022.

1. 1. I. Tempel Stumpf, Felipe, orient. II. Dias,
Allan Romário de Paula, coorient. III. Título.

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

Fernando Vendramin

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO DE COLAPSO E FORÇA DE COLAPSO
EM DUTOS SUBMARINOS CLADEADOS

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. Cirilo Seppi Bresolin

Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Coorientador: Dr. Allan Romário de Paula Dias

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, setembro de 2022

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre me incentivarem a estudar e fornecerem os alicerces necessários para alcançar meus objetivos.

Aos amigos e colegas de trabalho, pelo apoio e suporte no desenvolvimento deste trabalho e durante todo o curso.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade.

Ao Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF, pelo fornecimento de recursos computacionais, humanos e por seu vasto conhecimento, compartilhado, em dutos submarinos.

Vendramin, Fernando. **Análise da Relação Entre Pressão de Colapso e Força de Colapso em Dutos Submarinos Cladeados**. 2022. 21f . Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Analisar e conhecer as diversas formas de colapso com que tubulações submarinas podem ser acometidas faz parte de um processo fundamental no que diz respeito ao projeto dessas tubulações. Um exemplo de falha catastrófica que tem atenção constante por parte da indústria *offshore* é o colapso por pressão externa. Infelizmente, realizar testes experimentais que permitam determinar a magnitude dessas pressões é algo extremamente caro e perigoso. Neste trabalho, é apresentada uma alternativa em busca de estabelecer uma relação entre a pressão de colapso de um tubo cladeado e a força de colapso de um anel com características equivalentes. Essa relação é verificada através de simulações numéricas pelos métodos de elementos finitos. Ao final, é estabelecida uma função matemática que relaciona a pressão de colapso de uma tubulação e a força de colapso de um anel com características parecidas. Essa função obtém resultados satisfatórios quando comparados com resultados de simulações numéricas.

PALAVRAS-CHAVE: tubulações submarinas, pressão de colapso, elementos finitos.

Vendramin, Fernando. **Analysis of the Relationship Between Collapse Pressure and Collapse Force in Cladded Submarine Pipelines**. 2022. 21f . Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Analyzing and understanding the various forms of collapse that subsea pipelines can experience is a fundamental process when it comes to pipeline design. One example of catastrophic failure that has received constant attention from the offshore industry is collapse due to external pressure. Unfortunately, conducting experimental tests to determine the magnitude of these pressures is extremely expensive and dangerous. In this paper, an alternative is presented in an attempt to establish a relationship between the collapse pressure of a clad pipe and the collapse force of a ring with equivalent characteristics. This relationship is verified through numerical simulations by finite element methods. In the end, a mathematical function that relates the collapse pressure of a pipe and the collapse force of a ring with similar characteristics is established. This function obtains satisfactory results when compared to results from numerical simulations.

KEYWORDS: subsea pipelines, collapse pressure, finite elements.

NOMENCLATURA

Símbolos

P_c	Pressão de colapso	[MPa]
F_c	Força de colapso	[kN/m]
E	Módulo de Elasticidade	[Pa]
ν	Coeficiente de Poisson	
t	Espessura tubo externo	[m]
D	Diâmetro externo	[m]
t_{CRA}	Espessura CRA	[m]
P_{el}	Pressão de colapso plástico	[Pa]
P_{pl}	Pressão de colapso elástico	[Pa]
f_0	Ovalização	
f_y	Tensão de Escoamento	[Pa]
α_{fab}	Fator de fabricação	
α	Yield Offset	
σ_y	Tensão de Escoamento	[Pa]
ε	Deformação	

Abreviaturas e acrônimos

DNV	Det Norske Veritas
CRA	Corrosion Resistant Alloy

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
3.1 Tubos cladeados (Bimetálicos).....	2
3.1.1 Aplicações submarinas na indústria de óleo e gás.....	2
3.1.2 Tubos cladeados e processo de fabricação	3
3.1.2.1 Tubos Cladeados Mecanicamente (Lined pipes).....	3
3.1.2.2 Tubos Cladeados Metalurgicamente (Clad Pipes)	3
3.2 Pressão de colapso	3
3.2.1 Método experimental para determinação da pressão de colapso.....	4
3.3 Critério para determinação da força de colapso	5
4. METODOLOGIA.....	5
4.1 Modelo para determinação da força de colapso	5
4.1.1 Dados do modelo	6
4.1.2 Condições de contorno	6
4.1.3 Malha.....	7
4.1.4 Simulações para determinação da força de colapso	7
4.2 Modelo para determinação da pressão de colapso.....	7
4.3 Relação da pressão de colapso em função da força de colapso e de D/t_t	8
5. RESULTADOS	8
5.1 Força de colapso	8
5.2 Pressão de colapso	9
5.3 Relação entre a força de colapso, D/t_t e a pressão de colapso.....	9
6. CONCLUSÃO.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

1.INTRODUÇÃO

Combustíveis fósseis são as principais fontes de energia primária no planeta e estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento socioeconômico do mundo atual. Entretanto, devido à demanda que cresce a cada dia, aumentou-se a necessidade de realizar exploração desses recursos energéticos em condições cada vez mais severas e em ambientes mais hostis. Desse modo, dadas as situações extremas de temperatura, pressão e contaminantes, a indústria de óleo e gás busca a cada dia desenvolver produtos e serviços capazes de superar tais barreiras e garantir a segurança operacional no processo de exploração.

Para transporte de fluidos derivados do petróleo são utilizadas tubulações, as quais estão em constante evolução tecnológica, em busca de melhores métodos de instalação e operação desses equipamentos. Uma das linhas de inovação de tubulações submarinas é referente ao desenvolvimento e aplicação de ligas metálicas com propriedades específicas para atender determinadas demandas. Assim, surgiram os dutos revestidos com clad de CRA (*corrosion resistant alloy*), ou dutos cladeados.

Essa tecnologia consiste na construção de dutos com duas camadas de diferentes materiais para fim de se obter a resistência à corrosão necessária. Contudo, apesar de ser amplamente conhecido o comportamento do aço carbono (tubo externo, ou *backing steel*) assim como o das ligas resistentes a corrosão (tubo interno, ou clad, de CRA) separadamente, a influência da associação destes materiais na pressão de colapso do duto composto ainda é tema ativo de investigação.

Uma vez instaladas, essas tubulações devem suportar as condições a que serão submetidas. Do contrário, ao ocorrer algum tipo de instabilidade local, prejuízos econômicos e ambientais incalculáveis, inevitavelmente ocorrerão. Portanto, considerando que as tubulações apresentam imperfeições, como ovalização, excentricidade e imperfeições geométricas geradas na instalação e operação das tubulações, é essencial que esses fatores sejam levados em conta ao projetar a espessura da parede do duto para evitar o colapso do componente.

Sendo assim, a norma DNV-ST-F101 estabelece que esses tubos atendam determinados requisitos de pressão externa – a pressão de colapso. Além disso, a norma também estabelece que sejam feitos ensaios em escala real para a qualificação desses dutos. A realização desses ensaios em escala real é bastante onerosa, dadas as dimensões dos componentes e as magnitudes de pressões às quais o sistema deve ser submetido. Para tanto, este trabalho pretende avaliar a viabilidade do uso de um ensaio de força em escala reduzida junto com modelos numéricos para atender esse requisito da norma e conseguir aproximar a pressão de colapso do sistema sem a necessidade de realização do ensaio de pressão em escala real.

Giordani et al. (2022) utilizou o método de Riks (RIKS, 1979) e simulações explícitas para avaliar o colapso e a propagação do colapso em tubos submarinos. Verificou-se que os dois métodos têm resultados semelhantes e que o surgimento de novos modos de falha em tubos com revestimento o número de variáveis cresce significativamente, quando comparadas aos tubos sem revestimento.

Rosas et al. (2014) estudou a correlação entre um carregamento radial, o qual pode ser aplicado com uma prensa universal, e a pressão externa de colapso de uma tubulação. Os resultados mostraram que na tubulação estudada, que é sem revestimento, a força de colapso do anel é diretamente proporcional a pressão de colapso ao quadrado.

Almeron (2021) propõe explorar a equivalência entre a pressão de colapso e a força de colapso diametral sobre tubos de aço simples e com revestimento. Os parâmetros que influenciam o problema foram considerados adimensionais e, a partir disso, foi obtida uma

expressão na forma potencial. Por fim, concluiu-se que a utilização de grupos adimensionais auxilia no entendimento do problema e generaliza os dados obtidos.

Por ser um tema relativamente novo, ainda é bastante escassa a literatura a respeito de abordagens numérica e experimental para avaliação da pressão de colapso de dutos cladeados. Versões anteriores a 2021 da DNV-ST-F101 não levavam em conta o aumento na resistência ao colapso de dutos advinda da inserção de uma camada interna do clad de CRA, embora se soubesse que naturalmente suas resistências seriam aumentadas. A versão atual (2021) desta norma indica uma expressão analítica empírica para que, então, se leve em conta a existência do clad interno à tubulação.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal estudar a relação entre a pressão de colapso de um tubo cladeado e a força de colapso sob compressão radial de um anel com mesmo diâmetro e espessura.

Os objetivos específicos são:

- Determinar a força de colapso para diferentes espessuras de anel através de simulação numérica;
- Determinar a pressão de colapso para diferentes espessuras de tubo cladeado através de simulação numérica;

3. FUNDAMENTAÇÃO

3.1 Tubos cladeados (Bimetálicos)

Tubos cladeados são aqueles que conseguem aliar características de tenacidade, resistência mecânica e custos dos aços carbonos com a resistência à corrosão dos materiais de alta liga (Barreto, 2018).

Os tubos que são fabricados a partir de materiais cladeados atendem os requisitos de durabilidade e resistência à corrosão. Sua utilização é dada em todas as áreas onde predominam as tensões dinâmicas, altas pressões e elevada corrosão dos meios transportados (Butting, 2017).

3.1.1 Aplicações submarinas na indústria de óleo e gás

Apesar de o aço carbono ainda cobrir grande parte das aplicações submarinas, em certas situações, principalmente onde a taxa de corrosão é muito alta ou a vida útil do projeto é muito longa, são demandados a utilização de ligas CRA ou aços cladeados. Sendo assim, esses produtos vêm sendo cada vez mais utilizados na indústria de óleo e gás como uma alternativa de combater corrosão a que os sistemas são submetidos. As principais aplicações são as tubulações, instalações de navios, trocadores de calor, equipamentos de cabeça de poço e outras válvulas. (Barreto, 2018).

3.1.2 Tubos cladeados e processo de fabricação

Os tubos cladeados podem ser divididos em dois principais grupos: mecanicamente cladeados (*lined pipes*) e os metalurgicamente cladeados (*clad pipes*). Além disso, podem ser fabricados de diferentes formas, sendo que o método de fabricação é determinado principalmente pelas dimensões, custo e eficácia do processo. Para aqueles que são mecanicamente cladeados, estão os expandidos e os explodidos. Já para aqueles metalurgicamente cladeados, são quatro os principais processos: explodidos, com costura, sem costura e os fundidos por centrifugação. (Barreto, 2018).

3.1.2.1 Tubos Cladeados Mecanicamente (Lined pipes)

A definição da norma DNV-ST-F101 para tubos mecanicamente cladeados é que a união entre o revestimento interno (*clad*) e o material base (*backing steel*) é mecânica. Hilberink (2011) descreve os tubos como sendo uma parede dupla, sendo que o aço carbono oferece capacidade estrutural e o revestimento oferece resistência à corrosão. Isso faz com que o tubo externo não tenha contato com o produto corrosivo que será transportado.

A ligação mecânica entre o metal base e a liga resistente à corrosão é feita através de dois principais processos: expandido (*expanded lined*) por expansão hidráulica ou termo hidráulica, e explodido (*explosively lined*). A principal diferença entre os dois consiste na magnitude das forças de ligação atingida entre o CRA e o metal base.

3.1.2.2 Tubos Cladeados Metalurgicamente (Clad Pipes)

A definição da norma DNV-ST-F101 para tubos metalurgicamente cladeados é que a união entre o revestimento interno e o material base é metalúrgica. Sendo assim, neste caso, a camada CRA é completamente aderida ao metal base por uma ligação metalúrgica, a qual tem uma parcela de difusão entre os dois materiais na zona de contato.

Para a fabricação de tubos metalurgicamente cladeados, as matérias-primas são chapas cladeadas. Consistem em chapas de um material base e um material de liga resistente à corrosão que são firmemente ligadas por uma ponte de difusão. As chapas necessariamente devem ser examinadas com relação à presença de eventuais defeitos. Através do processo de calandragem, as chapas são transformadas em tubo, que posteriormente passa pelo processo de solda longitudinal (costura). (Barreto, 2018).

3.2 Pressão de colapso

Um dos principais fenômenos relacionados à integridade estrutural de dutos submarinos é conhecido como colapso sob pressão externa. Entender a sua correlação com a pressão externa é fundamental para compreender este trabalho. O colapso de uma tubulação é o resultado de uma instabilidade estrutural, que é um distúrbio caracterizado pela alteração no equilíbrio da estrutura causado por alterações de carga e deslocamento.

Devido ao processo de fabricação, os tubos geralmente têm imperfeições (dentre elas, a sua ovalização e sua excentricidade), as quais são aceitas até determinados limites impostos pelas normas, mas que afetam de forma negativa os limites de pressão que as tubulações suportam.

O colapso dos tubos acontece quando um tubo perfeitamente circular ovaliza de forma progressiva à medida que a pressão externa aumenta, até um determinado ponto limite no qual o tubo perde a rigidez. Neste momento, foi atingida a pressão de colapso.

O critério utilizado para determinar a pressão de colapso é obtido pela curva típica de Riks. Conforme pode ser observado na Figura 1, a pressão externa aumenta até que, no ponto A, a estrutura atinge uma rigidez que tende à zero. Neste ponto, ocorre o colapso e a carga aplicada começa a diminuir.

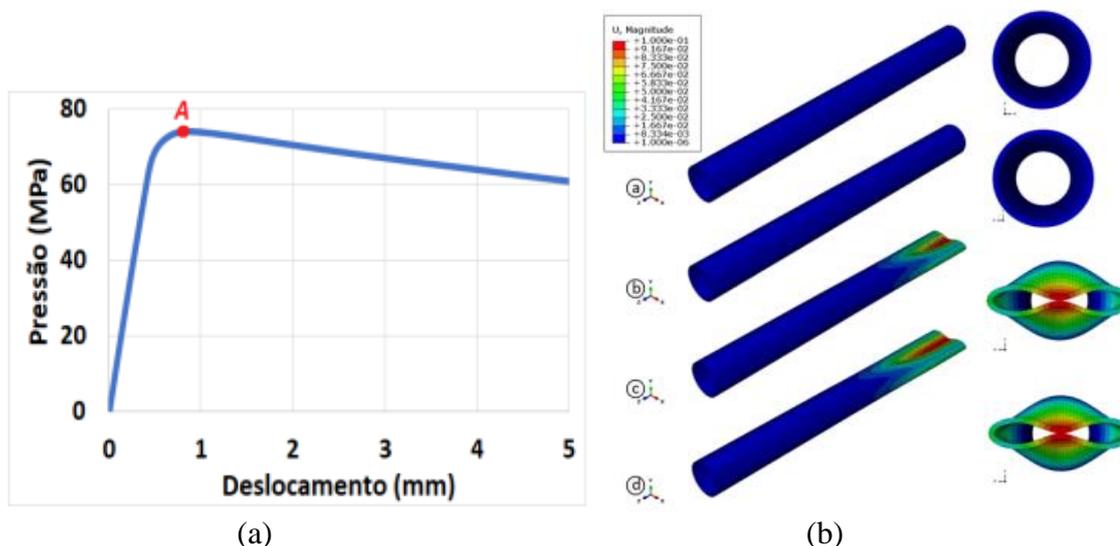


Figura 1 – (a) Curva característica da pressão de colapso de tubo cladeado. (b) Sentido onde é monitorado o deslocamento longitudinal
Fonte: (a) (Almeron, 2021). (b) (Kuhn, 2021)

3.2.1 Método experimental para determinação da pressão de colapso

Uma das alternativas para determinar a pressão de colapso é através da realização de ensaio experimental. Entretanto, estes tipos de ensaios são bastante caros e perigosos de serem realizados. Eles precisam de câmaras hiperbáricas de alta capacidade, as quais possuem custo altíssimo e protocolos de segurança muito rígidos, o que torna isso viável para poucos laboratórios, em geral, apenas aqueles que possuem melhores condições financeiras. Além disso, tem-se um problema de logística para realização dos testes, afinal as amostras de tubos devem ser encaminhadas para esses locais onde existem essas câmaras hiperbáricas capacitadas.

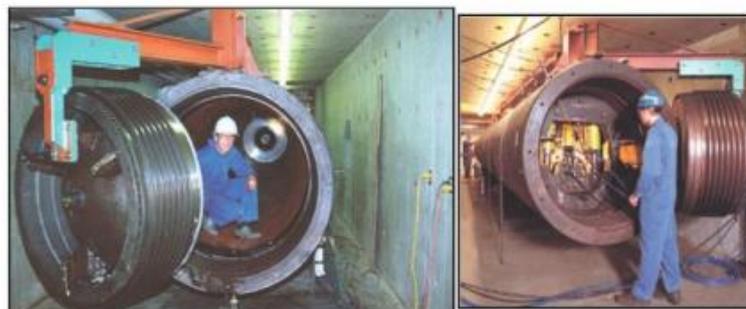


Figura 2 – Câmara hiperbárica para realização de ensaio de pressão externa de colapso
Fonte: (Dvorkin et al. 2013)

3.3 Critério para determinação da força de colapso

Ao analisar a curva característica da força de colapso de um anel retirado de uma amostra de tubo cladeado, na qual considera-se a força de reação vertical em função do deslocamento vertical aplicado na máquina de ensaio, observa-se que ela tem um comportamento diverso da curva obtida no ensaio de pressão externa. Nesses casos, a curva não possui um ponto máximo. Sendo assim, é necessária outra maneira para verificar qual é a força de colapso de determinado tubo.

O critério adotado neste trabalho, tem como base o utilizado em Rosa et al. (2014), o qual consiste em traçar uma reta paralela ao início da curva força *versus* deslocamento no ponto referente a um deslocamento igual a 1,5% do diâmetro externo (Figura 3). A força de colapso será dada no ponto em que essa reta paralela deslocada encontra a curva de força *versus* deslocamento. Esse critério é uma convenção, visto que é assumido que não há grande encruamento até o colapso.

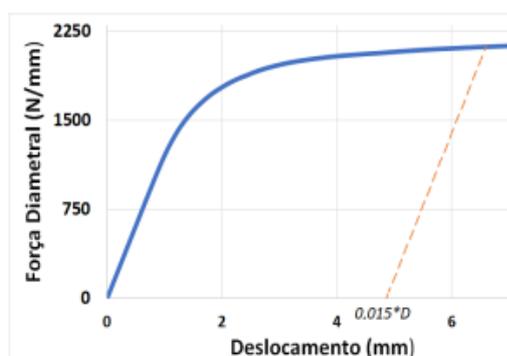


Figura 3 – Demonstração do método para determinação da força de colapso de tubo cladeado
Fonte: (Almeron, 2021)

4. METODOLOGIA

Conforme observado no capítulo anterior, este trabalho consiste em avaliar a possibilidade de se estimar a pressão de colapso de uma tubulação metalurgicamente cladeada a partir do resultado de força de colapso de um anel com a mesma razão D/t em um ensaio de compressão diametral, eliminando, assim, a necessidade de se realizar um ensaio de pressão em escala real.

4.1 Modelo para determinação da força de colapso

Em um primeiro momento, desenvolveu-se o ensaio numérico do anel através do método de elementos finitos para determinação da força de colapso. Para a simulação numérica, utilizou-se o *software* Abaqus. No processo de simulação são utilizadas 3 estruturas geométricas, conforme pode ser observado na Figura 4: o tubo externo (componente 1), tubo interno (componente 2) e o bloco (componente 3). Dada a simetria do tubo, apenas um quarto da geometria foi modelada.

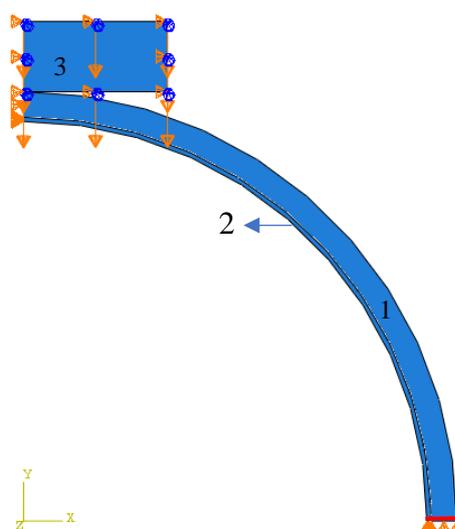


Figura 4: Estrutura geométrica do modelo
Fonte: Autor (2022)

4.1.1 Dados do modelo

No modelo, utilizou-se os seguintes dados:

- Tubo externo: elemento bidimensional CPS8 (quadrilátero de 8 nós, interpolação quadrática) considerando estado plano de tensões. A ovalização considerada foi de 0,5%. A excentricidade considerada foi 0. O material do tubo externo é o aço X65, cujo comportamento tensão *versus* deformação foi retirada de Barreto (2018) e pode ser visualizada no Apêndice I. Suas propriedades principais são: módulo de elasticidade de 207 GPa; tensão de escoamento de 450 MPa; coeficiente de Poisson igual a 0,3. O diâmetro externo utilizado foi 202,21 mm e diferentes espessuras de tubo foram utilizadas 15 mm, 12 mm, 9 mm, 8 mm, 7 mm e 6 mm.

- Revestimento interno: utilizou-se o mesmo elemento e condição de comportamento de tensão do tubo externo. O contato entre o revestimento e o tubo externo é do tipo *tie*, o qual condiciona os nós de ambas as superfícies a terem o mesmo valor de deslocamento e pressão. Além disso, o material desse revestimento foi simulado como Inconel 625, cuja curva tensão *versus* deformação foi retirada de Barreto (2018) e pode ser visualizada no Apêndice II. Suas propriedades principais são: módulo de elasticidade de 207 GPa; tensão de escoamento de 300 MPa; coeficiente de Poisson igual a 0,3. Três espessuras foram consideradas: 1 mm, 2 mm e 3 mm.

- Bloco: simula o cabeçote superior de uma máquina de ensaio, então utilizou-se o comportamento de corpo rígido.

4.1.2 Condições de contorno

Aplicou-se a condição de não deslocamento no eixo x das faces verticais e não deslocamento no eixo y das faces horizontais, conforme pode ser observado na Figura 4. Já no bloco, além da condição de não deslocamento no eixo x, foi aplicada a condição de um deslocamento prescrito de 8 mm no eixo y.

4.1.3 Malha

Conforme Kuhn (2021), em concordância com Bastola (2013), que adotam o critério de uma diferença menor que 1% entre as malhas para o valor da obtenção da pressão de colapso, nos modelos deste trabalho, utilizou-se uma malha com 80 elementos na circunferencial e 4 elementos na espessura do tubo externo. Além disso, no material de revestimento foi utilizado o mesmo critério para definição da malha, mas como sua espessura é menor comparada a do tubo externo, utilizou-se 3 elementos na espessura. Na Figura 5, é possível visualizar a malha utilizada.

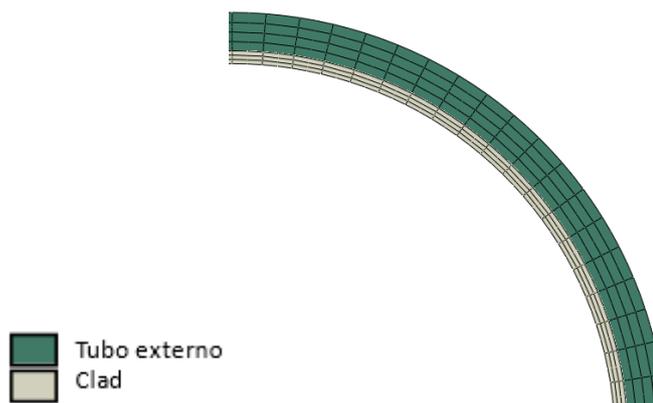


Figura 5 – Malha utilizada nas simulações numéricas para determinação da força de colapso e da pressão de colapso
Fonte: Autor (2022)

4.1.4 Simulações para determinação da força de colapso

As simulações foram realizadas de forma a atingir todas as combinações possíveis entre as dimensões citadas anteriormente, ou seja, primeiro foi feita a variação da espessura do revestimento, mantendo a espessura do tubo externo constante e, posteriormente, foi feita a variação da espessura do tubo externo. Sendo assim, foram 18 combinações diferentes.

Monitorou-se a força de reação no eixo y (ver Figura 4) em cada nó das arestas horizontais do material de revestimento e do tubo externo. Através do somatório dessas forças, determinou-se a força de colapso utilizando o critério adotado em Rosa et al. (2014). Na Figura 4, é possível observar, destacadas em vermelho, as superfícies nas quais foi feito o monitoramento da força em y e, posteriormente, feito o somatório para obtenção da força total de reação em y.

4.2 Modelo para determinação da pressão de colapso

Para obtenção da pressão de colapso, desenvolveu-se um modelo bastante similar ao anteriormente descrito, entretanto as principais diferenças estão na aplicação de algoritmo baseado no Método de Riks e na não utilização da simetria na estrutura, pois no modelo de pressão externa não é possível aplicar a condição de pressão externa com uma parte interna do tubo exposta a essa mesma pressão. Os materiais utilizados foram os mesmos e as variações de espessura, tanto do tubo externo, bem como do revestimento, foram as mesmas. Ademais, uma diferença que vale destacar, é que nos modelos de pressão, utilizou-se a condição de estado plano de deformação. O modelo pode ser observado na Figura 6. As condições de malha e elementos foram as mesmas que a do modelo de força de colapso.

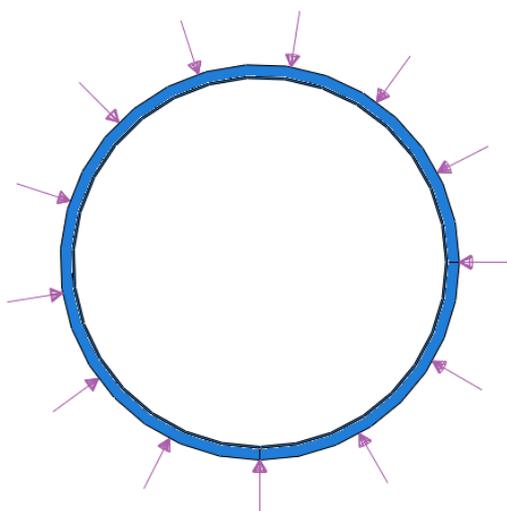


Figura 6: Modelo para determinação da pressão de colapso
Fonte: Autor (2022)

4.3 Relação da pressão de colapso em função da força de colapso e de D/t_t

Após a realização das simulação numéricas, com o auxílio da ferramenta *cftool* disponível no *software* Matlab, determinou-se a equação que deixa a pressão de colapso P_c em função de força de colapso F_c e da razão D/t_t . Entretanto, como pode ser observado na Equação 1, dada a necessidade de encontrar uma única equação para diferentes espessuras de CRA, neste caso considerou-se a razão de D/t como sendo a razão entre diâmetro externo do tubo e a espessura do tubo externo somada à espessura do material de revestimento e denominou-se D/t_t .

$$D/t_t = \frac{D}{(t+t_{CRA})} \quad (1)$$

5. RESULTADOS

5.1 Força de colapso

Através do modelo de força apresentado na seção 4.1, analisou-se o comportamento da força de colapso para diferentes espessuras de tubo externo, combinado com diferentes espessuras do material de revestimento.

Na Figura 7 observa-se a variação da força de colapso nos anéis, obtida através do método descrito em Rosas et al. (2014), em função das diferentes razões D/t estudadas. Além disso, é possível analisar a variação da força de colapso ao alterar a espessura do material de revestimento e manter a espessura do tubo externo constante.

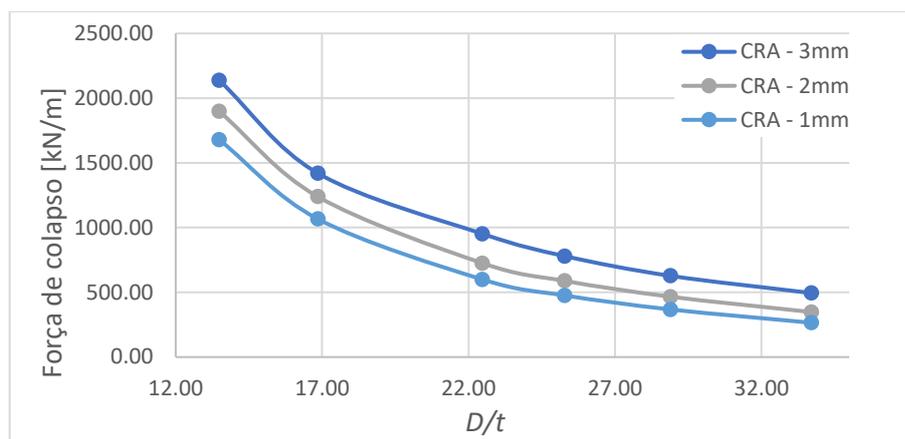


Figura 7 – Curvas de forças de colapso em um anel obtidas através de simulação numérica para diferentes espessuras de material de revestimento em função da razão D/t .

Fonte: Autor (2022)

5.2 Pressão de colapso

Através do modelo de pressão descrito na seção 4.2, estudou-se o comportamento da pressão externa para diferentes espessuras de tubo externo, combinadas com diferentes espessuras do material de revestimentos.

Na Figura 8 é possível verificar a variação da pressão em função das diferentes espessuras de tubo externo consideradas e, além disso, observar a variação da pressão de colapso que a alteração na espessura do CRA provoca para uma mesma espessura de tubo externo.

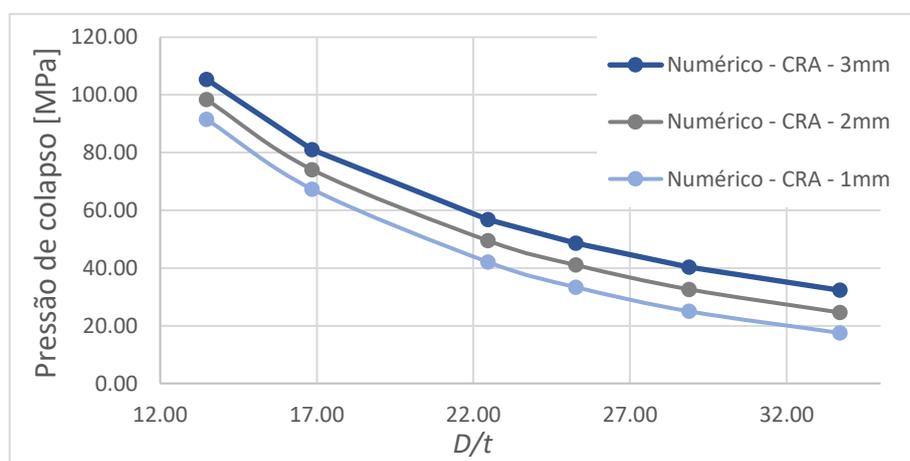


Figura 8– Curvas de pressão de colapso obtidas através do modelo numérico para diferentes espessuras de material de revestimento em função da razão D/t .

Fonte: Autor (2022)

5.3 Relação entra a força de colapso, D/t_i e a pressão de colapso

Com os dados de F_c e P_c em função da razão D/t_i , procedeu-se o ajuste dos dados a um modelo de potência, chegando-se na relação.

$$P_c \left(\frac{D}{t_t}, F_c \right) = 12,46 * \left(\frac{D}{t_t} \right)^{-16,85} + 0,2648 * (F_c)^{0,7854} \quad (2)$$

que traz uma predição da pressão de colapso P_c de um tubo cladeado em função da força de colapso de um anel (F_c) e da razão D/t . Vale destacar que o resultado de P_c obtido pela equação é em MPa, então o termo 12,46 tem a unidade em MPa e o termo 0,2648 tem a unidade $\left[\frac{10^3}{m^2}\right]^{0,2146}$, visto que o termo F_c utilizado tem a unidade em kN/m.

Além disso, foi possível plotar o gráfico da Figura 10, no qual é possível visualizar os dados de P_c obtidos pelo método numérico e os dados de P_c obtidos pela Equação 2 em função de D/t . Na Figura 11 é possível observar o erro entre os resultados obtidos pela equação proposta e pelo método numérico.

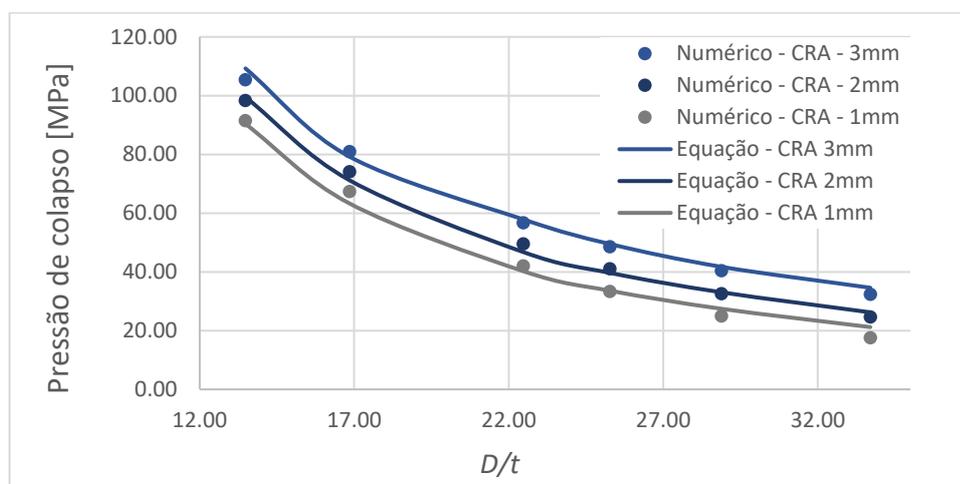


Figura 10 – Visualização da pressão de colapso obtida através do modelo numérico e da Equação 2
Fonte: Autor (2022)

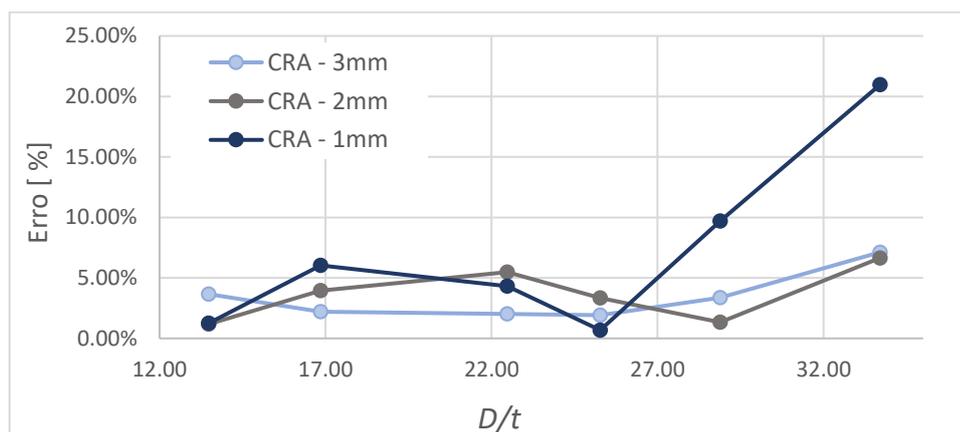


Figura 11 – Erro entre o resultado obtido pela equação proposta e o modelo numérico
Fonte: Autor (2022)

Na segunda coluna da Tabela 1, observam-se os resultados de P_c obtidos pela Equação 2. Na terceira coluna, os resultados de P_c obtidos pelos modelos numéricos e na quarta coluna, o erro entre os dois métodos.

Tabela 1: Dados de P_c determinados pela Equação 2, dados de P_c obtidos pelo modelo numérico e erro entre os métodos.

Fonte: Autor (2022)

D/t_t	P_c [MPa]- Equação 2	P_c [MPa] - Modelo numérico	erro - entre Equação 2 e modelo numérico
11.23	109.26	105.41	3.66%
11.89	99.51	98.35	1.18%
12.64	90.38	91.52	1.25%
13.48	79.21	80.99	2.19%
14.44	71.17	74.10	3.95%
15.55	63.27	67.34	6.04%
16.85	57.88	56.74	2.03%
18.38	49.49	48.55	1.92%
18.38	46.76	49.47	5.49%
20.22	41.71	40.36	3.37%
20.22	39.65	41.02	3.34%
20.22	40.25	42.07	4.32%
22.47	34.59	32.29	7.12%
22.47	33.04	32.61	1.33%
22.47	33.58	33.36	0.68%
25.28	26.22	24.59	6.65%
25.28	27.43	25.00	9.71%
28.89	21.20	17.52	20.97%

6. CONCLUSÃO

O presente estudo explorou a possibilidade de determinar uma relação matemática entre a força de colapso de um anel e a pressão de colapso de um duto submarino cladeado, para fins de reduzir o custo e o risco que o método experimental apresenta. Com isso, desenvolveu-se um modelo numérico para determinação da pressão de colapso através do método de elementos finitos. Além disso, desenvolveu-se outro modelo numérico para a determinação da força de colapso de um anel através do método de elementos finitos. Por fim, estabeleceu-se uma função matemática que é capaz de aproximar a pressão de colapso de uma tubulação através da força de colapso de um anel com mesmas propriedades e sua razão entre o diâmetro externo e espessura total.

Para trabalhos futuros, uma sugestão seria realizar ensaios experimentais para comprovar os resultados obtidos e realizar estudos com diferentes parâmetros como ovalização, materiais para tubulação e outros revestimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNV, G. L. DNVGL-ST-F101, Submarine Pipeline Systems. **Standard (DNV GL)**, 2021.

KUHN, Matheus F. **Influência da geometria de dano pré-existente nas pressões de colapso e de propagação em dutos submarinos**. 2021. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Abaqus/CAE, Manual software version 6.14-1, Dassault Systèmes Simulia Corp 2014.

BASTOLA, Ajit et al. Predicting hydrostatic collapse of pipes using finite element analysis. **In: International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V06AT04A048. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23690>

HAAGSMA, Sjoerd C.; SCHAAP, D. Collapse resistance of submarine lines studied. **Oil Gas J.;**(United States), v. 79, 1981.

ROSAS. M., Souza, A. P., Rodrigues, M., Silva, D., **Hydrostatic Collapse Pressure and Radial Collapse Force Comparisons for Ultra-Deepwater Pipelines**, 2014.

DVORKIN, E., N., Toscano, R., G., **Finite Element Analysis of the Collapse and Post-Collapse Behavior of Steel Pipes: Applications to the Oil Industry**, 2013

BUTTING. Catálogos. Disponível em: <https://www.butting.com/pt/tubos-cladeados>. Acesso em: 10 de julho de 2022.

DIAS, Allan Romário de Paula. **Estudo de transdutores eletromagnético-acústicos para a inspeção de terminações em dutos resistentes à corrosão**.2019. 122f. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ALMERON, Francisco Albuquerque. **Alternativa para determinação de pressão externa de colapso em tubulações submarinas através de força e sem revestimento interno**. 2021. 25f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BARRETO, Rodrigo Corrêa. **Comportamento mecânico de tubos cladeados: avaliação experimental e modelamento numérico**. 2018. 110f. Dissertação de mestrado. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GIORDANI, Gustavo, Havar I., Erik L., Thomas G. R. C., Allan R. P. D., Gabriel B., Ignacio I., **Propagation Pressure Collapse in Conventional Pipelines and MLPs: Numerical Investigation**, 2022.

RICKS, E. **An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems**, 1979.

APÊNDICES

Apêndice I – Curva tensão *versus* deformação do material utilizado no tubo externo das simulações numéricas

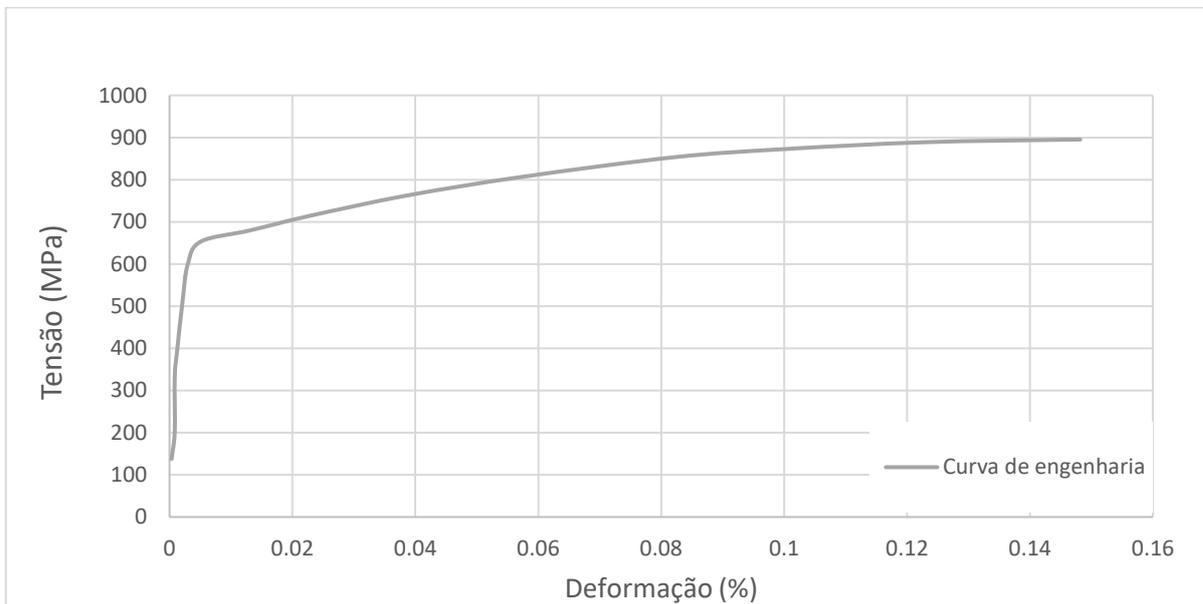


Figura 11 – Curva tensão *versus* deformação do material utilizado no tubo externo
Fonte: Autor (2022)

Apêndice II - Curva tensão *versus* deformação do material utilizado no revestimento interno das simulações numéricas

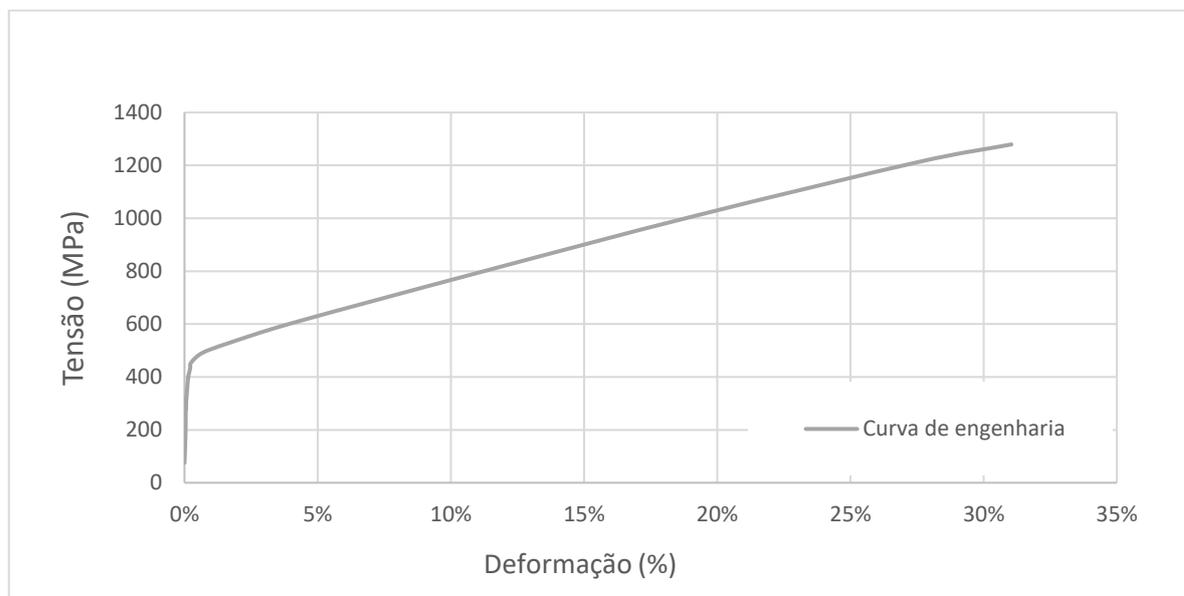


Figura 12 – Curva tensão *versus* deformação do material utilizado no revestimento
Fonte: Autor (2022)