

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

ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO EXTERNA DE COLAPSO
EM TUBULAÇÕES SUBMARINAS ATRAVÉS DA FORÇA DE COLAPSO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBULAÇÕES COM E SEM REVESTIMENTO
INTERNO

por

Francisco Albuquerque Almeron

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, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Almeron, Francisco Albuquerque
ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO EXTERNA
DE COLAPSO EM TUBULAÇÕES SUBMARINAS ATRAVÉS DA FORÇA
DE COLAPSO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBULAÇÕES COM
E SEM REVESTIMENTO INTERNO / Francisco Albuquerque
Almeron. -- 2021.
25 f.
Orientador: Ignacio Iturrioz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Tubulações Submarinas. 2. Pressão de Colapso. 3.
Compressão Diametral. I. Iturrioz, Ignacio, orient.
II. Título.

Francisco Albuquerque Almeron

ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO EXTERNA DE COLAPSO
EM TUBULAÇÕES SUBMARINAS ATRAVÉS DA FORÇA DE COLAPSO POR
COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBULAÇÕES COM E SEM REVESTIMENTO
INTERNO

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. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os amigos e familiares que participaram e ajudaram na minha formação como pessoa e estiveram presentes durante o período da minha graduação.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica e me ensinaram muito, em especial ao professor Ignacio Iturrioz por todas as horas dedicadas a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de qualidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ALTERNATIVA PARA A DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO EXTERNA DE COLAPSO EM TUBULAÇÕES SUBMARINAS ATRAVÉS DA FORÇA DE COLAPSO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EM TUBULAÇÕES COM E SEM REVESTIMENTO INTERNO

Almeron, Francisco

francisco.almeron@gmail.com

Resumo. A análise de falhas tem papel fundamental no projeto de tubulações submarinas devido à diversas formas de colapso que elas podem apresentar. Um exemplo é a flambagem local, causada pela pressão externa, que é a carga primária nesta configuração. Contudo, realizar testes que permitam determinar esta pressão experimentalmente são muito caros e perigosos de serem realizados. Neste trabalho é apresentada uma alternativa para determinar a pressão externa de colapso em tubulações, a partir de uma correlação entre ela e uma força de compressão diametral, aplicada por uma prensa universal. Também é estudada a possibilidade de estender essa equivalência ao caso de tubulações com uma camisa interna metálica mecanicamente colada. Essa equivalência é verificada numericamente utilizando o método dos elementos finitos considerando a não linearidade física e geométrica no problema estudado. A simulação é realizada no sistema Abaqus e é aplicada uma metodologia utilizando análise dimensional. As expressões obtidas possuem a forma potencial e demonstram uma boa correlação entre a pressão externa de colapso e a força de colapso devido à compressão diametral.

Palavras-chave: tubulações submarinas, elementos finitos, pressão externa, compressão diametral, análise dimensional

An alternative for the determination of the external collapse pressure in submarine pipes through the collapse force by diametral compression in pipes with and without internal liner.

Abstract. Failure analysis plays a fundamental role in the design of subsea pipelines due to the different forms of collapse they can present. An example is local buckling, caused by external pressure, which is the primary load in this configuration. However, carrying out tests that allow the determination of this pressure experimentally are very expensive and dangerous to be carried out. In this work, an alternative to determine the external collapsing pressure in pipes is presented, based on a correlation between it and a diametrical compression force, applied by a universal press. The possibility of extending this equivalence to the case of pipes with a mechanically glued metallic inner jacket is also studied. This equivalence is verified numerically using the finite element method considering the physical and geometric nonlinearity in the studied problem. The simulation is carried out in the Abaqus system and a methodology using dimensional analysis is applied. The expressions obtained have the potential form and demonstrate a good correlation between the external collapsing pressure and the collapsing force due to diametral compression.

Keywords: subsea pipelines, finite elements, external pressure, diametrical compression, dimensional analysis

NOMENCLATURA

Símbolos

P_{co}	Pressão de colapso	[MPa]
P_{el}	Pressão elástica	[MPa]
P_{pl}	Pressão plástica	[MPa]
f_o	Ovalização	[adimensional]
D	Diâmetro externo	[mm]
t	Espessura	[mm]
E	Módulo de elasticidade	[MPa]
$D_{máx}$	Diâmetro máximo	[mm]
$D_{mín}$	Diâmetro mínimo	[mm]
D_{nom}	Diâmetro nominal	[mm]
a	Grandeza física estudada	[-]
F	Força diametral	[N/mm]
f	Função da relação funcional entre os parâmetros da P_{co}	[-]
g	Função da relação funcional entre os parâmetros da F	[-]
b_i	Parâmetros com dimensões dependentes	[-]
a_i	Parâmetros com dimensões independentes	[-]
t_{bs}	Espessura do tubo externo	[mm]
\bar{C}	Constante da função que relaciona P_{co} com F	[adimensional]
k	Expoente da função que relaciona P_{co} com F	[adimensional]
C_I	Constante da função da P_{co}	[adimensional]
C_{II}	Constante da função da F	[adimensional]

Símbolos gregos

α	Expoente referente ao parâmetro Π	[adimensional]
α_{fab}	Parâmetro de fabricação	[adimensional]
β	Expoente referente ao parâmetro Π	[adimensional]
γ	Expoente referente ao parâmetro Π	[adimensional]
δ	Expoente referente ao parâmetro Π	[adimensional]
$\hat{\delta}$	Expoente na função que relaciona P_{co} com F	[adimensional]
ν	Coefficiente de Poisson	[adimensional]
Π	Grupo pi	[adimensional]
Φ	Função da relação funcional entre os parâmetro Π	[-]
σ_y	Tensão de escoamento	[MPa]
$\sigma_{y,bs}$	Tensão de escoamento do tubo externo	[MPa]
$\sigma_{r,bs}$	Tensão de ruptura do tubo externo	[MPa]
$\sigma_{y,L}$	Tensão de escoamento do tubo interno	[MPa]
$\sigma_{r,L}$	Tensão de ruptura do tubo interno	[MPa]

Abreviaturas e acrônimos

DNV	Det Norske Veritas
MLT	Massa, comprimento e tempo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.	FUNDAMENTAÇÃO	4
3.1.	Instabilidade e flambagem local	4
3.2.	Pressão de colapso e bifurcação	4
3.3.	Análise dimensional e teorema dos grupos Π	5
3.4.	Método dos Mínimos Quadrados	6
4.	METODOLOGIA	7
5.	ANÁLISE DO PROBLEMA	8
5.1.	Descrição do problema	8
5.2.	Modelos utilizados	10
6.	RESULTADOS	11
6.1.	Pressão de colapso.....	11
6.2.	Proposta A	12
6.3.	Proposta B.....	13
6.4.	Tubulação com revestimento.....	14
6.5.	Tensões circunferenciais	15
7.	CONCLUSÃO	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
	APÊNDICE A – Convergência de malha	17
	APÊNDICE B – Curva X65	18

1. INTRODUÇÃO

Sistemas e linhas de tubulações são utilizadas para a exploração e transporte de petróleo e outras fontes de hidrocarbonetos. Estes combustíveis fósseis são os principais responsáveis pela produção de energia primária no planeta e estão diretamente relacionados ao desenvolvimento econômico de diversas regiões. A grande demanda por esses recursos naturais resultou em um grande crescimento da indústria *offshore*, que rapidamente se expandiu e, com os avanços tecnológicos, é capaz de explorar águas cada vez mais profundas, podendo chegar em profundidades de 3000 metros. As tubulações submarinas utilizadas nessas operações devem ser projetadas para resistir a locais de instalação com pressões cada vez mais altas e elevadas temperaturas nos poços de petróleo. A hostilidade deste ambiente é um dos grandes desafios técnicos desta indústria que resulta em muita pesquisa e desenvolvimento na área.

Uma das solicitações críticas em tubulações submarinas é quando elas estão submetidas à pressão hidrostática, o que pode levar ao colapso por flambagem local. Quando uma certa carga crítica é atingida, neste caso, chamada de pressão de colapso, a rigidez da estrutura tende a zero, neste momento, a tubulação colapsa, pois a configuração de flambagem é mais favorável energeticamente. Camotim et al. (2000). Por este motivo, as tubulações submarinas possuem uma relação entre o seu diâmetro externo e sua espessura, denominados D/t , menor que as tubulações terrestres, sendo esta relação uma medida da esbelteza da estrutura em análise. A relação D/t pode variar de 50 para águas rasas, 15 para águas profundas e valores ainda mais baixos para linhas de fluxo de alta pressão. Devido às grandes pressões que os oleodutos submarinos estão expostos, novos processos de manufatura foram desenvolvidos, como a conformação de tubos sem costura através de tarugos. As vantagens da utilização de dutos sem emendas por soldas são a maior resistência, flexibilidade, melhor uniformidade dimensional e com isso, maior segurança. As especificações para a produção destas tubulações incluem tolerâncias dimensionais, como a espessura de parede, excentricidade e ovalidade. Todos estes parâmetros afetam a qualidade do duto, e podem influenciar na pressão de colapso, detalhes sobre estas características podem ser encontradas no livro de Kyriakides et al. (2007). A Figura 1 apresenta uma configuração de colapso típica devido à pressão externa.



Figura 1. Colapso por flambagem local de uma tubulação sob pressão externa.

Fonte: (Kyriakides et al. 2007).

Portanto, a pressão externa de colapso é um dos principais critérios de projeto de uma tubulação submarina. Ela pode ser estipulada com expressões analíticas como a proposta por Haagsma & Schaap (1981) utilizada por órgãos reguladores internacionais, como o DNV GL (2013). Existe desenvolvimento tecnológico implementado em *softwares* comerciais de elementos finitos como o sistema Abaqus (2014) que permitem modelar diversos aspectos do colapso em tubulações realizando análises levando em consideração diversos tipos de não linearidades que interagem. No caso específico do Abaqus este problema pode ser resolvido em

forma quase estática utilizando o algoritmo proposto por Riks (1979). Entretanto, quando se deseja verificar experimentalmente esta pressão de colapso, algumas barreiras são encontradas. Realizar testes que permitam determinar a pressão de colapso experimentalmente são muito caros e perigosos de serem realizados. Eles necessitam de uma câmara hiperbárica de alta capacidade, as quais possuem um custo altíssimo e ser utilizadas com protocolos de segurança muito rígidos, sendo muito difícil viabilizar a sua construção em laboratórios de pequeno e médio porte.

Assim, gera-se um problema de logística para a realização desses testes, pois as amostras de tubulação devem ser encaminhadas para a realização dos testes em algum local onde há uma câmara hiperbárica capacitada para realizar o experimento. Uma alternativa aqui estudada é investigar a correlação entre a pressão de colapso externa e algum outro carregamento de colapso que possa sim ser determinado de forma mais segura e barata experimentalmente. Estudos prévios de outros autores, como Rosas et al. (2014), têm mostrado uma muito boa correlação entre a pressão de colapso e a força de colapso frente a um carregamento diametral, que pode ser aplicado com uma prensa universal, podendo assim realizar um experimento sem a necessidade de uma câmara hiperbárica. A Figura 2 apresenta uma câmara hiperbárica para o teste de pressão externa e uma prensa universal, que pode ser utilizada para o ensaio da força de colapso em uma tubulação.



Figura 2 – (a) Câmara hiperbárica para o ensaio da pressão externa de colapso. (b) Prensa universal para o ensaio da força de colapso diametral.

Fonte: (Dvorkin et al. 2013 e Rosas et al. 2014).

Um outro fator a ser considerado é que os oleodutos submarinos são formados por multicamadas, ou seja, tubos concêntricos que possuem funções específicas para o bom funcionamento do projeto, como mostra a Figura 3. Uma destas configurações seria a formada por um tubo externo, projetado para resistir a altas pressões hidrostáticas e um tubo interno, funcionando como um revestimento, acoplado mecanicamente, projetado para transmitir fluidos corrosivos e hidrocarbonetos em altas temperaturas. Nesta configuração, a camada interna colabora na resistência mecânica do conjunto, no entanto, a influência entre as multicamadas para a determinação da pressão de colapso não é trivial e não há expressões teóricas no relatório do órgão DNV GL (2013) que permitam realizar esta avaliação.

Ao realizar um estudo como este, onde diversas variáveis com grandezas físicas são consideradas para a resolução do problema, surgem dificuldades para a compreensão dos resultados obtidos. Dependendo da quantidade de variáveis que governam o problema, são necessárias centenas de correlações para obter-se um resultado final, que abrange todos os casos possíveis. Uma proposta de engenharia é combinar os parâmetros que governam o problema a fim de deixá-los de forma adimensional, o que possibilita uma maior compreensão do estudo proposto e diminui a quantidade de correlações necessárias.



Figura 3. (a) Vista de uma tubulação formada por um tubo principal e um revestimento., (b) Configuração pós colapso de uma tubulação com revestimento interno. Fonte: (Zhao et al. 2015).

Segundo Barenblatt (2003), as aplicações dos métodos de análise dimensional permitem gerar uma relação funcional empírica para resolver um problema geral, avaliar as limitações de um sistema já existente, ou obter resultados quando nenhum outro método de análise é possível. Neste contexto no presente trabalho é utilizada a análise dimensional para avaliar os parâmetros adimensionais que governam o colapso de um tubo submetido à pressão externa e também frente a uma força diametral, e posteriormente estudar a relação entre os dois cenários de carga de que parâmetros depende, o estudo é estendido para o caso de ter dois tubos mecanicamente unidos. Dentro do contexto apresentado é possível explicitar os objetivos do trabalho:

Objetivo Geral: Explorar a equivalência entre pressão de colapso e força de colapso diametral sobre tubos de aço simples e compostos.

Objetivos Específicos:

- Obter uma expressão que correlacione a pressão externa de colapso e a força de colapso diametral em uma tubulação simples.
- Obter uma expressão que correlacione a pressão externa de colapso e a força de colapso diametral em uma tubulação com revestimento.

Após a presente introdução onde a motivação do trabalho e os objetivos são apresentados, na seção 2 a fundamentação teórica do trabalho é apresentada, descrevendo conceitos de colapso em uma tubulação e análise dimensional. A seção 3 compreende a revisão bibliográfica, onde são descritos artigos em que foram analisados a pressão externa de colapso em uma tubulação. A seção 4 descreve a metodologia, onde as ferramentas utilizadas para a realização deste trabalho são apresentadas. Na seção 5, está a descrição do problema e os modelos estudados. A seção 6 apresenta os resultados e discussões. Por fim, a seção 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Rosas et al. (2014) propõe a correlação entre o carregamento radial, que pode ser aplicado com uma prensa universal, e a pressão externa de colapso em uma tubulação. Os resultados obtidos foram que, para a tubulação estudada, a força de colapso por compressão é diretamente proporcional a pressão de colapso ao quadrado.

Alrsai et al. (2018) Utilizou parâmetros adimensionais para obter uma equação que determinasse a pressão de colapso de um tubo interno em um sistema de tubulação com mais de uma camada. A expressão obtida é potencial e possui diversos coeficientes determinados por modelos em elementos finitos.

Bastola (2013) realizou um estudo com o objetivo de verificar a influência de diversos fatores sobre a pressão externa de colapso em uma tubulação. Este estudo enfocou nos

principais fatores que influenciam a pressão de colapso, incluindo ovalidade, excentricidade, curva de tensão-deformação do material e tensão residual. As conclusões foram que a ovalidade inicial da tubulação é o principal fator sobre a pressão de colapso. A excentricidade e as tensões residuais na direção circunferenciais, pouco influenciaram.

Fallqvist (2009) também realizou um estudo a fim de verificar a influência de diversos fatores sobre a pressão externa de colapso em uma tubulação. O seu foco foi em parâmetros que não estão presentes nas equações tradicionais utilizadas para determinar a pressão de colapso, como a variação da espessura de parede e a curva tensão-deformação. Ele concluiu que a característica da curva tensão-deformação do material é um parâmetro muito importante na análise de colapso. Isso fica muito claro em seu estudo quando se compara um material com uma curva de encruamento real e um modelo com endurecimento elástico perfeitamente plástico.

3. FUNDAMENTAÇÃO

3.1 Instabilidade e flambagem local

A instabilidade é um dos principais fatores que limitam a extensão em que as estruturas podem ser carregadas ou deformadas. Kyriakides et al. (2007). Uma estrutura é considerada em equilíbrio estável quando um carregamento externo é aplicado sobre ela e após uma pequena perturbação, a estrutura oscila sobre o estado de equilíbrio e o nível de carga externa permanece constante. Se a estrutura tende a permanecer no estado perturbado, ela está em equilíbrio indiferente. E se a estrutura, após uma perturbação, diverge da solução trivial do estado de equilíbrio, ela está em equilíbrio instável. A Figura 4 ilustra essas três configurações de equilíbrio.

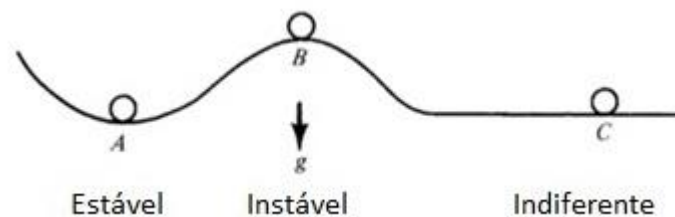


Figura 4. Três configurações de equilíbrio.

Fonte: (Simitzes & Hodges, 2006).

A flambagem local é uma instabilidade estrutural devido a tensões compressivas. No caso de uma tubulação sob pressão externa, ela irá se deformar por compressão, tendendo a um formato oval. Quando ela atingir uma determinada condição de carregamento, a configuração pré-flambagem se torna instável e a rigidez da estrutura tende a zero. Nesse momento, uma configuração diferente torna-se mais favorável energeticamente e então ocorre a flambagem, ou seja, a estrutura troca de uma configuração para outra, repentinamente. A carga na qual esta mudança ocorre é a carga crítica de flambagem.

3.2 Pressão de colapso e bifurcação

A carga de flambagem é estabelecida por meio de uma análise de bifurcação. Essa configuração é denominada desta forma, pois em um momento anterior a da carga crítica, a configuração direta é a única solução para o problema. Na carga crítica, duas soluções tornam-se possíveis: a reta, que é instável, e a curva desviada. Bifurcação é o termo que descreve o instantâneo, é a existência de duas soluções no ponto crítico. Kyriakides et al. (2007).

Ao mudar de trajetória, a tubulação colapsa atingindo a sua pressão máxima. Essa pressão é considerada como pressão de colapso (P_{co}). O DNV GL (2013) é uma das normas que regula os estudos em tubulações submarinas e utiliza a equação de Haagsma para definir a pressão de colapso como:

$$(P_{co} - P_{el})(P_{co}^2 - P_{pl}^2) = P_{co} \cdot P_{el} \cdot P_{pl} \cdot f_o \cdot \frac{D}{t} \quad (3.1)$$

$$P_{el} = 2 \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (3.2)$$

$$P_{pl} = \alpha_{fab} \cdot 2\sigma_y \cdot \left(\frac{t}{D}\right) \quad (3.3)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{nom}} \quad (3.4)$$

Onde P_{co} é a pressão de colapso, P_{el} é a pressão elástica, P_{pl} é a pressão plástica, f_o é a ovalização inicial da tubulação, D é o diâmetro externo, t é a espessura, E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, α_{fab} é um fator de fabricação, σ_y é a tensão de escoamento, D_{max} é o diâmetro máximo, D_{min} é o diâmetro mínimo e D_{nom} é o diâmetro nominal. A Equação 3.1 propõe que a pressão de colapso é uma interação entre a flambagem elástica e o colapso plástico. Assim, dois comportamentos típicos da pressão de colapso são observados para diferentes faixas da relação D/t . Quando $D/t > 30$, a pressão de colapso é governada pela flambagem elástica e quando $D/t < 10$, a pressão de colapso é governada pela plastificação. E entre essas duas faixas de valores, a pressão de colapso é resultante da interação destes dois mecanismos de colapso. A Figura 5 (a) apresenta as curvas características da pressão elástica, pressão plástica e a da pressão de colapso, definida pela Equação 3.1 que considera a interação entre essas duas pressões. Nela, é possível notar o comportamento da pressão de colapso para diferentes D/t . A Figura 5 (b), apresenta o comportamento da pressão de colapso em função de D/t .

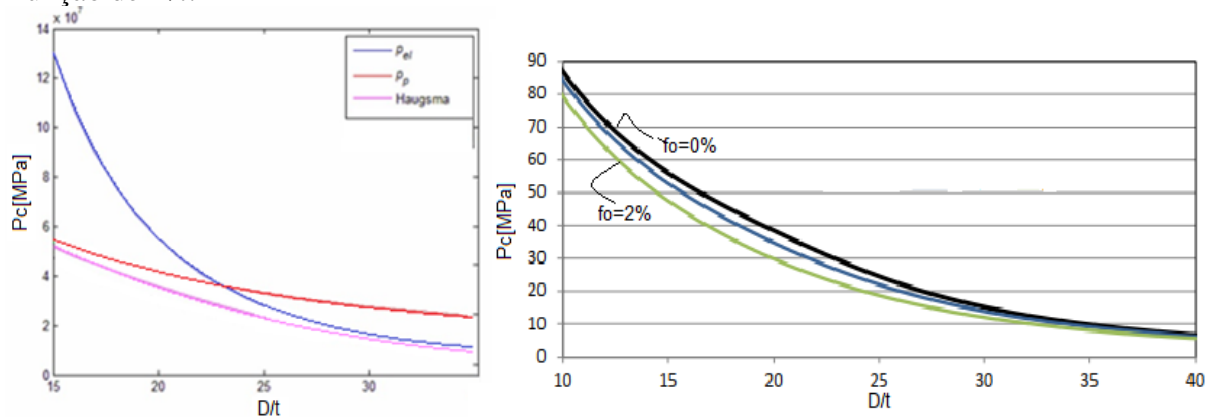


Figura 5. (a) pressão de colapso proposta por Haagsma & Schaap 1981. (a) pressão de colapso vs D/t em magenta, pressão do flambagem elástica em azul e pressão de colapso plástico em vermelho. (b) sobre a curva de colapso e indicado como influencia a ovalização.

Fonte: (Fallqvist, 2009)

3.3 Análise dimensional e teorema dos grupos Π

Em qualquer estudo físico (teórico ou experimental), procuramos obter relações entre as grandezas que caracterizam o fenômeno em estudo. Assim, o problema sempre se reduz a determinar uma ou várias relações entre os parâmetros. Barenblatt (2003). Em determinados

casos, são necessárias diversas variáveis para entender um fenômeno físico, e isso gera uma grande quantidade de relações, dificultando o entendimento do problema. Utiliza-se então a análise dimensional, que transforma as variáveis em adimensionais, reduzindo o número de parâmetros necessários para descrever o fenômeno. A Equação 3.5 descreve a relação funcional entre uma grandeza estudada com seus parâmetros governantes.

$$a = f(a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k) \quad (3.5)$$

Onde a configura a grandeza estudada; a_i configuram os parâmetros governantes com dimensões físicas independentes; b_i configuram os parâmetros governantes com dimensões físicas dependentes e a função f retrata a relação funcional existente entre a grandeza estudada e os parâmetros governantes. A Equação 3.5 pode ser manipulada matematicamente até obter-se a Equação 3.6.

$$\Pi = \Phi(\Pi_1, \dots, \Pi_m) \quad (3.6)$$

Onde,

$$\Pi = \frac{a}{a_1^p \dots a_k^r} \quad \Pi_i = \frac{b_i}{a_1^{p_i} \dots a_k^{r_i}} \quad (3.7)$$

Os parâmetros Π e Π_i devem ser adimensionais, ou seja, devem ser independentes de todas as grandezas fundamentais, que no caso de um estudo de mecânica dos sólidos são a base MLT: massa, comprimento e tempo, respectivamente. Para isso, os expoentes p até r são manipulados, afim de satisfazer a equação. A Equação 3.6 pode ser reescrita como indicado pela Equação 3.8, que define o teorema central da análise dimensional, o chamado teorema dos grupos Π .

$$f(a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_m) = a_1^p \dots a_k^r \Phi\left(\frac{b_1}{a_1^{p_1} \dots a_k^{r_1}}, \dots, \frac{b_m}{a_1^{p_m} \dots a_k^{r_m}}\right) \quad (3.8)$$

Basicamente, a análise dimensional é um método para reduzir o número das variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico. Se um fenômeno depende de n variáveis dimensionais, a análise dimensional reduzirá o problema a apenas $m=n-k$ variáveis adimensionais, sendo k o número de grandezas utilizadas, no caso de um problema de mecânica (MLT), tem-se que $k = 3$. White (2010). Uma outra maneira de escrever a função Φ é apresentada na Equação 3.9.

$$\Phi = C_1 \Pi_1^{\alpha_1} \Pi_2^{\beta_1} \dots \Pi_\ell^{\delta_\ell} \quad (3.9)$$

Neste caso os expoentes devem ser determinados não por análise dimensional e sim levando em conta as características específicas de cada problema.

3.4 Método dos mínimos quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados consiste em encontrar uma curva que melhor se ajuste à um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os dados obtidos e o valor estimado. Considerando uma função na forma:

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \dots + \alpha_n g_n(x) \quad (3.10)$$

O método se baseia em determinar os coeficientes α_i de forma que a função $\varphi(x)$ se aproxime ao máximo de $f(x)$, função a qual está associada a cada ponto dos dados observados. Considerando $d_k = f(x_k) - \varphi(x_k)$ como o desvio em x_k , a soma dos quadrados desses desvios deve ser mínima. Então, tem-se que:

$$\sum_{k=1}^m d_k^2 = \sum_{k=1}^m (f(x_k) - \varphi(x_k))^2 \quad (3.11)$$

Para encontrar os mínimos, essa função é resolvida com derivadas parciais para a obtenção dos seus pontos críticos. O que resulta em um sistema de equações lineares na forma $A\alpha = b$ onde $A = a_{ij} = \sum_{k=1}^m g_j(x_k)g_i(x_k)$ e $b_i = \sum_{k=1}^m f(x_k)g_i(x_k)$.

Em muitos casos, a função escolhida para o ajuste não é linear, podendo ser, por exemplo, da forma $\varphi(x) = \beta g_1^{\alpha_1} g_2^{\alpha_2} \dots g_n^{\alpha_n}$. Assim, para a aplicação do método dos mínimos quadrados, deve ser feita uma linearização da função, que nesse caso fica:

$$\log(\varphi) = \log(\beta) + \alpha_1 \cdot \log(g_1) + \alpha_2 \cdot \log(g_2) + \dots + \alpha_n \cdot \log(g_n) \quad (3.12)$$

4. METODOLOGIA

Análise por Elementos Finitos: A análise presente neste trabalho é realizada numericamente utilizando o método dos elementos finitos considerando a não linearidade física e geométrica empregando o esquema proposto por Riks (1979) no problema estudado. As simulações são realizadas considerando um modelo plano (estado plano de deformações). E considerado a dupla simetria do problema e por isso discretizado só um quarto de círculo. A malha utilizada possui elementos de ordem quadrática, formada por quadriláteros com 8 nós de tamanho máximo de 4 mm de lado, totalizando 11 elementos na espessura, para o caso com menor relação D/t , o qual apresenta a maior espessura. Os demais modelos apresentam também 11 elementos na espessura, porém o tamanho da malha diminui, acompanhando a diminuição da espessura da tubulação. Um estudo de convergência foi realizado e está apresentado no APÊNDICE A. No caso dos modelos que possuem um revestimento interno, o mesmo é construído com elementos de ordem quadrática com 8 nós de tamanho máximo de 1mm, totalizando 7 elementos ao longo da espessura. Para os revestimentos com menor espessura, o número de 7 elementos é mantido. As condições de contato são dadas entre os dois tubos sendo que o atrito não foi considerado neste caso. O contato foi do tipo “hard” descrito em detalhe no manual do Abaqus (2014). Um *script* em Excel foi construído para permitir modificar a geometria do modelo no caso de ter diversas geometrias. A curva do material também foi considerada copiando a curva tensão-deformação típica destes tipos de tubos. Informação sobre este particular foi fornecida no APÊNDICE B deste trabalho.

Para simular o cenário de pressão externa uma pressão uniforme no contorno externo da tubulação é aplicada sendo que o esquema de análise Riks permite capturar não só a carga de colapso, mas também o pós-colapso. O cenário de força diametral é simulado considerando a aplicação de um deslocamento prescrito na região superior do modelo simulando a ação de uma prensa de ensaio. Também neste caso o método Riks é utilizado.

Descrição dos Modelos Estudados: A falha por colapso em uma tubulação pode ocorrer sob diversas formas de carregamento, e para cada caso podem ser considerados critérios diferentes para determinar o instante dessa falha. Nesse trabalho são considerados dois carregamentos distintos, sendo considerado em um primeiro caso, uma pressão externa e em um segundo caso, uma força de compressão diametral. O critério utilizado para a determinação da pressão de colapso é obtido pela curva típica de Riks. Como pode ser observado na Figura 6 (a), a pressão

externa é aplicada na tubulação em pequenos incrementos até que, no ponto A, a estrutura atinge uma rigidez tendendo à zero, nesse momento ocorre o colapso e a carga aplicada diminui. Assim, o gráfico obtido possui um ponto de máximo, que é o ponto onde ocorre a falha do tubo.

A força que gera o colapso da tubulação por compressão diametral é obtida por simulação numérica. São realizadas simulações com os mesmos parâmetros utilizados para a determinação da pressão de colapso. A curva característica desse tipo de ensaio é um pouco diferente da obtida no caso da pressão externa. Agora, a curva não possui mais um ponto de máximo. Para determinar o momento em que ocorre o colapso, utiliza-se um critério onde é traçada uma reta paralela ao início da curva força x deslocamento no ponto de 1,5% do D externo e assim é obtida a força no instante do colapso, como demonstrado na Figura 6 (b). Este critério é adotado com base em Rosa et al. (2014) e é utilizado apenas como uma convenção, pois é assumido que não há grande encruamento até o colapso.

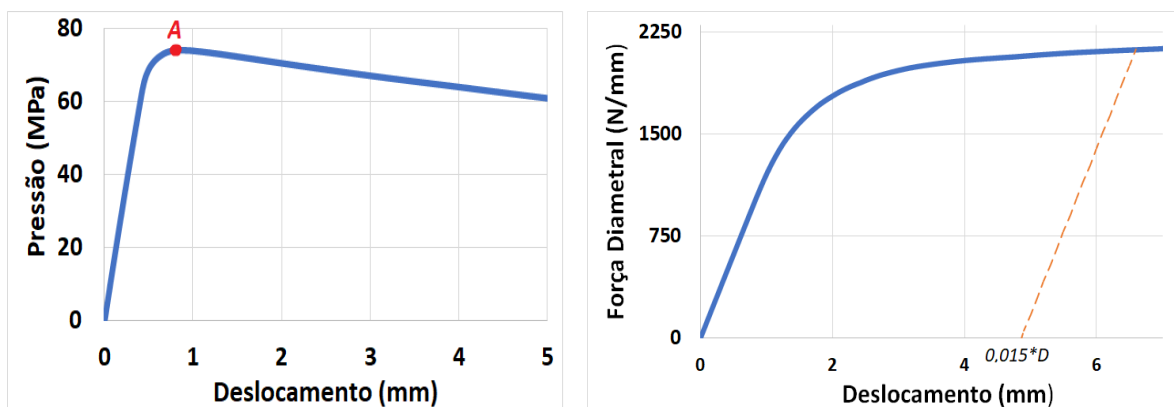


Figura 6. (a) Curva de Riks para a determinação da pressão de colapso. (b) Critério para a determinação da força de colapso.

5. ANÁLISE DO PROBLEMA

5.1 Descrição do problema

O problema estudado consiste em determinar uma correlação entre o colapso de uma tubulação devido à pressão externa P_{co} e o colapso devido à uma força diametral F_{co} .

Considerando primeiramente o caso do tubo sem revestimento para os dois cenários descritos (pressão externa e força diametral). Determinam-se os parâmetros que governam o problema estudado, através de uma análise dimensional. São considerados que as duas situações dependem dos mesmos parâmetros, porém possuem relações funcionais diferentes. Como se indica a seguir:

$$P_{co} = f(E, D, t_{bs}, f_o, \sigma_{y,bs}, \sigma_{r,bs}) \quad (5.1)$$

$$F_{co} = g(E, D, t_{bs}, f_o, \sigma_{y,bs}, \sigma_{r,bs}) \quad (5.2)$$

Onde F_{co} é a força de compressão diametral e possui a forma de força/comprimento (N/mm), E é o módulo de elasticidade, D é o diâmetro externo, t_{bs} é a espessura do tubo principal, f_o é a ovalização, $\sigma_{y,bs}$ é a tensão de escoamento e $\sigma_{r,bs}$ é a tensão de ruptura do material do tubo principal. Nesse caso, será diretamente considerado F (força) e L (comprimento), deixando fora a influência do tempo na análise. Então, tem-se que $k = 2$, ou seja, são duas as variáveis com

dimensões independentes que governam o problema. Seleccionadas neste caso como D e $\sigma_{y,bs}$, dessa forma, o número de grupos Π_i é igual a $m-n-k=6-2=4$ e eles são explicitados a seguir.

$$\Pi_I = \frac{P_{co}}{\sigma_{y,bs}}, \Pi_{II} = \frac{F_{co}}{\sigma_{y,bs} \cdot D}, \Pi_1 = \frac{E}{\sigma_{y,bs}}, \Pi_2 = \frac{D}{t_{bs}}, \Pi_3 = f_o, \Pi_4 = \frac{\sigma_{r,bs}}{\sigma_{y,bs}} \quad (5.3)$$

Com a determinação dos grupos Π , pode-se apresentar as Equações 5.4 e 5.5 da seguinte forma.

$$\Pi_I = \Phi_I(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) = C_I \Pi_1^{\alpha_I} \Pi_2^{\beta_I} \Pi_3^{\gamma_I} \Pi_4^{\delta_I} \quad (5.4)$$

$$\Pi_{II} = \Phi_{II}(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) = C_{II} \Pi_1^{\alpha_{II}} \Pi_2^{\beta_{II}} \Pi_3^{\gamma_{II}} \Pi_4^{\delta_{II}} \quad (5.5)$$

Os expoentes α_i, β_i , não precisam ser determinados individualmente, pois a ideia aqui não é determinar uma função para a pressão de colapso e outra para a força de colapso, mas sim, determinar a relação entre essas duas grandezas. Para isso, serão consideradas duas situações para as Equações 5.4 e 5.5. A primeira, que será chamada de proposta A, onde tem-se que:

$$\Pi_I = \bar{C} \Pi_{II}^k \quad (5.6)$$

Substituindo em (5.6) Π_I e Π_{II} pelas Equações (5.4) e (5.5), respectivamente.

$$C_I \Pi_1^{\alpha_I} \Pi_2^{\beta_I} \Pi_3^{\gamma_I} \Pi_4^{\delta_I} = \bar{C} C_{II}^k \Pi_1^{\alpha_{II}+k} \Pi_2^{\beta_{II}+k} \Pi_3^{\gamma_{II}+k} \Pi_4^{\delta_{II}+k} \quad (5.7)$$

Então,

$$C_I = \bar{C} C_{II}^k \rightarrow \bar{C} = \frac{C_I}{C_{II}^k} \quad (5.8)$$

$$\text{Onde } k = \alpha_I - \alpha_{II} = \beta_I - \beta_{II} = \gamma_I - \gamma_{II} = \delta_I - \delta_{II}$$

Na proposta A parte-se da premissa que todos os grupos Π_i possuem a mesma dependência ao relacionar Π_I com Π_{II} . Será visto posteriormente que a ovalização parece não cumprir corretamente esta premissa. Por isso é desenvolvida a Proposta B:

$$\Pi_I = \bar{C} \Pi_{II}^k \Pi_2^{\hat{\delta}} \quad (5.9)$$

$$C_I \Pi_1^{\alpha_I} \Pi_2^{\beta_I} \Pi_3^{\gamma_I} \Pi_4^{\delta_I} = \bar{C} C_{II}^k \Pi_1^{\alpha_{II}+k} \Pi_2^{\beta_{II}+k} \Pi_3^{\gamma_{II}+k} \Pi_4^{\hat{\delta}+\delta_{II}+k} \quad (5.10)$$

Então,

$$C_I = \bar{C} C_{II}^k \rightarrow \bar{C} = \frac{C_I}{C_{II}^k} \quad (5.11)$$

$$\text{Onde } k = \alpha_I - \alpha_{II} = \beta_I - \beta_{II} = \gamma_I - \gamma_{II} = \delta_I - \delta_{II} - \hat{\delta} .$$

Assim, pode-se definir $\hat{\delta}$ como:

$$\hat{\delta} = (\delta_I - \delta_{II}) - (\alpha_I - \alpha_{II}) \quad (5.12)$$

Os coeficientes k , $\hat{\delta}$ e a constante \bar{C} são determinados pelo método dos mínimos quadrados. A Equação 5.9 é linearizada aplicando logaritmo em ambos os membros, e dessa forma é possível resolver a equação, que está disposta a seguir.

$$\log(\Pi_I) = \log(\bar{C}) + k \cdot \log(\Pi_{II}) + \hat{\delta} \cdot \log(f_o) \quad (5.13)$$

Uma segunda etapa é realizada para o caso em que a tubulação possui revestimento interno mecanicamente colado. Nesse caso, são incluídos mais três parâmetros que governam o problema e é utilizada somente a proposta A. As Equações 5.14 e 5.15 apresentam as relações funcionais para essa situação.

$$P_{co} = f(E, D, t_{bs}, f_o, \sigma_{y,bs}, \sigma_{r,bs}, \sigma_{y,L}, \sigma_{r,L}, t_L) \quad (5.14)$$

$$F_{co} = g(E, D, t_{bs}, f_o, \sigma_{y,bs}, \sigma_{r,bs}, \sigma_{y,L}, \sigma_{r,L}, t_L) \quad (5.15)$$

Onde $\sigma_{y,L}$ é a tensão de escoamento do revestimento, $\sigma_{r,L}$ é a tensão de ruptura do revestimento, t_L é a espessura do revestimento, $\sigma_{y,bs}$ é a tensão de escoamento do tubo principal, $\sigma_{r,bs}$ é a tensão de ruptura do tubo principal, t_{bs} é a espessura de parede do tubo principal, E é o módulo de elasticidade, D é o diâmetro externo da tubulação e f_o é a ovalização. Novamente D e $\sigma_{y,bs}$ são as variáveis independentes escolhidas para adimensionalizar as expressões, dessa forma, o número de grupos Π_i é igual a $n - k = 9 - 2 = 7$ e eles estão listados a seguir.

$$\begin{aligned} \Pi_I &= \frac{P_{co}}{\sigma_{y,bs}} & \Pi_{II} &= \frac{F_{co}}{\sigma_{y,bs} \cdot D} & \Pi_1 &= \frac{E}{\sigma_{y,bs}} & \Pi_2 &= \frac{D}{t_{bs}} & \Pi_3 &= f_o & \Pi_4 &= \frac{\sigma_{r,bs}}{\sigma_{y,bs}} & \Pi_5 &= \frac{D}{t_L} \\ \Pi_6 &= \frac{\sigma_{r,L}}{\sigma_{y,bs}} & \Pi_7 &= \frac{\sigma_{y,L}}{\sigma_{y,bs}} \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.2 Modelos utilizados

A Figura 7 apresenta o modelo utilizado para a simulação com pressão externa, em (a), e força de compressão diametral, em (b).

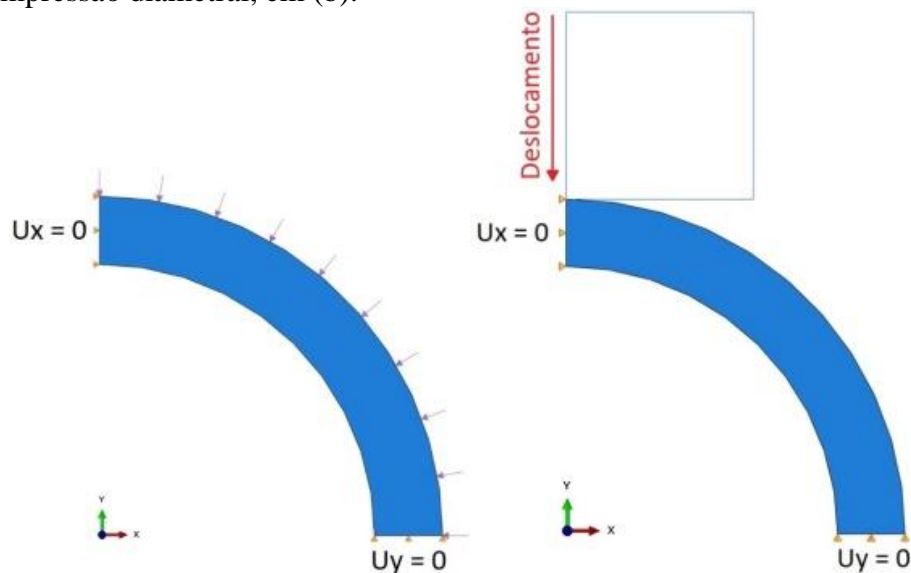


Figura 7. (a) Modelo com pressão externa. (b) Modelo com força diametral.

A pressão externa de colapso da tubulação é obtida de forma teórica, utilizando o método presente em DNV-OS-F101, que descreve as equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, e por meio de simulações numéricas. Os resultados são então comparados para a validação do modelo construído. Para o caso em que a tubulação possui um revestimento interno, a pressão externa de colapso é obtida apenas de forma numérica pois não há expressões analíticas para esse caso em DNV-OS-F101. A força de colapso é obtida apenas de forma numérica.

O material da tubulação principal foi considerado como sendo o X65 ($\sigma_{y,bs} = 450$ MPa) e para o revestimento, é considerado a liga Ni 625 ($\sigma_{y,L} = 300$ MPa). No regime plástico o comportamento do material é ajustado através do método de Ramberg-Osgood. O APÊNDICE B apresenta as curvas tensão x deformação e a expressão de Ramberg-Osgood, assim como os parâmetros utilizados. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson são considerados como 200 GPa e 0,3, respectivamente, para os dois materiais. A Figura 8 apresenta um exemplo de malha utilizada para a tubulação com e sem revestimento.

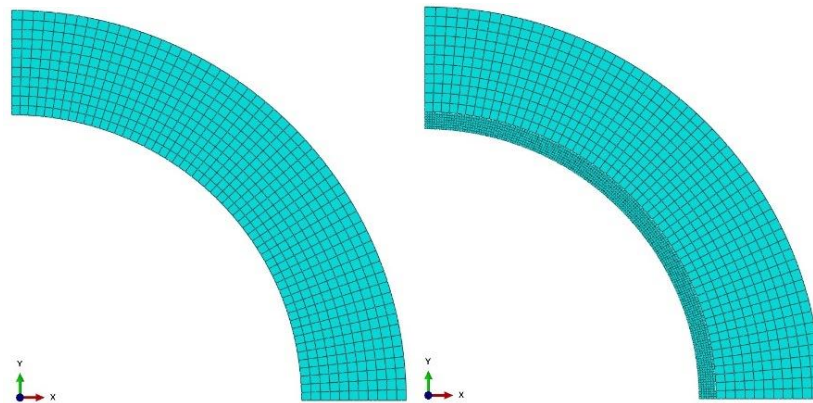


Figura 8. Discretização do modelo em FEM (a) sem revestimento e (b) com revestimento.

6. RESULTADOS

6.1 Pressão de colapso

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a pressão de colapso em uma tubulação sem revestimento, de forma analítica e numérica. A tubulação utilizada como modelo possui diâmetro externo de 323,85 mm, ovalização inicial de 1% e fator de fabricação α_{fab} igual a 1. O material utilizado foi o X65.

Tabela 1. Erro entre a pressão de colapso analítica e numérica.

D/T	P _{co} [MPa] numérica	P _{co} [Mpa] analítica	Erro [%]
7,5	150,27	115,03	30,89
10	102,83	84,6	21,54
11,25	87,84	74,3	18,22
13,5	68,11	60,2	13,14
15,75	53,91	49,6	8,68
18	43,00	41,1	4,62
20,25	34,44	33,8	1,89

Observa-se que para baixos valores de D/t há um erro considerável entre os valores numéricos e os valores analíticos calculados a partir da Equação 2.1. Um erro maior que 30% é identificado. Esta distorção é citada na bibliografia Stumpf et. al (2022) que sugere que esta diferença se deve à falta de capacidade da expressão analítica de capturar o incremento da tensão de plastificação dentro da tubulação que acontece devido à alta triaxialidade das tensões quando a relação D/t é baixa. Entretanto, é possível notar que para valores de D/t maiores, o erro relativo entre os resultados para a pressão de colapso diminui, sendo de 1,89% para o caso de $D/t = 20,25$. Com isso, pode-se concluir que o modelo numérico utilizado está de acordo com o esperado.

6.2 Proposta A

A proposta A considera que todos os parâmetros Π_i para cada relação funcional estão dentro da função Φ . Dessa forma, foram realizadas 14 simulações no total, sendo 7 para a pressão de colapso e 7 para a força de compressão diametral, considerando 7 modelos variando $\Pi_2 = [7,5 ; 10 ; 11,25 ; 13,5 ; 15,75 ; 18 ; 20,25]$, e fixando $\Pi_1 = 444,44$, $\Pi_3 = 0,01$ e $\Pi_4 = 2,12$ a fim de determinar por ajuste de curvas realizado por regressão os valores da constante \bar{C} e do expoente k . São encontrados $\bar{C} = 2,3053$ e $k = 0,6568$. A equação de ajuste fica:

$$\Pi_I = 2,3053 \Pi_{II}^{0,6568} \quad (6.1)$$

Assim, a equação que relaciona P_{co} com F_{co} é dada a seguir:

$$P_{co} = 2,3053 \left(\frac{F_{co}}{D} \right)^{0,6568} \sigma_{y,bs}^{0,3432} \quad (6.2)$$

Onde, F_{co} é a força de colapso por compressão diametral, D é o diâmetro externo da tubulação e $\sigma_{y,bs}$ é a tensão de escoamento. As Figuras 9 e 10 apresentam os gráficos com as comparações entre a curva obtida pela Equação 6.1 e valores encontrados com outros 5 modelos, onde variou-se em cada caso um dos grupos Π_i . Percebe-se que ao variar o adimensional Π_3 , os resultados para a correlação entre a pressão externa de colapso e a força de colapso por compressão radial também variam. Então, este parâmetro tem uma variação diferente que os outros ao realizar a relação entre Π_I e Π_{II} . Assim, deve ser considerado como um parâmetro adicional na Equação 6.1 acompanhado de um expoente. Os demais parâmetros apresentam bom ajuste e é possível assumir que eles não afetam a correlação.

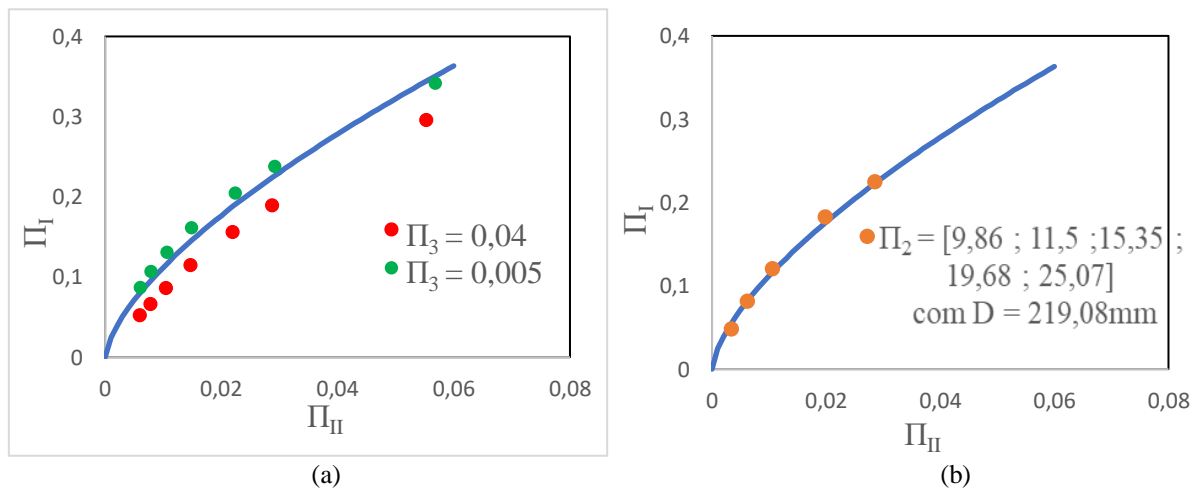


Figura 9. Comparação entre a expressão obtida e modelos com parâmetros diferentes.

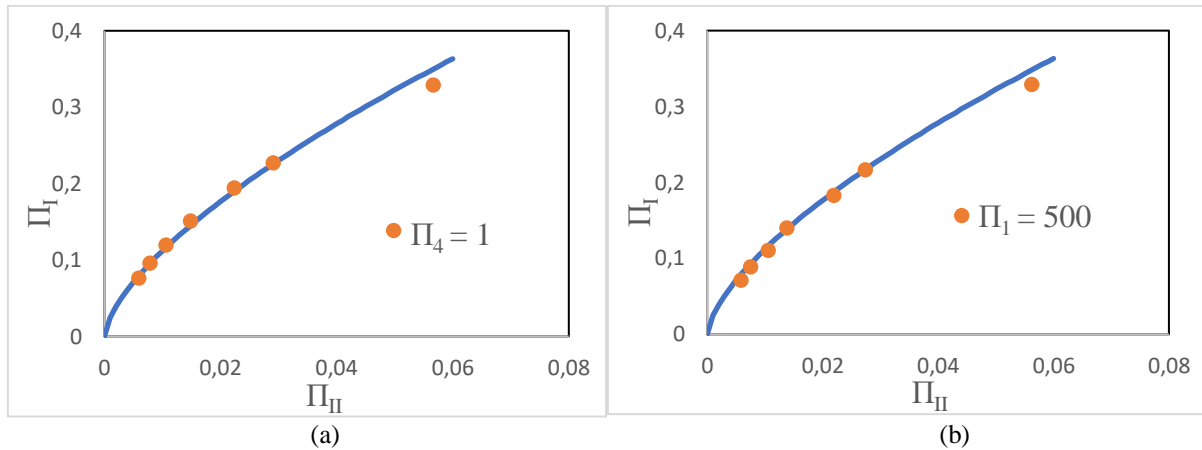


Figura 10. Comparação entre a expressão obtida e modelos com parâmetros diferentes.

6.3 Proposta B

A proposta B considera que o parâmetro adimensional Π_3 , referente a ovalização, influencia na correlação entre a pressão externa de colapso e a força de colapso por compressão radial. Assim, foram realizadas 70 simulações no total, sendo 35 para a pressão de colapso e 35 para a força de compressão diametral, variando Π_2 de 7,5 a 20,25, e Π_3 de 0,005 até 0,04, e mantendo $\Pi_1 = 444,44$ e $\Pi_4 = 2,12$. São encontrados novos valores para a constante \bar{C} e para os expoentes k e δ . A equação então fica:

$$\Pi_I = 1,32667 \Pi_{II}^{0,7063} \Pi_3^{-0,1598} \quad (6.3)$$

Assim, a equação que relaciona P_{co} com F_{co} para este caso é dada a seguir:

$$P_{co} = 1,32667 \left(\frac{F_{co}}{D} \right)^{0,7063} \sigma_{y,bs}^{0,2937} f_o^{-0,1598} \quad (6.4)$$

Onde, F_{co} é a força de colapso por compressão diametral, D é o diâmetro externo da tubulação, $\sigma_{y,bs}$ é a tensão de escoamento e f_o é a ovalização inicial da tubulação. A Equação 6.3 é comparada então com valores de 5 modelos com Π_3 variando de 0,005 até 0,04. Os resultados estão presentes nas Figuras 11 e 12. A função apresentou um ajuste com $R^2 = 0,9861$ e um erro de 0,02831, o que se demonstrou um resultado muito satisfatório. Porém, para o caso com a menor ovalização, $\Pi_3 = 0,005$ e $D/t = 7,5$, o ajuste não foi bom. Este ponto pode ser visto na Figura 11 (a) onde $\Pi_I = 0,34$ e $\Pi_{II} = 0,056$. Assim, é considerado que a Equação 6.4 possui uma faixa de valores para que ela possa ser utilizada.

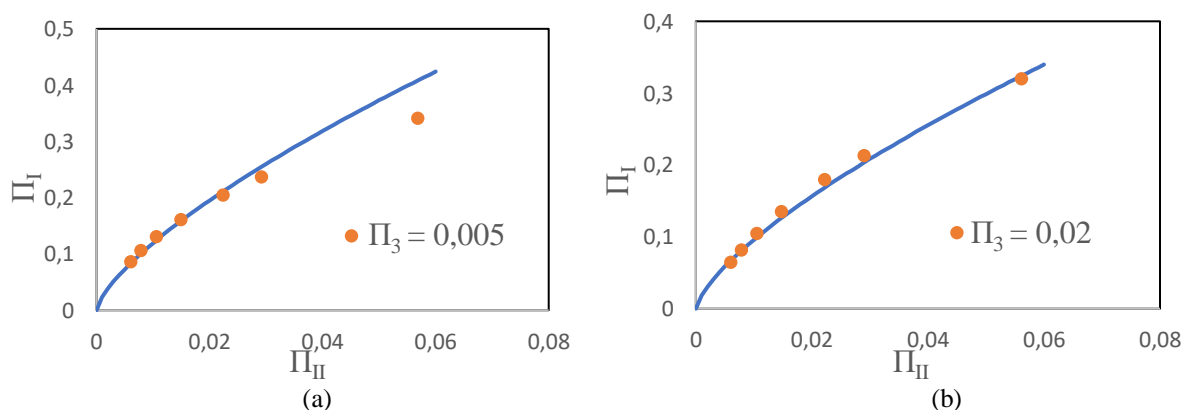


Figura 11. Comparação entre a expressão obtida e modelos com parâmetros diferentes.

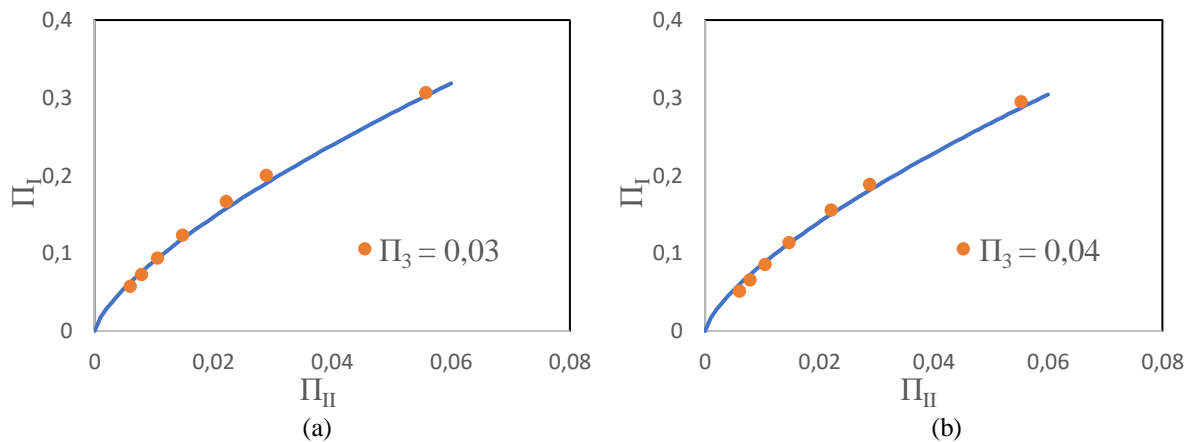


Figura 12. Comparação entre a expressão obtida e modelos com parâmetros diferentes.

6.4 Tubulação com revestimento

Para o caso em que a tubulação possui revestimento, foram simulados três casos considerando a mesma situação da Proposta A, com uma espessura de revestimento, t_L , de 3mm, 5mm e 7mm. A Figura 13 apresenta os dados obtidos considerando $\Pi_3 = 0,01$. Percebe-se que a adição de um revestimento não interfere na forma da correlação entre a pressão de colapso e a força de colapso por compressão diametral. Entretanto, a adição de uma nova camada à uma tubulação já existente, proporciona um aumento da pressão na qual ocorre o colapso. Então foi realizado um ajuste considerando o caso em que a tubulação possui revestimento, e assim, a Equação 6.5 deve ser utilizada para este tipo de configuração.

$$\Pi_I = 2,5019 \Pi_{II}^{0,6532} \quad (6.5)$$

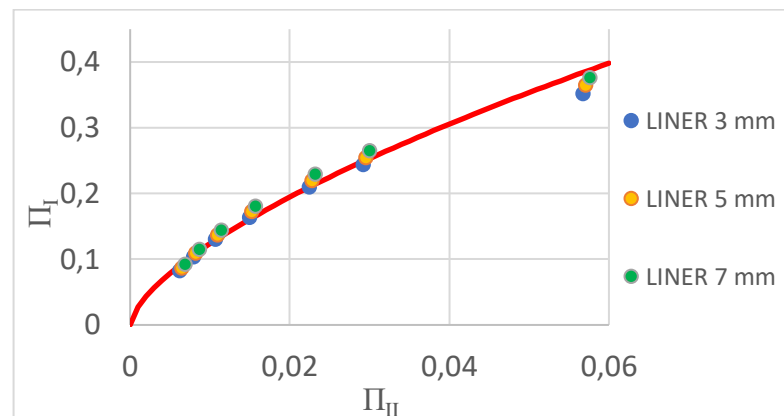


Figura 13. Comparação entre a expressão obtida e modelos com parâmetros diferentes.

A equação de P_{co} em função de F_{co} é dada por:

$$P_{co} = 2,5019 \left(\frac{F_{co}}{D} \right)^{0,6532} \sigma_{y,bs}^{0,3468} \quad (6.6)$$

Onde, F_{co} é a força de colapso por compressão diametral, D é o diâmetro externo da tubulação e $\sigma_{y,bs}$ é a tensão de escoamento.

6.5 Tensões Circunferenciais

As tensões circunferenciais entre o caso em que o colapso na tubulação é causado pela pressão externa e no caso onde ele é causado pela força de compressão diametral, são comparadas. A Figura 14, apresenta essas distribuições de tensões na região marcada em vermelho no modelo, para uma tubulação com D/t de 18 e os demais parâmetros são os mesmos utilizados na proposta A. Percebe-se que a parte compressiva é a que causa o colapso em ambos os casos, e os valores das tensões mínimas nessa região são muito semelhantes.

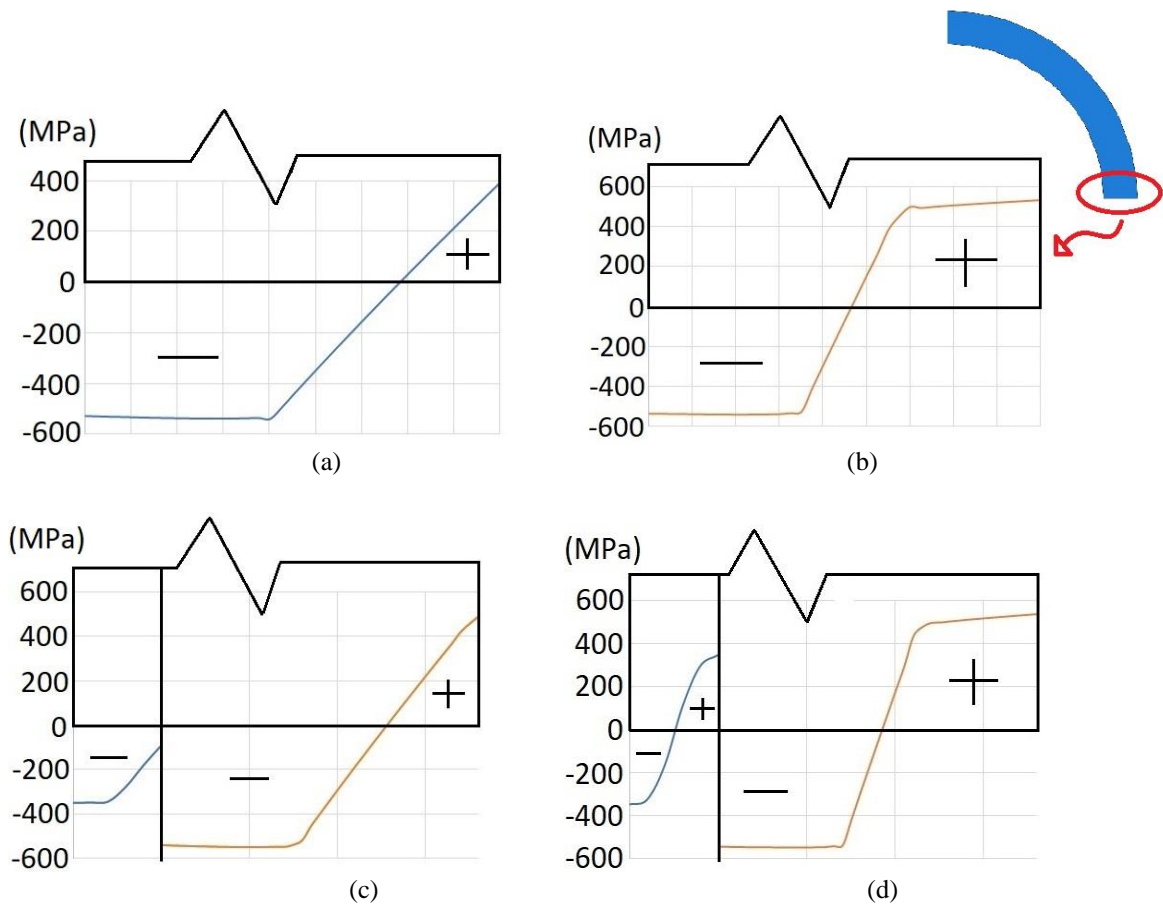


Figura 14. Tensões circunferências para uma tubulação sem revestimento no caso de (a) pressão externa e (b) força diametral. E com revestimento em (c) para pressão externa e (d) para força diametral.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho explorou a possibilidade de determinar uma expressão que correlacione a pressão externa de colapso com a força de compressão diametral, em uma tubulação, com o objetivo de realizar testes com custos e riscos reduzidos. Os parâmetros que influenciam o problema foram considerados adimensionais e assim foi obtida uma expressão na forma potencial. Ela possui a dependência de um grupo adimensional, que é a ovalização inicial da tubulação, e pode ser estendida para considerar mais parâmetros que possam influenciar essa correlação. Conclui-se que a utilização de grupos adimensionais auxilia no entendimento de um problema físico e generaliza os dados obtidos em um estudo. Também é possível concluir que se pode correlacionar a pressão externa de colapso em uma tubulação com uma força diametral. Por fim, uma sugestão para trabalhos futuros, seria realizar testes práticos para comprovar os resultados obtidos e realizar mais testes considerando outros parâmetros, como excentricidade de parede da tubulação e outros materiais para a tubulação principal e o revestimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DNV-OS-F101, “Offshore Standard for Submarine Pipeline Systems”, Det Norske Veritas, October 2013.

Gong, S., Sun, B., Sheng, B., Bai Y., Buckle Propagation of Offshore Pipelines under External Pressure, *Marine Structure*, 29, pp.115-130, 2012.

Kyriakides S., Corona E. *Mechanics of Offshore Pipelines – Volume 1: Buckling and Collapse*, First Edition, Elsevier, 2007

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

G. Simitses and D. Hodges (2006). *Fundamentals of Structural Stability*, Elsevier

Reis, A. J. & Camotim, D., 2000. *Estabilidade Estrutural*. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECivil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, McGraw-Hill.

Haagsma S, Schaap D. Collapse resistance of submarine lines studied. *Oil Gas J* 1981;79:86–95.

Riks, E., 1979. *An incremental approach to the solution to the solution of buckling ans.* s.l.:International Journal of Solids and Structures.

Barenblatt, G. I. *Scaling*. Cambridge University Press, 2003.

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

Brunetti F., “Mecânica dos Fluidos”, 2ª edição, Pearson – Prentice Hall, São Paulo, 2008

White, Frank M. *Mecânica dos fluidos*. 6.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2010. 880p.

Fallqvist, B, Collapse of thick deepwater pipelines due to hydrostatic pressure, 2009

Alrsai, M., Karampoura, H., Albermanib, F., On collapse of the inner pipe of a pipe-in-pipe system under external pressure, 2018.

Bastola, A. *Predicting Hydrostatic Collapse of Deepwater Pipelines*, 2013

Stumpf F, Freitas Kuhn M, Dias A, Clarke T. Iturrioz I Effect of stress triaxiality on the computation of the collapse pressure of submarine pipes to be published. (2022)

M. A. Gomes Ruggiero, V. L. da Rocha Lopes. *Cálculo Numérico - Aspectos Teóricos e Computacionais*, 2ª edição, Editora Pearson, 1997.

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

APÊNDICE A – Convergência de malha

A Figura 15 apresenta o estudo da convergência de malha realizada para o caso no qual a espessura da tubulação apresenta o seu maior tamanho, ou seja, para o D/t menor. Um $D/t = 7,5$ foi considerado, o qual possui espessura de 43,18 mm. Para este caso, a malha convergida possui dimensão máxima de 4 mm e isso gera 11 elementos ao longo da espessura. Para os outros modelos utilizados, manteve-se a relação de 11 elementos na espessura.

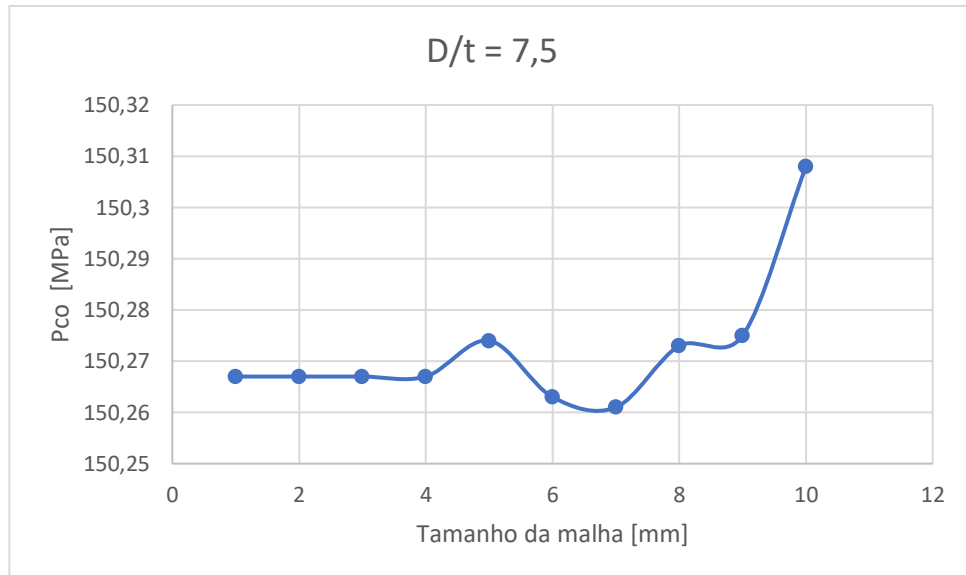


Figura 15. Convergência de malha.

APÊNDICE B – Curva do X65

O material considerado para a tubulação externa foi o aço X65. Ele foi corrigido pela equação de Ramberg-Osgood, apresentada a seguir, juntamente com os parâmetros utilizados e a curva tensão-deformação gerada para a parte plástica.

$$\epsilon(\sigma) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right]$$

Sendo:

$$E = 200$$

$$\sigma_y = 450 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_u = 604 \text{ Mpa}$$

$$n = 13,7$$

$$\alpha = 1,31$$

$$\text{Source} = 24$$

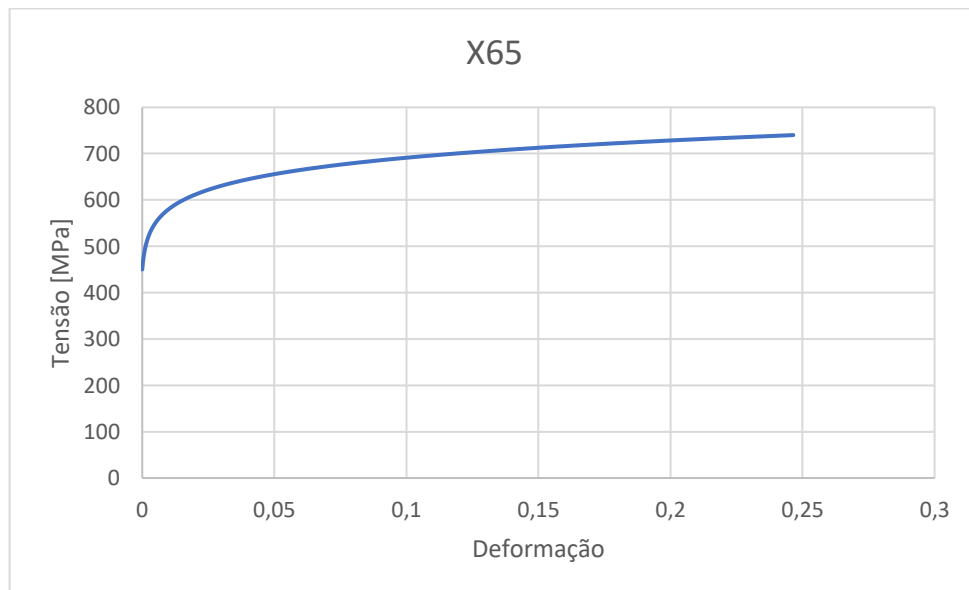


Figura 16. Curva tensão-deformação X65.