



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCCAS ANDRÉ FELIX SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FLEXÃO E PRESSÃO EXTERNA NA FALHA DE  
DUTOS RÍGIDOS CORROÍDOS**

Recife

2025

LUCCAS ANDRÉ FELIX SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FLEXÃO E PRESSÃO EXTERNA NA FALHA DE  
DUTOS RÍGIDOS CORROÍDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

**Área de Concentração:** Estruturas

**Orientadora:** D.Sc. Silvana Maria Bastos Afonso da Silva

**Coorientador:** D.Sc. Renato de Siqueira Motta

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Luccas Andre Felix.

Estudo da influência da flexão e pressão externa na falha de dutos rígidos corroídos / Luccas Andre Felix Silva. - Recife, 2025.

69f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Silvana Maria Bastos Afonso da Silva.

Coorientação: Renato de Siqueira Motta.

Inclui referências.

1. Colapso; 2. Dutos corroídos; 3. Pressão externa; 4. Momento fletor; 5. Elementos finitos; 6. Carregamentos combinados. I. Silva, Silvana Maria Bastos Afonso da. II. Motta, Renato de Siqueira. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**LUCCAS ANDRÉ FELIX SILVA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FLEXÃO E PRESSÃO EXTERNA  
NA FALHA DE DUTOS RÍGIDOS CORROÍDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Estruturas.

Aprovada em 27/01/2025

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Silvana Maria Bastos Afonso da Silva – UFPE

Orientador: Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta – UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nadège Sophie Bouchonneau da Silva (examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Juliana Von Schmalz Torres (examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha mãe, Andrea; à minha avó e segunda mãe, Salete; e ao meu padrasto, Cairo. A vocês, minha eterna gratidão e meu carinho, pois esta conquista também é de vocês.

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus Uno e Trino, pelo Pai que enviou o Seu Filho: Jesus Cristo, gerado pelo Espírito Santo no ventre da Santíssima Virgem, para que em Seu sacrifício oferecesse a salvação a todos, pois "[...] a todos aqueles que O receberam, aos que creem no Seu Nome, deu-lhes o poder de se tornarem filhos de Deus" (João 1, 12).

À minha mãe, Andrea, minha avó e segunda mãe, Salete, e meu avô e pai, Benedito (in memoriam), por sempre ter confiado em mim, dado todo o apoio e motivação para que eu me mantivesse firme na busca pelo conhecimento. Esta conquista, e todas as outras, é consequência de todo o amor de vocês.

Ao meu padrasto, Cairo, por ter me recebido de braços abertos na sua casa, oferecendo não apenas um lugar para ficar, mas também todo o apoio e compreensão de que eu precisava. Essa generosidade e cuidado que você demonstrou são coisas que jamais esquecerei, me dando segurança para seguir em frente.

Aos meus orientadores: Prof<sup>a</sup> Silvana Bastos e Prof. Renato Motta, pela orientação e conhecimentos transmitidos neste período. Agradeço também à Prof<sup>a</sup> Juliana Torres por ter me indicado ao grupo de pesquisa, ao Prof. Ramiro Willmersdorf pelas sugestões dadas, e à Prof<sup>a</sup> Nadège Bouchonneau pela disposição em auxiliar no que fosse preciso.

Ao Prof. Paulo Sousa, colega de grupo e atualmente professor da UPE, por toda confiança e disposição que resultaram em um trabalho publicado. Suas conversas e conselhos enriqueceram bastante esta jornada.

Aos colegas do grupo de pesquisa, em especial: Álamo e Savanna, grandes amigos que fiz e que sempre tiveram a imensa boa vontade de ajudar, compartilhando seus conhecimentos e oferecendo apoio nos momentos mais desafiadores. Agradeço pela parceria, pelas conversas enriquecedoras e pela amizade que tornaram essa jornada muito especial.

Aos demais professores que lecionaram nas disciplinas: Prof. Bernardo Horowitz, Prof. Leonardo Guimarães e Prof. Paulo Marcelo. Obrigado pelas aulas brilhantes que foram a base na construção deste trabalho.

Aos amigos de turma que fiz assim que cheguei: Fernanda, Gabriel, Ítalo, Jennifer e Mateus. Agradeço pela acolhida calorosa, pelas risadas compartilhadas e pelo apoio constante durante essa caminhada. Vocês tornaram os primeiros passos dessa jornada repletos de boas memórias.

Aos demais amigos que me apoiaram, em especial: André, Bruna, Daiany, Daysa e Geo-

vanna. Sou imensamente grato por cada gesto de carinho, incentivo e compreensão ao longo dessa trajetória. Vocês foram fundamentais nos momentos difíceis e celebraram comigo cada pequena conquista.

Aos professores da graduação que ainda mantenho contato: Prof. Douglas e Prof. Moura. Agradeço por continuarem sendo fontes de inspiração e orientação. Suas lições vão muito além da sala de aula, e o apoio e incentivo de vocês foram fundamentais para minha formação e crescimento.

Ao Prof. Tiago Ancelmo, pela disposição, dedicação e prontidão em participar e presidir a banca de defesa, contribuindo para o aprimoramento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE).

"Quoniam tu solus sanctus  
Tu solus Dominus  
Tu solus altissimus, Jesu Christe  
Cum sancto Spiritu, in gloria Dei Patris  
Amen"  
(Gloria In Excelsis Deo)

## RESUMO

Com a exploração de petróleo em águas profundas, a necessidade de dutos submarinos tem seguido aumento de demanda. Devido às grandes profundidades, os carregamentos de pressão externa são os mais agravantes, pois podem levar ao colapso dos dutos. A disposição da tubulação entre a plataforma e o ponto de extração, atrelada ao movimento das marés e a aceleração gravitacional, acaba resultando em carregamentos de momento fletor, que causam a redução na capacidade resistiva à pressão externa. As intempéries em regiões submarinas e o processo de operação em dutos causam defeitos de corrosão no material, reduzindo a espessura da parede; também afetando à sua resistência. O processo de fabricação e instalação de tubulações podem causar mudança na seção transversal do formato circular para elíptico, sendo esta imperfeição denominada ovalização inicial, que é mais um agravante à resistência. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é fazer a análise, por meio de simulações em elementos finitos, de dutos corroídos submetidos à carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa até a falha a partir de um estudo paramétrico das dimensões dos defeitos e da ovalização inicial. Também foi feita a comparação dos resultados com equações analíticas presentes na literatura, tanto para os carregamentos de pressão externa e momento fletor atuando isoladamente, como para a combinação. A partir de métodos de otimização e interpolação de equações, foi proposto um ajuste da equação da envoltória de falha que envolve a pressão de colapso ( $P_{col}$ ) e momento máximo ( $M_{max}$ ) quando atuam isoladamente. Os resultados mostraram que os parâmetros geométricos do defeito, especialmente a profundidade e a largura circunferencial, são os que mais afetam a capacidade resistente dos dutos analisados. As equações analíticas para falha devido aos carregamentos isoladamente, como esperado, resultaram em valores bastante conservadores em relação à simulação em elementos finitos, enquanto a equação de combinação dos carregamentos da literatura teve uma melhor aproximação dos resultados das simulações quando o defeito é comprimido, mas levou à valores de colapso superiores às simulações quando ocorre a tração do defeito. Os resultados, com utilização dos métodos de otimização e aproximação de polinômios, possibilitaram obter correções para a equação de carregamentos combinados, dando uma melhor aproximação para ambos os sentidos de flexão.

**Palavras-chaves:** colapso; dutos corroídos; pressão externa; momento fletor; elementos finitos; carregamentos combinados; estudo paramétrico; otimização.

## ABSTRACT

With the exploration of oil in deep waters, the demand for submarine pipelines has been increasing. Due to the great depths, external pressure loads are the most critical, as they can lead to pipeline collapse. The arrangement of the pipeline between the platform and the extraction point, combined with tidal movement and gravitational acceleration, results in bending moment loads, which reduce the resistance capacity to external pressure. Harsh environmental conditions in submarine regions and the operational process of pipelines cause corrosion defects in the material, reducing the wall thickness and affecting its strength. The manufacturing and installation process of pipelines can lead to changes in the cross-section from a circular to an elliptical shape, an imperfection known as initial ovalization, which further weakens resistance. In this context, the general objective of this work is to analyze, through finite element simulations, corroded pipelines subjected to combined bending moment and external pressure loads until failure, based on a parametric study of defect dimensions and initial ovalization. A comparison of the results with analytical equations from the literature was also carried out, both for external pressure and bending moment loads acting separately and in combination. Using optimization methods and equation interpolation, an adjustment was proposed for the failure envelope equation that involves collapse pressure ( $P_{col}$ ) and maximum moment ( $M_{max}$ ) when acting independently. The results showed that the geometric parameters of the defect, especially depth and circumferential width, are the most influential factors in the resistance capacity of the analyzed pipelines. The analytical equations for failure due to isolated loads, as expected, resulted in highly conservative values compared to finite element simulations. Meanwhile, the combined load equation from the literature provided a better approximation of the simulation results when the defect was compressed but led to higher collapse values than the simulations when the defect was subjected to tension. The results, using optimization methods and polynomial approximation, enabled corrections to be made to the combined load equation, improving the accuracy for both directions of bending.

**Keywords:** collapse; corroded pipelines; external pressure; bending moment; finite elements; combined loading; parametric study; optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custos com vazamentos em acidentes significantes em dutos . . . . .	18
Figura 2 – Volume de óleo vazado por ano ( $m^3$ ) no Brasil - 2014 a 2019 . . . . .	19
Figura 3 – Disposição da tubulação entre a plataforma e o ponto de extração . . . . .	20
Figura 4 – Esquema de células de corrosão em dutos . . . . .	21
Figura 5 – Ovalização inicial . . . . .	22
Figura 6 – Diferença entre a seção circular e ovalizada em termos de coordenadas . . . . .	23
Figura 7 – Esquema do duto para equação de momento máximo . . . . .	27
Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do PIPEFLAW . . . . .	35
Figura 9 – Modelo das simulações em Método dos Elementos Finitos (MEF) . . . . .	36
Figura 10 – Malha gerada pelo PIPEFLAW . . . . .	37
Figura 11 – Elemento de contato CONTA174 . . . . .	38
Figura 12 – Curvas de tensão-deformação aproximadas dos materiais: STS370 e STS410 . . . . .	41
Figura 13 – Fluxograma do estudo paramétrico . . . . .	43
Figura 14 – Tensões de Von Mises da validação com os experimentos . . . . .	48
Figura 15 – Tensões de Von Mises da validação de invariância do comprimento . . . . .	49
Figura 16 – Tensões de Von Mises e deslocamentos do duto íntegro . . . . .	50
Figura 17 – Tensões de Von Mises do caso SP00 para momento máximo e pressão de colapso . . . . .	52
Figura 18 – Resultado dos estudos paramétricos para o caso de ações combinadas . . . . .	53
Figura 19 – Tensões biaxiais . . . . .	54
Figura 20 – Tensões de Von Mises da combinação dos carregamentos . . . . .	54
Figura 21 – Comparação com a equação de combinação . . . . .	56
Figura 22 – Comparação com os expoentes médios calculados . . . . .	58
Figura 23 – Comparação com os expoentes médios calculados . . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expoentes da equação de combinação . . . . .	32
Tabela 2 – Dados dos casos usados na primeira validação . . . . .	39
Tabela 3 – Tensões dos materiais utilizados nos experimentos . . . . .	40
Tabela 4 – Propriedades mecânicas adotadas . . . . .	40
Tabela 5 – Caso de partida do estudo paramétrico . . . . .	42
Tabela 6 – Casos com as variações do estudo paramétrico . . . . .	42
Tabela 7 – Validação com os experimentos de (MIYAZAKI et al., 2002) . . . . .	46
Tabela 8 – Validação da invariância do comprimento . . . . .	47
Tabela 9 – Momento máximo e pressão de colapso: duto intacto . . . . .	50
Tabela 10 – Momento máximo e pressão de colapso: casos do estudo paramétrico. . . . .	51
Tabela 11 – Resultado das otimizações . . . . .	57
Tabela 12 – Coeficientes do polinômio interpolador . . . . .	59
Tabela 13 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para os modelos utilizados . . . . .	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABRACO</b>	Associação Brasileira de Corrosão
<b>ANP</b>	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>CV</b>	Coeficiente de Variação
<b>DNV</b>	Det Norske Veritas
<b>ME</b>	Expoentes Médios
<b>MEF</b>	Método dos Elementos Finitos
<b>OP</b>	Otimização
<b>PADMEC</b>	Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional
<b>PCL</b>	Patran Control Language
<b>Petrobras</b>	Petróleo Brasileiro
<b>PHMSA</b>	Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration
<b>SQP</b>	Programação Sequencial Quadrática
<b>UFPE</b>	Universidade Federal de Pernambuco

## LISTA DE SÍMBOLOS

$M_{max}$	Momento máximo suportado pelo duto
$P_{col}$	Pressão (externa) ao qual ocorre o colapso do duto
$\sigma_u$	Tensão última do material
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\sigma_f$	Tensão de fluxo
$\epsilon_u$	Deformação última
$\epsilon_y$	Deformação de escoamento
$\epsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão normal
$\Delta_0$	Ovalização inicial (%)
$\gamma$	Constante [0,85;1]
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\eta$	Fator de redução da parede
$\theta$	Metade da angulação do defeito
$\beta$	Metade da angulação do eixo neutro
$\alpha$	Expoente do fator de momento na equação de combinação
$\delta$	Expoente do fator de pressão externa na equação de combinação
$\alpha_p$	Expoente do fator de momento na equação combinada para momento positivo
$\delta_p$	Expoente do fator de pressão externa na equação combinada para momento positivo
$\alpha_n$	Expoente do fator de momento na equação combinada para momento negativo

$\delta_n$

Expoente do fator de pressão externa na equação combinada para momento negativo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	DUTOS SUBMARINOS	17
1.2	PRESSÃO EXTERNA E MOMENTO FLETOR	19
1.3	DEFEITOS DE CORROSÃO	20
1.4	OVALIZAÇÃO INICIAL	21
1.5	MOTIVAÇÃO	23
1.6	OBJETIVOS	24
1.7	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>26</b>
2.1	DUTOS SUJEITOS À MOMENTO FLETOR	26
2.2	DUTOS SUJEITOS À PRESSÃO EXTERNA	28
2.3	DUTOS SUJEITOS À CARREGAMENTOS COMBINADOS: MOMENTO FLETOR E PRESSÃO EXTERNA	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	34
<b>3.1.1</b>	<b>Modelo</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Aplicação de momentos fletores</b>	<b>37</b>
3.1.2.1	<i>Comparação com dados experimentais</i>	39
3.1.2.2	<i>Invariância do comprimento do modelo</i>	39
<b>3.1.3</b>	<b>Propriedades do material</b>	<b>40</b>
3.2	ESTUDO PARAMÉTRICO	41
3.3	AJUSTE DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
4.1	VALIDAÇÕES	46
4.2	ESTUDO PARAMÉTRICO	49
<b>4.2.1</b>	<b>Aplicação dos carregamentos isoladamente</b>	<b>49</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Aplicação dos carregamentos combinados</b>	<b>52</b>
4.3	APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS	55
4.4	APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS AJUSTADA	56

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>61</b>
5.1	CONCLUSÕES	61
<b>5.1.1</b>	<b>Modelo de elementos finitos</b>	<b>61</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Estudo paramétrico</b>	<b>61</b>
5.1.2.1	<i>Carregamentos isolados</i>	61
5.1.2.2	<i>Carregamentos combinados</i>	62
<b>5.1.3</b>	<b>Equação de carregamentos combinados</b>	<b>62</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Equação de combinação ajustada</b>	<b>63</b>
5.2	TRABALHOS FUTUROS	63
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este estudo investiga a análise de dutos submarinos com defeitos de corrosão e ovalização inicial, submetidos a carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa. A seguir, apresentam-se os conceitos fundamentais relacionados a essa temática.

## 1.1 DUTOS SUBMARINOS

Com a exploração de petróleo em águas profundas, o uso de dutos submarinos é essencial para o transporte dos materiais extraídos. No contexto brasileiro, a Petróleo Brasileiro (Petrobras) é líder mundial em exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, tendo representado 4,6% da produção mundial em setembro de 2024 (Ministério de Minas e Energia, 2024), onde houve uma intensificação após a descoberta do pré-sal em 2005, que em 2023 representando 78% da produção total da empresa e mais de 1/3 da América Latina (Petrobras, 2024).

A utilização de dutos é muito vantajosa por ser o meio mais seguro para o transporte de gás e óleo (KESHTEGAR; SEGHIER, 2018), além de ter baixo custo em barril/km (KESHTEGAR; SEGHIER, 2018) e gerar menos gases do efeito estufa em relação a outros meios (GLOBALDATA, 2022). Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a malha brasileira de dutos submarinos é estimada em 20.000km, com a maioria projetados para uma vida útil de 20 anos (ANP, 2019).

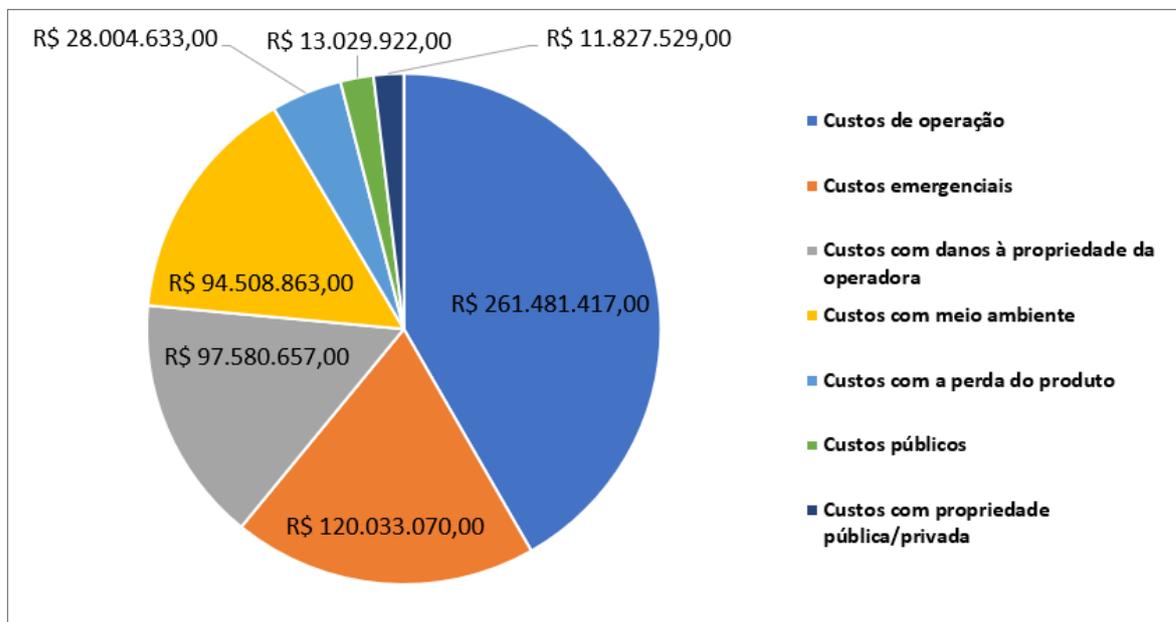
Os dutos, de modo geral, podem ser classificados em: rígidos e flexíveis. Dutos rígidos, utilizados nas análises deste presente trabalho, segundo Barros (BARROS, 2023), são tubos de aço formados por uma série de juntas soldadas ou rosqueadas para aumentar sua resistência e são utilizados em águas profundas e ultra profundas devido à sua alta resistência para suportar elevados carregamentos. Devido à sua elevada rigidez, ocorrem limitações no tocante à curvatura, que está diretamente relacionado a flexão, como será descrita na próxima seção.

Segundo Dault e Campos (DAULT; CAMPOS, 2024), dutos flexíveis tem a finalidade de transportar fluidos em altas e baixas pressões, apresentando baixa rigidez à flexão e alta rigidez axial, permitindo ao duto atingir raios de curvatura menores em relação aos dutos rígidos. A grande flexibilidade dos dutos permite enrolar os mesmos em bobinas carrossel para transporte e instalação entre sistemas submarinos (JóIA et al., 2005).

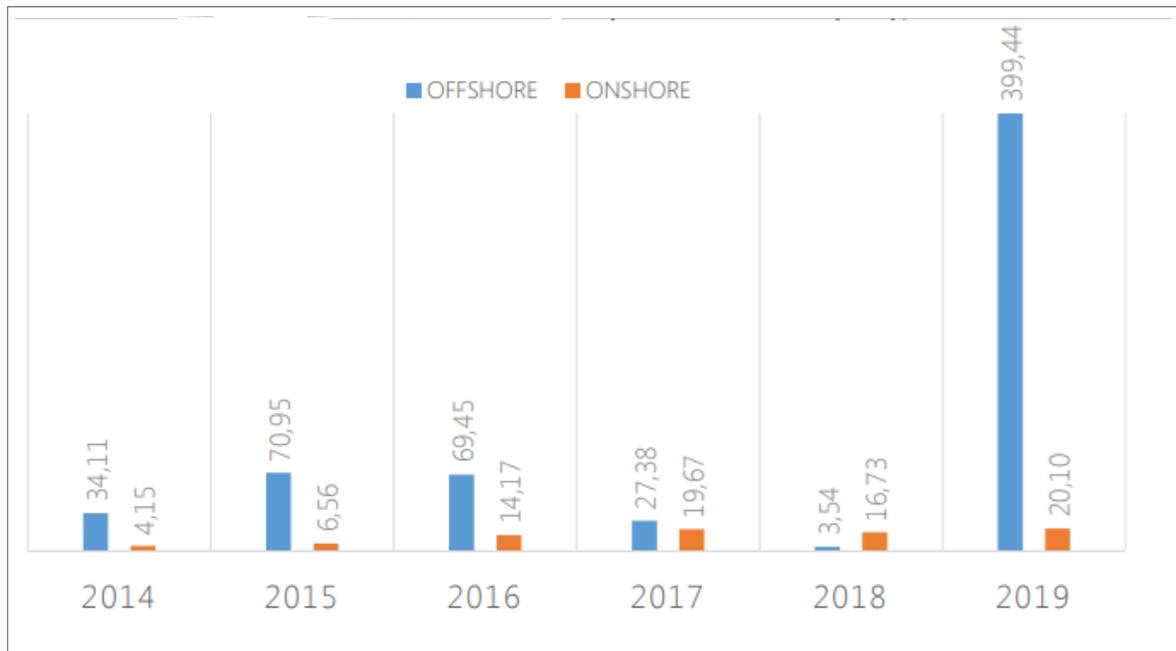
Por operar em ambientes marítimos, o colapso de dutos causa danos ambientais em oceanos de grandes proporções por derramamento de óleo. Os efeitos químicos e físicos são as duas principais vias de impacto do óleo nos organismos marinhos, os efeitos físicos são resultantes do recobrimento, enquanto os efeitos químicos estão relacionados com a toxicidade dos compostos presentes (Goedele Machado Scheepers, 2021).

Estudos feitos com os dados da Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) da *US Department of Transportation*, entre 2002 a 2009, mostrados na Figura 1; levantaram o custo resultante de acidentes no setor público na operação, meio ambiente, danos a propriedade e na perda de produção, em aproximadamente US\$ 600 milhões (ANP, 2015). Os custos demonstram a importância de realizar análises de segurança destas tubulações de ambientes marítimos, de forma a mitigar as causas que resultam em acidentes ambientais que, no Brasil entre os anos de 2014 e 2018, Figura 2, os dutos offshore sofreram vazamentos de  $604,87 m^3$  de óleo (ANP, 2019).

Figura 1 – Custos com vazamentos em acidentes significantes em dutos



Fonte: ANP (2015)

Figura 2 – Volume de óleo vazado por ano ( $m^3$ ) no Brasil - 2014 a 2019

Fonte: ANP (2019)

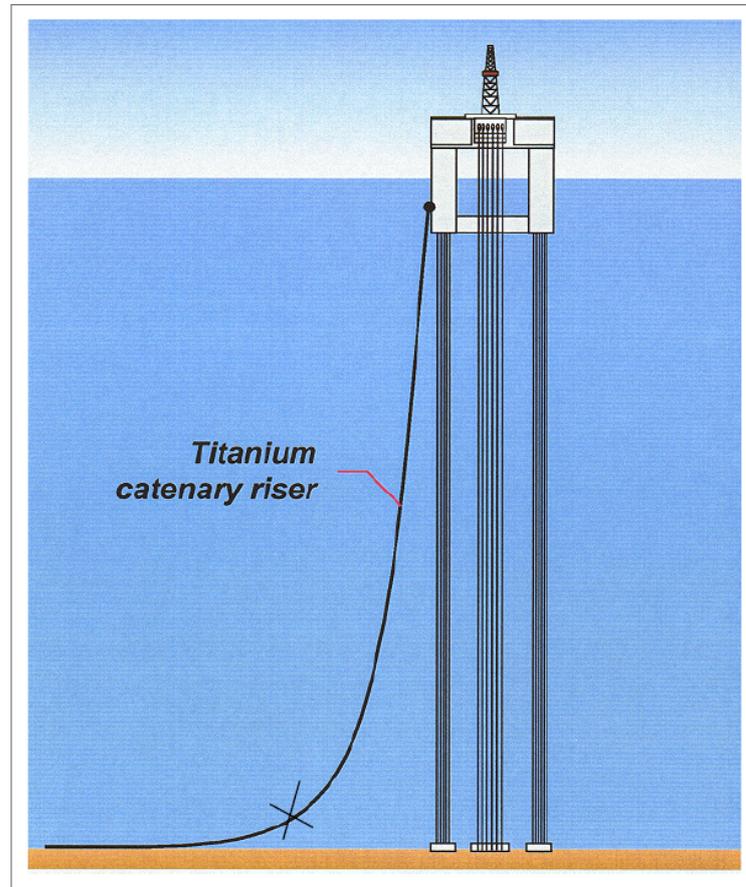
## 1.2 PRESSÃO EXTERNA E MOMENTO FLETOR

Devido à coluna de água superior, os dutos submarinos estão submetidos à carregamentos de pressão externa que podem levar ao colapso (KYRIAKIDES; CORONA, 2023) e, consequentemente, o derramamento de óleo; como já tratado anteriormente.

Na disposição da tubulação entre a plataforma e o ponto de extração, conforme a Figura 3, as regiões mais profundas atingem os valores mais críticos de pressão externa, inclusive na área de maior curvatura, conhecida como "sag-bend region" (BJØRSET, 2000) é formada pela aceleração gravitacional na tubulação, e é onde ocorre a flexão crítica, pois também há o movimento das marés (BJØRSET, 2000) que contribue para a flexão.

Quando os carregamentos atuam de forma combinada, o momento fletor afeta a capacidade resistente do duto à pressão externa (BJØRSET, 2000), facilitando a falha por colapso. Portanto, como a "sag-bend region" é uma região crítica para ambos os carregamentos, é a escolhida para a análise de carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa, em toda a disposição da tubulação.

Figura 3 – Disposição da tubulação entre a plataforma e o ponto de extração



Fonte: BJØRSET (2000)

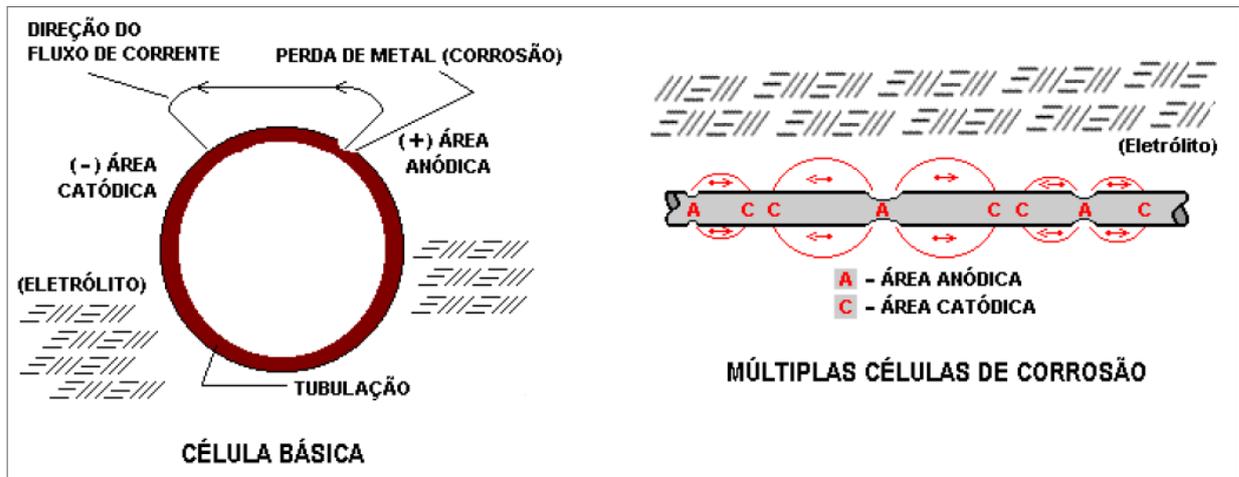
### 1.3 DEFEITOS DE CORROSÃO

Corrosão em dutos é a perda de material que leva à redução da espessura da parede comprometendo a segurança de operação. Um duto submarino é essencialmente uma peça de metal envolvido por um eletrólito (água salgada). Ao longo do tempo, os potenciais elétricos podem variar de um ponto da tubulação para outro (CABRAL, 2007) formando as áreas anódica e catódica, gerando a corrosão no material, Figura 4.

Segundo Sulaiman e Tan (SULAIMAN; TAN, 2014), a corrosão é a responsável por 36% das falhas em dutos submarinos, ficando atrás apenas da interferência externa que representa 38% das ocorrências, demonstrando ser um fator indispensável na análise de integridade destas estruturas.

A corrosão pode ser tanto na superfície interna, devido à ação dos componentes do fluido transportado e sua velocidade, ou externo devido à perda de revestimento causada por agentes ambientais (BHARDWAJ; TEIXEIRA; Guedes Soares, 2022).

Figura 4 – Esquema de células de corrosão em dutos

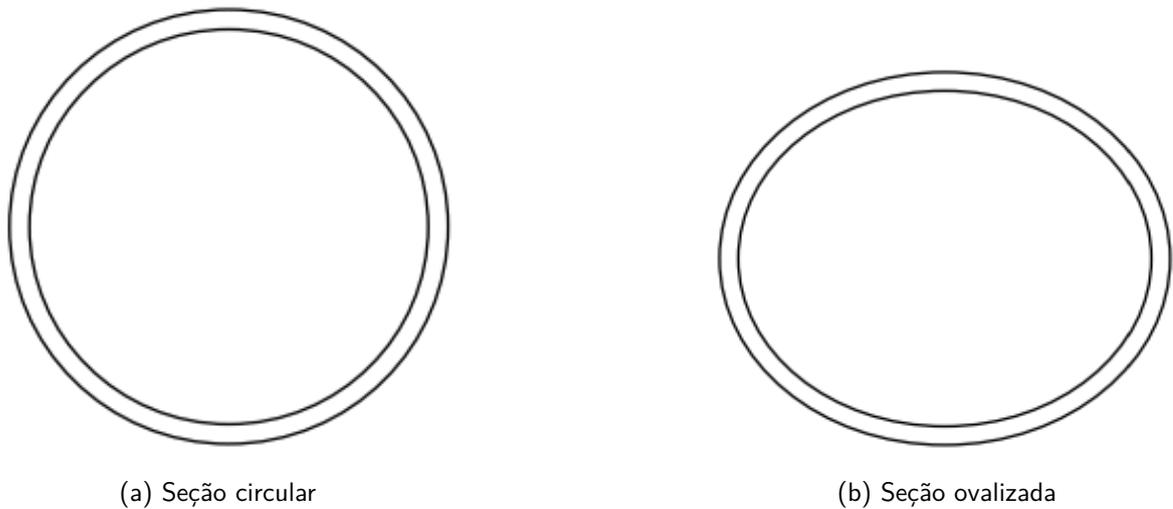


Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), Ano desconhecido

#### 1.4 OVALIZAÇÃO INICIAL

A ovalização pode ser definida como a mudança na seção transversal circular do duto, Figura 5a, para um formato elíptico, Figura 5b. As principais causas da ovalização inicial são os processos de fabricação e instalação das tubulações, mas também pode ocorrer ovalização por agentes externos, como: ação de carregamentos de momento fletor, flambagem local, deformações e pressão externa (KARADENIZ, 2001). De acordo com a norma Det Norske Veritas (DNV) F101:2013 (Det Norske Veritas AS, 2013), a ovalização deve ser levada em conta na análise de integridade, pois pode afetar significativamente o comportamento mecânico dos dutos.

Figura 5 – Ovalização inicial



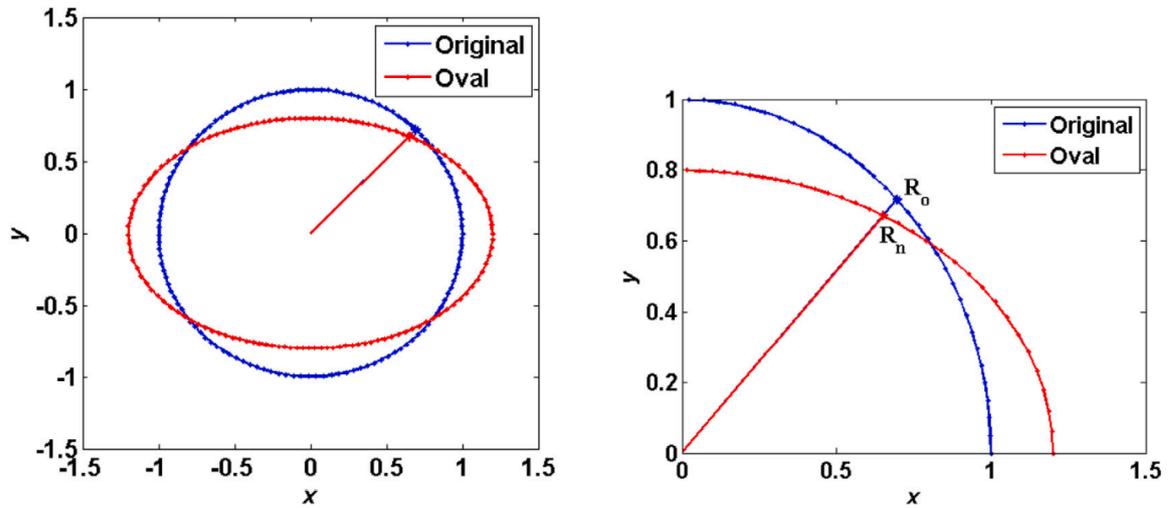
**Fonte:** O autor, 2024

Matematicamente, segundo a DNV (Det Norske Veritas AS, 2013), a ovalização ( $\Delta_0$ ) pode ser definida segundo a Equação 1.2, onde  $D_{max}$  e  $D_{min}$  são, respectivamente, os diâmetros externos máximos e mínimos.

$$\Delta_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{\frac{D_{max} + D_{min}}{2}} = 2 \cdot \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (1.1)$$

Na Figura 6 está a comparação, em termos de coordenadas, da seção original e ovalizada, mostrando a variação do raio externo de ambas as situações e, a partir desta representação, Motta et al. (MOTTA et al., 2021) utiliza de coordenadas cilíndricas para encontrar a relação, Equação 1.2, de ambos os raios a partir da ovalização inicial e o ângulo polar.

Figura 6 – Diferença entre a seção circular e ovalizada em termos de coordenadas



Fonte: MOTTA et al. (2021)

$$R_n = R_o \frac{1 - \Delta_o^2/4}{\sqrt{(1 - \Delta_o/2)^2 + 2\Delta_o \sin^2(\theta)}} \quad (1.2)$$

Onde:

$R_n$  novo raio

$R_o$  raio original

$\theta$  ângulo polar

No presente trabalho serão considerados dutos com defeitos de corrosão e ovalização inicial, por serem características que impactam diretamente na capacidade resistiva (D'AGUIAR; MOTTA; AFONSO, 2024), aumentando o risco de colapso e as demais consequências já abordadas.

## 1.5 MOTIVAÇÃO

A exploração em águas profundas tem se intensificado no Brasil após a descoberta do pré-sal, logo a necessidade de estudos envolvendo equipamentos submarinos se intensifica, entre eles os dutos para transporte de petróleo e gás. Na literatura, que será revisada no próximo capítulo, o tema envolvendo a análise de carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa é bastante escasso, onde os trabalhos envolvem apenas dutos íntegros, ou

seja, sem corrosão e ovalização inicial; que são questões que impactam significativamente na análise de integridade.

Uma forma válida de realizar esse estudo é por meio de um estudo paramétrico, envolvendo simulações pelo MEF, a partir da análise da influência das geometrias dos defeitos e a ovalização inicial nos resultados, sendo possível tirar conclusões de quais demonstram maior comprometimento à segurança de operação em águas profundas. A literatura apresenta diversos estudos paramétricos de outros carregamentos envolvendo as dimensões, formatos e distância entre defeitos (múltiplos defeitos) e obtém resultados que contribuem significativamente para o entendimento do comportamento mecânico nestas situações.

Há trabalhos que tratam de equações analíticas para obtenção da pressão externa de colapso, momento máximo e a combinação de ambos; logo, é válido comparar os resultados obtidos nas simulações com estas equações, já que estes últimos possibilitam obter soluções mais imediatas em relação às simulações numéricas.

Como a literatura não trata do caso de ações combinadas de momento fletor e pressão externa em dutos corroídos, é factível a partir da comparação com a equação do caso combinado utilizar métodos de otimização que possibilitem a melhoria destes resultados analíticos, facilitando a análise para obter os resultados da combinação dos carregamentos com uma menor necessidade de simulações numéricas. Portanto, diante das questões levantadas, reside a motivação para o desenvolvimento do presente trabalho.

## 1.6 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fazer a análise de dutos corroídos off-shore submetidos à carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa, a partir de um estudo paramétrico envolvendo as dimensões do defeito de corrosão e ovalização inicial; comparar os resultados com equações analíticas e propor melhorias para a equação que modela a combinação dos carregamentos. De forma detalhada, o trabalho objetiva:

- Gerar os casos do estudo paramétrico através do sistema PIPEFLAW (CABRAL et al., 2017) desenvolvido pelo grupo Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional (PADMEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) para simulação em elementos finitos;

- Simular a aplicação progressiva do carregamento de momento fletor e obter a pressão de colapso após a combinação;
- Fazer a aplicação de momento em dois sentidos, analisando os casos em que a flexão comprime e traciona a região do defeito;
- Comparar os resultados das simulações com as equações analíticas de pressão externa, momento fletor e combinação de ambas as ações;
- Propor ajustes na equação do caso das ações combinadas de pressão externa e momento.

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos e uma bibliografia. No primeiro, atual capítulo, são apresentados conceitos elementares para o entendimento da temática a ser desenvolvida, além dos objetivos e organização do trabalho.

O capítulo 2 mostra uma revisão bibliográfica do estado da arte tendo relação com o problema em questão, onde são descritos trabalhos que serviram de embasamento para esta pesquisa.

No capítulo 3 está a metodologia utilizada para condução do trabalho, detalhando o processo para desenvolver a pesquisa, como as simulações em elementos finitos, otimização, interpolação de dados e comparativos das simulações com as equações analíticas.

No capítulo 4 é apresentado os resultados das simulações numéricas, comparação com as equações analíticas e as melhorias propostas para a equação das ações combinadas de pressão externa e momento, a partir dos resultados das simulações; sendo feitas discussões do que foi obtido.

Finalizando, o capítulo 5 concatena as conclusões e observações dos resultados do estudo paramétrico e da otimização e interpolação para melhoria do modelo analítico de combinação dos carregamentos, também sugerindo trabalhos futuros que sirvam de continuidade.

## 2 ESTADO DA ARTE

Nesta seção será detalhada a literatura que embasou o presente trabalho, com estudo de dutos submetidos à momento fletor, pressão externa, combinação de ambos carregamentos e a ferramenta PIPEFLAW para a geração dos modelos.

### 2.1 DUTOS SUJEITOS À MOMENTO FLETOR

Hauch e Bai (HAUCH; BAI, 2000) realizaram estudos da aplicação unicamente de momento fletor em dutos sem defeito de corrosão. O trabalho desenvolve uma equação analítica para obtenção do momento máximo suportado por dutos sem defeitos e compara os resultados com simulações pelo MEF, demonstrando bastante coerência entre os resultados.

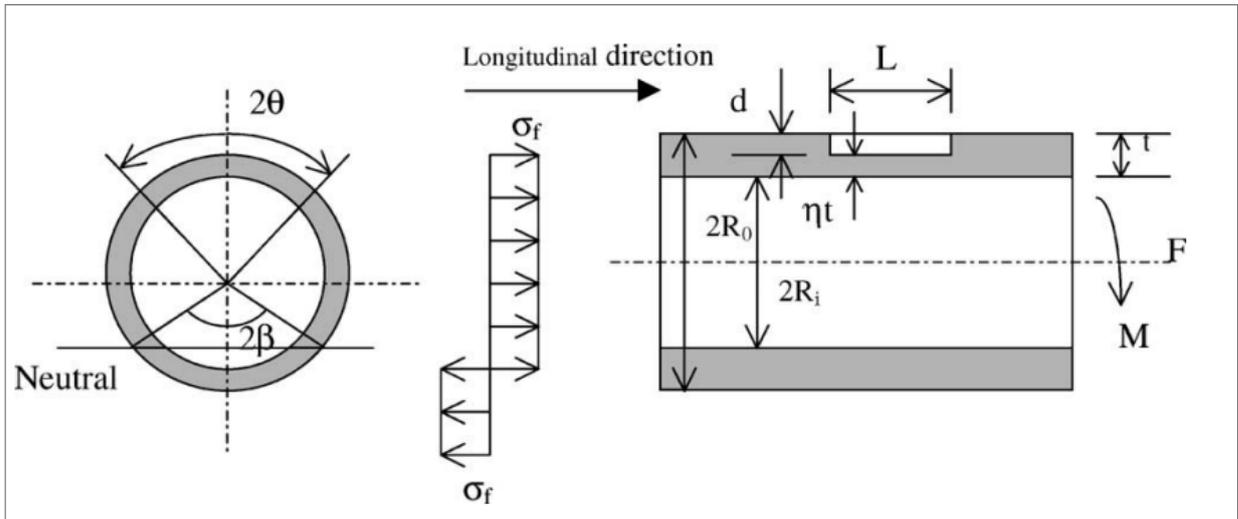
Miyazaki et al. (MIYAZAKI et al., 2002) conduziram estudos experimentais com dutos corroídos, de usinas nucleares, submetidos unicamente à momento fletor (flexão pura) com diversas geometrias de defeitos e posições (interna e externa). Os resultados foram comparados com equações analíticas e serão utilizados neste trabalho para a validação do modelo elementos finitos.

Zheng et al. (ZHENG et al., 2004) propuseram um modelo analítico para obtenção do momento máximo para dutos com defeitos de corrosão submetidos à carregamentos combinados de flexão e carga axial, podendo ser simplificado para flexão pura, sendo validada por simulações em elementos finitos, mostrando resultados mais conservadores. O cálculo é feito, inicialmente, a partir de um fator de redução da espessura do duto ( $\eta$ ), Equação 2.1, a partir das dimensões da corrosão.

$$\eta = \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t \sqrt{1 + 0.4 \left( \frac{L}{\sqrt{Rt}} \right)^2}}} \quad (2.1)$$

Após o cálculo deste fator, a partir do ângulo referente à largura da corrosão ( $\theta$ ), Figura 7, é feito o cálculo do ângulo do eixo neutro ( $\beta$ ). Para isso, é necessário avaliar os critérios em função da soma entre os ângulo  $\beta$  e  $\theta$  para a aplicação das Equações 2.2 e 2.4 para, finalmente, calcular o momento máximo suportado pelo duto pelas Equações 2.3 e 2.5.

Figura 7 – Esquema do duto para equação de momento máximo



Fonte: ZHENG et al. (2004)

Para  $(\theta + \beta) \leq \pi$ :

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{(1 - \eta)\theta}{\pi} \right), \quad (2.2)$$

$$M \approx 4\sigma_f R_m^2 t \left\{ \sin \beta - \frac{(1 - \eta)}{2} \sin \theta \right\} \quad (2.3)$$

Onde:

$R_m$  raio médio  $\left( R - \frac{t}{2} \right)$

Para  $(\theta + \beta) > \pi$ :

$$\beta = \frac{\pi}{2\eta} \left( 2\eta - \frac{(1 - \eta)\theta}{\pi} - 1 \right), \quad (2.4)$$

$$M \approx 4\sigma_f R_m^2 t \left\{ \eta \sin \beta - \frac{(1 - \eta)}{2} \sin \theta \right\} \quad (2.5)$$

Shuai et al. (SHUAI et al., 2021) fizeram um estudo paramétrico da influência das dimensões dos defeitos em dutos submetidos à flexão pura, como também um comparativo entre defeitos de geometria idealizada parabólicos e retangulares. A partir do estudo paramétrico,

os autores aplicaram equações da Teoria da Elasticidade para tirar conclusões do comportamento mecânico a partir da influência das dimensões geométricas de diâmetro, comprimento e espessura.

Peng et al. (PENG et al., 2011) analisaram a influência de múltiplos defeitos alinhados longitudinalmente e circunferencialmente para carregamentos combinados de momento fletor e pressão interna. A partir dos resultados, os autores desenvolveram uma metodologia analítica para análise da interação de múltiplos defeitos considerando a distância entre eles.

Tian, Zhang e Lu (TIAN; ZHANG; LU, 2019); estudaram a combinação de pressão interna e momento fletor, porém para um defeito isolado de geometria semi-cilíndrica, verificando a influência nos resultados a partir de materiais distintos e a dimensão de profundidade do defeito.

Chen et al. (CHEN et al., 2014) propuseram equações analíticas para dutos corroídos submetidos à carregamentos combinados de momento fletor, pressão interna e carga axial. É apresentada toda demonstração matemática das equações, que se dividem para defeitos retangulares, parabólicos e elípticos. Os resultados foram comparados com os experimentos feitos por Zheng et al. (ZHENG et al., 2004), mostrando proximidade entre os resultados dos trabalhos.

Phan et al (PHAN et al., 2021) a partir dos resultados de elementos finitos, estabelecem uma relação polinomial, derivada de métodos de otimização (heurísticos), de um duto corroído submetido à momento fletor e carga axial. É feita a comparação dos resultados com as equações propostas por Zheng et al. (ZHENG et al., 2004) e Chen et al. (CHEN et al., 2014), demonstrando melhor precisão dos polinômios propostos. Os autores também demonstram que os resultados obtidos pelas duas equações prévias são bastante próximos entre si, com baixa variabilidade entre os momentos máximos obtidos pelas mesmas.

## 2.2 DUTOS SUJEITOS À PRESSÃO EXTERNA

Netto, Ferraz e Botto (NETTO; FERRAZ; BOTTO, 2007) conduziram estudos experimentais de tubos submetidos à pressão externa até o colapso, comparando os resultados com o MEF. Por ser um trabalho experimental, costuma ser utilizado para a validação de análises pelo o MEF e equações empíricas.

Netto (NETTO, 2009) faz um estudo paramétrico, por meio do MEF, nas dimensões do defeito de corrosão verificando a influência nos resultados e então propõe um fator de redução, Equação 2.6, em função das dimensões do defeito, que minora os resultados analíticos obtidos

de pressão de colapso para o duto sem corrosão, conforme a Equação 2.7. A parametrização mostrou que a profundidade é a dimensão que mais afeta na resistência ao colapso.

$$R_{Netto} = \left[ \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} \left( 1 - \left( \frac{c}{\pi D} \right)^{0.4} \left( \frac{L}{10D} \right)^{0.4} \right)} \right]^{2.675} \quad (2.6)$$

Onde:

$d$  profundidade do defeito

$c$  largura circunferencial do defeito

$L$  comprimento longitudinal do defeito

$$P_{def} = R_{Netto} P_c \quad (2.7)$$

O fator de redução ( $R_{Netto}$ ) foi calibrado em três categorias (C1, C2 e C3) baseado em intervalos entre a profundidade relativa  $\left(\frac{d}{t}\right)$  e a largura circunferencial  $\left(\frac{c}{\pi D}\right)$  (variáveis normalizadas do defeito), onde estas dimensões devem atender as seguintes condições:

$$C1 : 0.1 \leq \left(\frac{d}{t}\right) \leq 0.2, \quad \left(\frac{c}{\pi D}\right) \leq 0.1 \quad (2.8)$$

$$C2 : 0.2 \leq \left(\frac{d}{t}\right) \leq 0.4, \quad \left(\frac{c}{\pi D}\right) \leq 0.1 \quad (2.9)$$

$$C3 : 0.4 \leq \left(\frac{d}{t}\right) \leq 0.6, \quad \left(\frac{c}{\pi D}\right) \leq 0.1 - \frac{d}{8t} \quad (2.10)$$

Para obtenção da pressão de colapso de dutos íntegros submetidos unicamente à pressão externa, a DNV (Det Norske Veritas AS, 2013), empresa norueguesa autônoma classificadora de navios e plataforma de petróleo (DNV, 2023), propôs uma equação, Equação 2.11, para dutos sem defeitos, mas com ovalização inicial, que é um dos fatores levados em conta estudo paramétrico apresentado na seção 3.2. Esta equação na literatura costuma ser combinada com o fator de redução proposto por Netto (NETTO, 2009) para dutos corroídos.

$$\left(\frac{P_c}{P_{el}} - 1\right) \left(\frac{P_c^2}{P_y^2} - 1\right) = O \frac{R P_c}{2t P_y} \quad (2.11)$$

Onde:

$P_c$  pressão de colapso do duto íntegro

$P_y$  pressão proporcional, conforme Equação 2.12

$P_{el}$  pressão de colapso elástica, conforme Equação 2.13

$O$  ovalização inicial

$R$  raio externo do duto

$t$  espessura da parede

$$P_y = f_y \gamma \left( \frac{t}{R} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

$f_y$  tensão elástica

$\gamma$  constante que varia entre 0,85 e 1 (MOTTA et al., 2021)

$$P_{el} = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \left( \frac{t}{R} \right)^3 \quad (2.13)$$

Onde:

$\nu$  coeficiente de Poisson

Gong et al. (GONG et al., 2021) fizeram testes experimentais em diversos dutos com defeitos em formatos elípticos e retangulares, submetidos unicamente à pressão externa até o colapso; comparando os resultados com simulações em elementos finitos, de forma a validar o modelo. Por fim, os autores fazem uma otimização pelo método de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963) para encontrar um fator de redução a partir das dimensões do defeito para o caso em específico e comparam os resultados com o proposto por Netto (NETTO, 2009), ao qual ambos ficaram próximos.

D'Aguiar, Motta e Afonso (D'AGUIAR; MOTTA; AFONSO, 2024) estudaram a influência de múltiplos defeitos, de geometria idealizada, em dutos submetidos à pressão externa; verificando a influência da forma e distância entre os defeitos e comparando os resultados com o estudo de Gong et al. (GONG et al., 2021). O trabalho também propôs um fator de correção, a partir do método de Levenberg-Marquardt, que modelou, com bastante êxito, em termos da influência da ovalização inicial nos dutos com defeitos alinhados circunferencialmente. Visto que o trabalho lida exclusivamente com pressão externa a partir de modelos gerados pelo PIPEFLAW, conclui-se que os modelos já foram validados para dutos corroídos submetidos unicamente a pressão externa até o colapso.

Olatunde et al (OLATUNDE et al., 2023) simularam dutos submarinos com múltiplos defeitos de corrosão internamente e externamente, como também um estudo paramétrico da influência das dimensões e posições destes defeitos nos resultados da pressão de colapso, visando comparar os resultados com a equação proposta pela DNV (Det Norske Veritas AS, 2013).

Devido às incertezas nas variáveis que envolvem a avaliação da segurança ao colapso de dutos submarinos, trabalhos utilizando métodos de análise de confiabilidade estão presentes na literatura, como Teixeira, Palencia e Soares (TEIXEIRA; PALENCIA; SOARES, 2019) que utilizaram equações analíticas para verificar a segurança das tubulações. Motta et al. (MOTTA et al., 2021) fizeram um estudo semelhante, porém envolvendo simulações pelo MEF nos resultados, obtendo resultados da confiabilidade dos resultados numéricos em comparação com as equações analíticas, logo da segurança das tubulações.

### 2.3 DUTOS SUJEITOS À CARREGAMENTOS COMBINADOS: MOMENTO FLETOR E PRESSÃO EXTERNA

A DNV (Det Norske Veritas AS, 1996) propôs uma equação para obtenção de resultados após a combinação dos carregamentos de pressão externa e momento fletor, Equação 2.14 e Tabela 1. Com esta equação, é possível obter os resultados de pressão externa ou momento fletor suportado pelo duto após a combinação destes carregamentos, de forma que uma das variáveis é imposta como carregamento de serviço (momento fletor, no presente trabalho) e a outra é o máximo suportado pelo duto no contexto da combinação (pressão externa, no presente trabalho).

Nas simulações feitas por Bjorset et al (BJØRSET et al., 2003) para dutos sem defeitos, os autores encontram os expoentes que melhor se aproximavam para o caso íntegro, Tabela 1; logo podendo ser utilizado para obtenção dos resultados do duto sem defeitos, servindo de comparativo com os casos do estudo paramétrico, já que o duto íntegro funciona como um estado-limite em relação aos dutos com defeitos de corrosão.

$$\left(\frac{M}{M_{max}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{P_e}{P_{col}}\right)^{\delta} = 1 \quad (2.14)$$

Onde:

$M$  momento fletor aplicado/suportado na combinação

$M_{max}$  momento máximo quando o duto é submetido unicamente à flexão

$P_e$  pressão externa aplicado/suportado na combinação

$P_{col}$  pressão de colapso quando o duto é submetido unicamente à pressão externa

Tabela 1 – Expoentes da equação de combinação

Referência	$\alpha$	$\delta$
(Det Norske Veritas AS, 1996)	2	2
(BJØRSET et al., 2003)	3,65	1,83

**Fonte:** O autor, 2024.

Para aplicação da equação, é necessário os valores de momento máximo e pressão de colapso quando os carregamentos atuam isoladamente. Há duas formas de obter esses valores: por simulações pelo MEF ou pelas equações analíticas já apresentadas, portanto as duas formas serão comparadas (seção 4.2.1) para decidir qual delas tem melhor precisão. Como as simulações em elementos finitos consideram a tensão última como o estado limite e as equações as tensões elásticas e de fluxo, espera-se que os resultados do MEF sejam menos conservadores.

Bjørset (BJØRSET, 2000) fez simulações numéricas de dutos íntegros submetidos à carregamentos combinados de pressão externa e momento fletor, onde realiza-se um estudo de calibração de malha, curva do material, aplicação de carregamentos e equações da Teoria da Elasticidade, buscando o melhor modelo para as simulações. A partir dos resultados, o autor utiliza conceitos de confiabilidade estrutural para a análise da variabilidade dos resultados.

Bjørset et al. (BJØRSET et al., 2003) repetem parte do estudo feito por Bjørset (BJØRSET, 2000), integrando uma simplificação da equação proposta pela DNV (Det Norske Veritas AS, 1996) para o caso combinado, removendo as constantes dependentes do material; e melhorando a equação para os resultados obtidos com o duto íntegro.

Binazir et al. (BINAZIR et al., 2020) estudaram um sistema de dutos compostos de duas camadas sem defeitos de corrosão, onde há um duto de menor diâmetro interno a outro de diâmetro superior, submetidos aos carregamentos isolados e combinados. O estudo trata inicialmente a aplicação de pressão externa e só depois a de momento fletor, mostrando a redução na capacidade resistiva à flexão dos dutos compostos.

Yudo et al. (YUDO et al., 2021) simularam pelo MEF dutos sem defeitos submetidos aos carregamentos combinados, conduzindo um estudo paramétrico da relação da esbeltez diâmetro externo/espessura da parede, e mostraram, como esperado, que quanto menor essa relação

menor a capacidade resistiva à combinação de carregamentos.

Silva, Silva e Motta (SILVA; SILVA; MOTTA, 2024) analisaram o comportamento das equações de Netto (NETTO, 2009) e Zheng et al. (ZHENG et al., 2004) a partir da aplicação do método Monte Carlo para análise de confiabilidade, resultando em uma maior variabilidade da primeira em relação à segunda. Os resultados mostraram, para o estado limite considerado, uma maior probabilidade de falha para o momento fletor, ainda que os resultados tenham apresentado uma menor dispersão.

Este trabalho se diferencia por considerar a aplicação dos carregamentos combinados em dutos com defeito de corrosão e ovalização, fazendo um estudo paramétrico da influência das dimensões da corrosão e da ovalização nos resultados. A partir destes dados, são feitos aperfeiçoamentos na equação analítica do caso combinado, possibilitando obter resultados menos conservadores e diminuindo a demanda por simulações numéricas.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção será discutido os pontos elementares para o MEF, utilizado para nas simulações dos dutos corroídos, que são: a geometria do modelo, a aplicação dos carregamentos de momentos fletores e a curva do material.

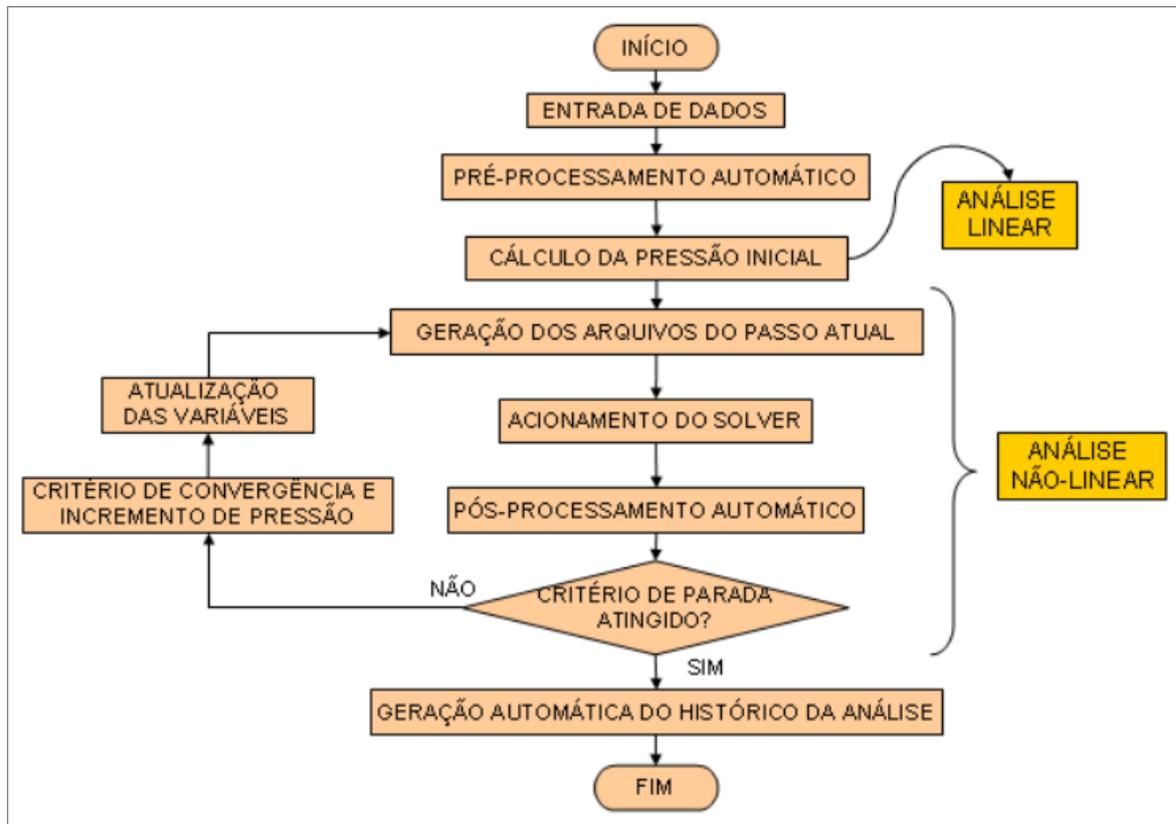
Para a geração dos modelos, foi utilizado o sistema PIPEFLAW desenvolvido pelo grupo de pesquisa PADMEC da UFPE, gerados no MSC.PATRAN (Hexagon, 2023) pela linguagem Patran Control Language (PCL) (MSC Software Corporation, 2021) a partir das informações da geometria do duto e do(s) defeito(s) de corrosão. Os modelos contam com uma malha otimizada, com maior discretização na região do defeito a partir de zonas de transição que garantem a continuidade dos nós. A geração também acompanha a aplicação das condições de contorno e dos carregamentos de pressão interna, externa, momento fletor, temperatura e carga axial.

Cabral (CABRAL, 2007) explica o procedimento feito pelo PIPEFLAW, representado no fluxograma da Figura 8, onde o modelo gerado é interligado ao software Ansys (Ansys Inc., 2024) para que seja feita a simulação pelo MEF por uma análise não-linear de incrementos dos carregamentos até a tensão de Von Mises de algum nó ser igual a tensão última do material (CABRAL et al., 2007), sendo também o critério de parada utilizado neste trabalho.

A ferramenta possibilita a criação de modelos com defeitos idealizados e reais nas configurações múltiplos e isolados, tendo este último considerada a simetria do modelo, gerando apenas um quarto do duto, reduzindo o custo computacional.

No decorrer dos anos foram desenvolvidos diversos trabalhos a partir de modelos gerados pelo PIPEFLAW com diversas situações de carregamentos, geometrias e quantidades de defeitos e diferentes aplicabilidades, onde contribuiram para o aperfeiçoamento da ferramenta (D'AGUIAR; MOTTA; AFONSO, 2024), (MOTTA et al., 2021), (MOTTA et al., 2017), (PIMENTEL et al., 2020), (BRUÈRE et al., 2019), (SOARES et al., 2019), (FERREIRA et al., 2021). Como até o presente trabalho, não houveram trabalhos com considerações de momento fletor utilizando os modelos gerados pelo PIPEFLAW, serão propostas validações (seção 3.1.2.1 e 3.1.2.2) para garantir que os resultados são coerentes com os observados em experimentos.

Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do PIPEFLAW

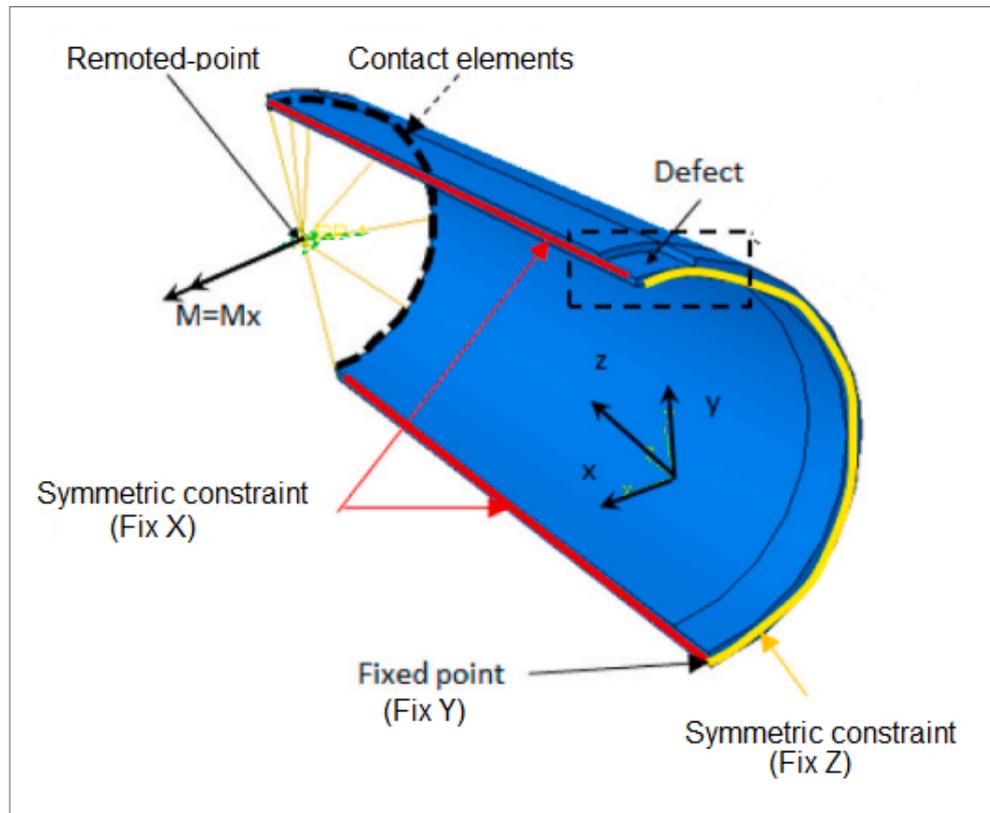


Fonte: CABRAL (2007)

### 3.1.1 Modelo

O modelo, ilustrado na Figura 9, é gerado pelo PIPEFLAW e a análise não-linear pelo MEF é feita no software Ansys (Ansys Inc., 2024). Como há simetria no defeito de corrosão, gera-se no PIPEFLAW os modelos com 1/4 da sua geometria original, com isso há redução do custo computacional.

Figura 9 – Modelo das simulações em MEF



Fonte: PHAN et al. (2021) [modificado]

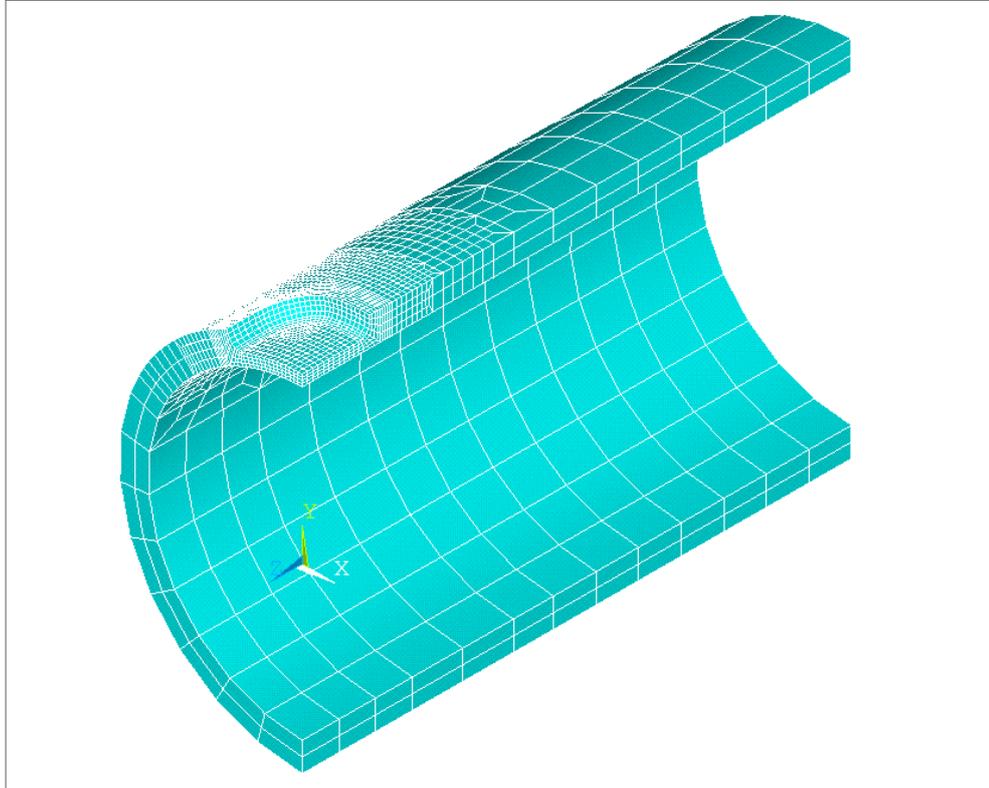
Por ser um problema de colapso de estruturas de paredes finas, há uma alta instabilidade numérica e estrutural (GONG et al., 2020), portanto a análise não-linear é feita com a aplicação progressiva do carregamento de pressão externa a partir do método Riks (método do comprimento de arco modificado) (RIKS, 1972).

As condições de contorno, também mostradas na Figura 9, na extremidade do defeito garantem a simetria fixando o duto na direção Z (Fix Z), enquanto nas laterais também há a consideração da simetria com a fixação na direção X (Fix X) e a fixação em Y no ponto inferior interno nesta mesma seção (Fix Y) para evitar o movimento de corpo rígido. Na extremidade oposta, onde o carregamento de momento fletor será aplicado, não há nenhuma restrição, de forma a garantir que ocorra a flexão.

Conforme mencionado, nos modelos gerados pelo PIPEFLAW há uma discretização maior da malha na região do defeito. Como pode ser visto na Figura 10, a região de interesse (região do defeito) possui quatro elementos ao longo da espessura, seguida de uma região de transição, a partir da qual o duto passa a ter dois elementos ao longo da espessura. Assim, o nível de refinamento da malha diminui à medida que os elementos vão se distanciando da região do defeito, de modo garantir um modelo mais otimizado. Maiores detalhes sobre a discretização

e geração automática do sistema pipeflaw pode encontrada no trabalho de Cabral (CABRAL, 2007).

Figura 10 – Malha gerada pelo PIPEFLAW



Fonte: O autor, 2024

As informações geométricas do duto fornecidas ao PIPEFLAW são: diâmetro externo ( $D$ ), espessura da parede ( $t$ ), comprimento ( $C$ ) e ovalização inicial ( $O$ ); enquanto para o defeito de corrosão: profundidade ( $d$ ), largura ( $c$ ) e comprimento ( $L$ ). A partir destas informações, o modelo é gerado em alguns segundos criando dois arquivos *.dat*, o primeiro contendo as informações de nós e elementos do modelo e o segundo carregamentos e condições de contorno.

Os elementos tridimensionais possuem geometria hexaédrica, sendo utilizado o elemento *SOLID45* disponibilizado pelo Ansys (Ansys, Inc., 2009). A aplicação de pressão pode ser feita diretamente nos nós dos elementos, entretanto não para momento fletor, as razões e a metodologia correta serão discutidas a seguir.

### 3.1.2 Aplicação de momentos fletores

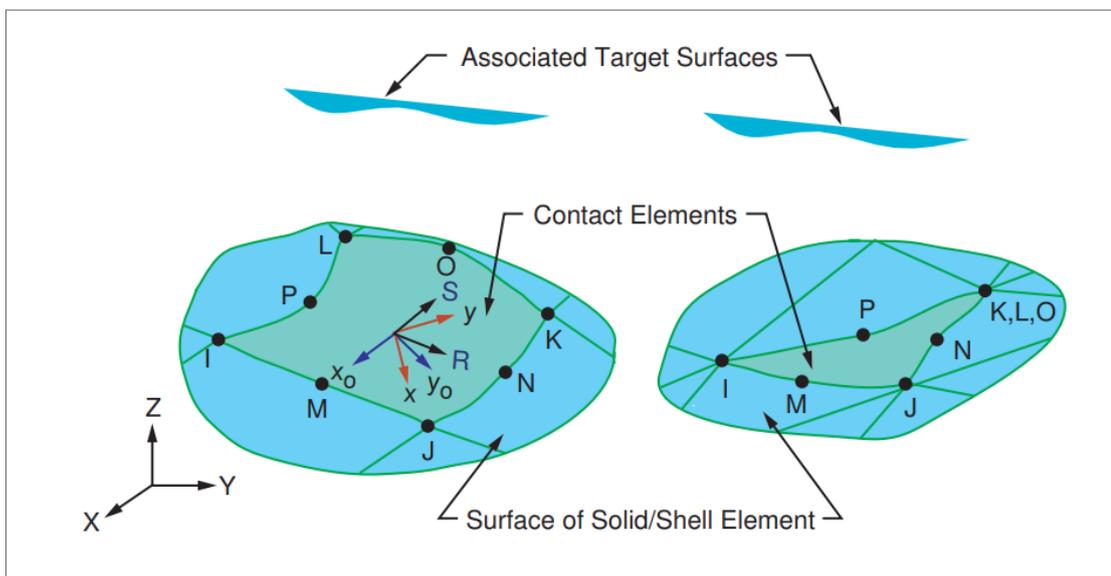
O carregamento de momento não pode ser aplicado de forma concentrada em um dos nós dos elementos tridimensionais que compõe o modelo, já que isso levaria a resultados

totalmente infundados em termos de flexão. Por esse motivo, é necessário a utilização de um método alternativo que permita realizar a transferência dos efeitos desta flexão para todos os elementos que compõe a seção ao qual se deseja realizar a aplicação.

Neste trabalho, a metodologia utilizada foi a criação de um nó remoto (*remoted-point*) (Ansys Innovation Space, n.d.) tal como indicado na Figura 9, localizado no centroide da seção transversal livre, que é interligado à mesma por meio de elementos de contato, servindo como o ponto de aplicação do carregamento de momento fletor e possibilitando fazer a transferência das rotações provenientes do momento aplicado no nó remoto e a seção transversal do duto.

O elemento de contato utilizado foi o *CONTA174*, representado Figura 11, usado para fazer a interligação entre superfícies "alvo" 3D (*TARGE170*) e uma superfície deformável, definida por este elemento. Este elemento está localizado nas superfícies de elementos sólidos (*SOLID45*), possuindo as mesmas características geométricas da face do elemento sólido a qual está conectado (Ansys, Inc., 2009), fazendo a transferência do deslocamento causado pelo momento fletor para os elementos sólidos.

Figura 11 – Elemento de contato CONTA174



Fonte: Ansys, Inc. (2009)

Para garantir que não ocorra deformações excessivas na seção de contato, a ligação entre o ponto remoto e a seção transversal foi configurada de forma rígida, o que resultará em tensões menores na seção oposta ao defeito devido à essa alta rigidez utilizada, segundo os conceitos de análise das estruturas (MARTHA, 2010). Para verificar se o modelo está coerente, é necessário realizar validações a partir dos casos experimentais, sendo necessárias duas validações:

verificação do momento máximo com os dados experimentais e da invariância do comprimento do duto.

### 3.1.2.1 Comparação com dados experimentais

Na primeira validação foram escolhidos quatro dutos testados experimentalmente por Miyazaki et al. (MIYAZAKI et al., 2002) submetidos à flexão pura, descritos na Tabela 2, cujos modelos foram gerados pelo PIPEFLAW e simulados nas mesmas condições de carregamento.

Tabela 2 – Dados dos casos usados na primeira validação

Caso	Material	$\frac{d}{t}$	$\frac{L}{D}$	$\frac{c}{\pi D}$	Momento máximo (kNm)	Estado de tensão no defeito
LWT-14	STS370	0,62	0,37	0,14	25,8	Compressão
LWT-09	STS370	0,49	0,25	0,13	28,8	Tração
LWT-17	STS370	0,62	0,37	0,14	26,2	Tração
TP-08	STS410	0,80	0,87	0,17	38,1	Tração

**Fonte:** MIYAZAKI et al. (2002)

Os resultados obtidos para o momento máximo e a distribuição de tensões de Von Mises nesta validação confirmaram que o modelo gerado pelo PIPEFLAW, aliado à metodologia do nó remoto, representa de maneira satisfatória o comportamento de dutos corroídos sob flexão. Os resultados serão apresentados na seção 4.1.

### 3.1.2.2 Invariância do comprimento do modelo

Para demonstrar que a ligação rígida feita entre o nó remoto e a seção do duto, pelos elementos de contato, não afeta nos resultados; foi feita uma segunda validação variando o comprimento do modelo, logo a distância entre o defeito e a região de aplicação do carregamento (já que estão em extremos opostos). Foi utilizado o caso LWT-14, Tabela 2, com os comprimentos de  $3D$ ,  $5D$  e  $10D$ .

Como esperado, não houve variação do valor do momento máximo e da distribuição das tensões de Von Mises na região do defeito, logo validando que a ligação rígida feita não afeta nos resultados para dutos corroídos sob flexão pura. Os resultados serão apresentados na seção 4.1.

### 3.1.3 Propriedades do material

Para a realização da validação a partir dos estudos experimentais de Miyazaki et al. (MIYAZAKI et al., 2002), são necessários os dados para elaborar as curvas de tensão x deformação dos materiais utilizados. Os materiais são: STS410 e STS370, que, segundo os autores; são utilizados em usinas nucleares do Japão, sendo semelhantes ao aço carbono ASTM A333 Gr. 6. Entretanto, as únicas informações que são disponibilizadas são as tensões características descritas na Tabela 3, não sendo disponibilizado os demais dados necessários para a curva de tensão x deformação: módulo de elasticidade ( $E$ ) e nem as deformação última ( $\epsilon_u$ ).

Tabela 3 – Tensões dos materiais utilizados nos experimentos

Material	Tensão última $\sigma_u$ (MPa)	Tensão de escoamento $\sigma_y$ (MPa)	Tensão de fluxo $\sigma_f$ (MPa)
STS410	490	326	408
STS370	406	227	317

**Fonte:** MIYAZAKI et al. (2002)

Portanto, foi necessário aproximar as deformações a partir de informações conhecidas de aços carbono encontrados na literatura e, para isso, utilizou-se do apêndice do livro Mecânica dos Materiais de Beer et al. (BEER et al., 2011) para adotar o módulo de elasticidade do aço-carbono e, a partir das tensões fornecidas pelos autores, aproximar as deformações necessárias (última e de escoamento), conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas adotadas

Material	Módulo de Elasticidade $E$ (GPa)	Deformação de escoamento $\epsilon_y$	Deformação última $\epsilon_u$
STS410	205	0.0016	0.0364
STS370	205	0.0011	0.0337

**Fonte:** O autor, 2024

Com as tensões fornecidas, Tabela 3, e as propriedades adotadas Tabela 4; a curva foi construída a partir da equação modificada de Ramberg-Osgood, recomendada pela norma da *British Standard Institution* (BSI): BSI 7910:2013+A1:2015 (British Standards Institution, 2015), Equação 3.1.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{A_r \sigma_y}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde:

$\epsilon$  deformação

$\sigma$  tensão normal

$A_r$  coeficiente, conforme a Equação 3.2

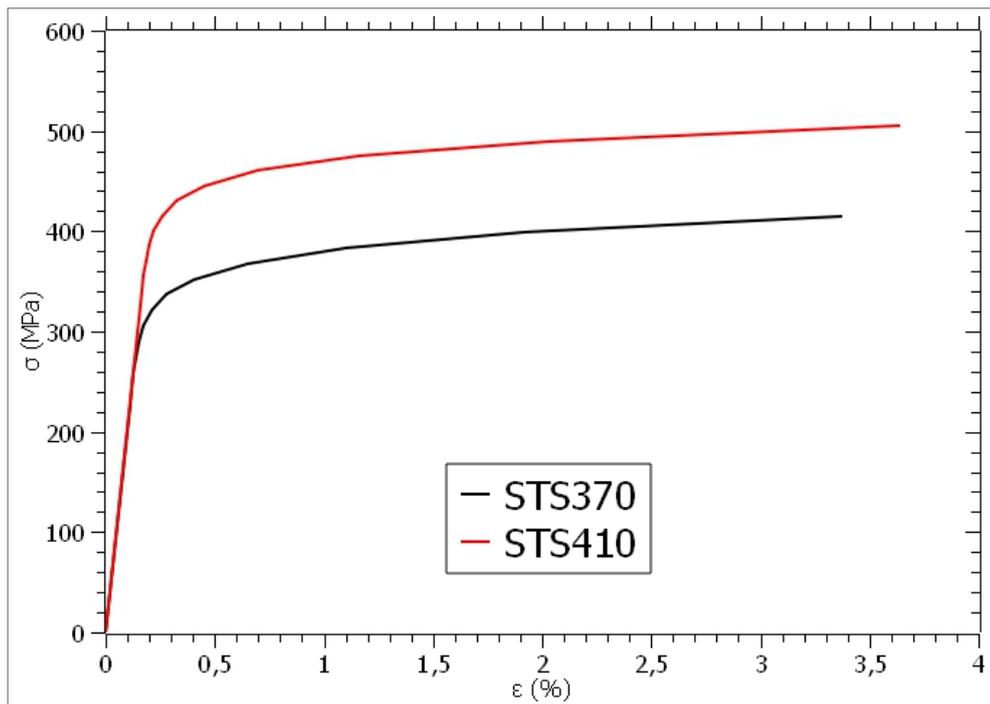
$n$  expoente de encruamento, obtido através da Equação 3.3

$$A_r = \frac{E\epsilon_y}{\sigma_y} - 1 \quad (3.2)$$

$$n = \frac{\log [(E\epsilon_u/\sigma_u) - 1] - \log [(E\epsilon_y/\sigma_y) - 1]}{\log (\sigma_u/\sigma_y)} + 1 \quad (3.3)$$

As curvas tensão x deformação aproximadas estão representadas na Figura 12, sendo utilizadas para as validações e a curva STS370 para o estudo paramétrico proposto neste trabalho.

Figura 12 – Curvas de tensão-deformação aproximadas dos materiais: STS370 e STS410



Fonte: O autor, 2024

### 3.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

Para o estudo paramétrico com a combinação dos carregamentos de momento fletor e pressão externa ( $[M, P_{ext}]$ ), foi adotado um duto cujo dados geométricos são apresentados na

Tabela 5, baseado no utilizado por Gong et al. (GONG et al., 2020), onde foram gerados novos casos a partir de variações das variáveis do defeito: profundidade relativa  $\left(\frac{d}{t}\right)$ , comprimento relativo  $\left(\frac{L}{D}\right)$ , largura relativa  $\left(\frac{c}{\pi D}\right)$  e ovalização inicial ( $\Delta_0$ )

A Tabela 6 mostra os casos SP01 a SP08 com as variações destacadas (sublinhadas) das dimensões normalizadas dos defeitos e da ovalização inicial, de forma que cada um destes casos pudessem compor o estudo paramétrico a fim de que a influência de cada dimensão do defeito e da ovalização inicial nos resultados pudesse ser verificada. Em todos os casos foi adotado o material STS370 (Figura 12).

Tabela 5 – Caso de partida do estudo paramétrico

Caso	Material	Diâmetro (D)	Espessura (t)	Comprimento (C)	$\frac{d}{t}$	$\frac{L}{D}$	$\frac{c}{\pi D}$	$\Delta_0$
SP00	STS370	323,85 mm	15,88 mm	10D	<u>0,4</u>	<u>0,5</u>	<u>0,08</u>	<u>0,1%</u>

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 6 – Casos com as variações do estudo paramétrico

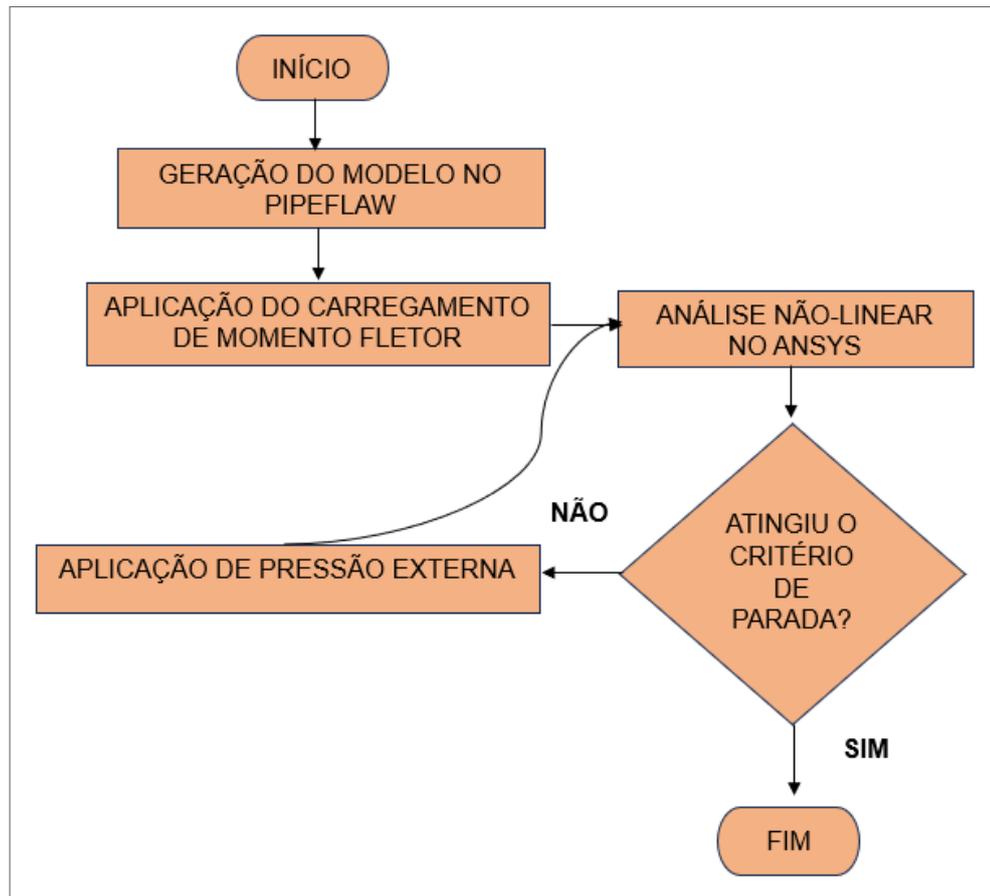
Caso	$\frac{d}{t}$	$\frac{L}{D}$	$\frac{c}{\pi D}$	$\Delta_0$
SP01	<u>0,5</u>	0,5	0,08	0,1%
SP02	<u>0,7</u>	0,5	0,08	0,1%
SP03	0,4	<u>1</u>	0,08	0,1%
SP04	0,4	<u>1,5</u>	0,08	0,1%
SP05	0,4	0,5	<u>0,15</u>	0,1%
SP06	0,4	0,5	<u>0,25</u>	0,1%
SP07	0,4	0,5	0,08	<u>0,5%</u>
SP08	0,4	0,5	0,08	<u>1%</u>

Fonte: O autor, 2024.

Para garantir a normalização dos resultados, foi feita a simulação do duto sem defeitos; portanto os resultados serão apresentados em relação ao caso íntegro servindo como um estado limite, já que a resistência dos dutos com defeitos de corrosão tendem a ser inferiores.

O fluxograma da Figura 13 ilustra toda a metodologia utilizada para obter os resultados do estudo paramétrico, iniciando com a geração dos casos no PIPEFLAW, seguido pela aplicação do carregamento de momento fletor e a análise não-linear no Ansys. Após a flexão total, mantendo o momento constante e caso não tenha atingido o critério de parada, é feita a aplicação de pressão externa até a falha.

Figura 13 – Fluxograma do estudo paramétrico



Fonte: O autor, 2025

Inicialmente, foram feitas as análises dos casos de carregamentos separados de momento ( $M$ ) e pressão externa ( $P_{ext}$ ) até a falha, de forma que estes resultados fazem parte também do estudo paramétrico, correspondendo à falha de cada duto quando os carregamentos atuam isoladamente ( $[M_{max}, 0]$  e  $[0, P_{col}]$ ), tendo estes resultados comparados com as equações já descritas nas seções 2.1 e 2.2.

Para a obtenção dos resultados com a combinação dos carregamentos, foram aplicados percentuais de momento fletor do duto íntegro (20%, 40%, 60% e 80%) nos casos com defeito de corrosão ( $SP00$  a  $SP08$ ) e, conforme já detalhado na Figura 13, é feita a aplicação de pressão externa até a falha.

O sentido do vetor momento está diretamente ligado à natureza da tensão atuante na região do defeito, podendo resultar em tração ou compressão do mesmo. Será adotada a convenção da mecânica dos materiais (BEER et al., 2011), onde o momento positivo causa compressão acima da linha neutra e o negativo tração; como o defeito está localizado na parte superior do modelo, esta convenção aplica-se da mesma forma. Portanto, as aplicações de

momento fletor serão feitas nos dois sentidos, também possibilitando avaliar a influência do sentido nos resultados de falha pela combinação de ambos os carregamentos.

Com este estudo paramétrico, será possível tirar conclusões sobre a influência de cada dimensão do defeito, da ovalização inicial, combinação com momento fletor e sentido da flexão na resistência à falha de dutos submarinos.

### 3.3 AJUSTE DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Foi feita uma correção da equação do caso combinado para obter os expoentes que melhor se aproximassem dos resultados das simulações do estudo paramétrico, resolvendo um problema de otimização. Os métodos de otimização buscam pontos de ótimos minimizando ou maximizando a função objetivo, podendo estar sujeito à restrições das variáveis (MARTINS; NING, 2021).

O problema de otimização consiste em minimizar o erro (*Erro*) quadrático (DENHAM, 2000), Equação 3.4, entre a pressão de colapso obtida analiticamente ( $P^{ANA}$ ) pela equação de carregamentos combinados e pelas simulações do MEF ( $P^{MEF}$ ), Equação 3.5.

$$\min_{\alpha, \delta} f(\alpha, \delta) = \sum (Erro)^2 \quad (3.4)$$

$$Erro = P^{ANA} - P^{MEF} \quad (3.5)$$

A pressão de colapso analítica é obtida após isolar o termo  $P_e$  da Equação 2.14. A equação do erro reorganizada encontra-se na Equação 3.6.

$$Erro = \left[ 1 - \left( \frac{M_{ij}}{M_i^{\max}} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{\delta}} \cdot P_i^{\text{col}} - P_{ij}^{\text{FEM}} \quad (3.6)$$

Onde o cálculo é feito para cada duto ( $i$ ) em cada resultado do estudo paramétrico ( $j$ ). As variáveis são os expoentes ( $\alpha$  e  $\delta$ ) restritos à valores positivos, conforme ilustrado na Equação 3.7.

$$\min_{\alpha, \delta} f(\alpha, \delta) = \sum_{i,j=1}^{m,n} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{M_{ij}}{M_i^{\max}} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{\delta}} \cdot P_i^{\text{col}} - P_{ij}^{\text{MEF}} \right\}^2 \quad (3.7)$$

sujeito a:  $\alpha > 0, \quad \delta > 0$

Para resolução do problema, foi desenvolvido um código que utiliza o algoritmo do Programação Sequencial Quadrática (SQP) (GILL; MURRAY; SAUNDERS, 2005), presente no pacote *Optimization Toolbox* do Matlab (MATHWORKS, 2024), que possibilita a resolução de problemas de otimização não-lineares com restrições de desigualdades (SILVA et al., 2024), que é o caso em questão.

A otimização dos dados foi aplicada para cada parametrização duas vezes, sendo uma para o momento positivo e outra para o negativo, já que o comportamento acaba sendo distinto para cada situação (discutido na seção 4.2.2); possibilitando encontrar dois conjuntos de expoentes que se adequem a cada sentido de flexão.

A partir dos resultados da otimização, optou-se por interpolar os dados em quatro polinômios: dois do expoente  $\alpha$  para os casos de momento positivo e negativo, e mais dois para o expoente  $\beta$  também nas duas direções da flexão, que foram os dois casos considerados na otimização de cada parametrização. Também foi feito, para cada interpolação, o cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (OZER, 1985) para verificar a precisão dos resultados em relação aos dados obtidos no processo de otimização.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VALIDAÇÕES

A seguir estão os resultados das validações propostas para verificar se a metodologia proposta, em MEF, para análise de dutos corroídos submetidos à flexão consegue representar adequadamente o comportamento estrutural observado em estudos experimentais.

Os resultados da validação, descrita na seção 3.1.2.1, com os experimentos de Miyazaki et al. (MIYAZAKI et al., 2002) estão apresentados na Tabela 7, onde é mostrado, além do resultado experimental, o resultado da análise pelo MEF feitas no presente trabalho. Vale lembrar que os experimentos foram feitos para dutos corroídos submetidos unicamente à momento fletor, e os materiais utilizados tiveram as curvas tensão x deformação aproximadas na seção 3.1.3.

Nota-se uma pequena diferença entre os resultados, mostrando uma boa acurácia do modelo. Os resultados ainda tenderam à segurança, ficando abaixo dos experimentos (conservadores), além de validar as curvas dos materiais que foram aproximadas. O caso TP-08 foi o único testado para defeito interno, já que o presente trabalho fez os estudos paramétricos com corrosão externa, mas também os resultados ficando próximos.

A distribuição das tensões de Von Mises dos casos testados, Figura 14, mostram a tensão máxima atuando na região do defeito, como esperado, demonstrando a influência da corrosão nos resultados ao ocorrer tensões críticas na região. Além disso, é possível notar uma distribuição de tensões menores na região oposta ao defeito, que é resultado da ligação rígida feita com os elementos de contato entre a seção e o ponto remoto, conforme tratado na seção 3.1.2.

Tabela 7 – Validação com os experimentos de (MIYAZAKI et al., 2002)

Caso	Material	Momento máximo (kNm)		Erro relativo (%)
		(MIYAZAKI et al., 2002)	Presente trabalho	
LWT-14	STS370	25,8	24,2	6,2
LWT-09	STS370	28,8	26,3	8,7
LWT-17	STS370	26,2	25,4	3,1
TP-08	STS410	38,1	36,1	5,2

Fonte: O autor, 2024.

Para avaliar o modo que o momento fletor foi aplicado ao criar uma ligação rígida entre o nó remoto e a seção transversal do duto, conforme discutido na seção 3.1.2.2, foi feito um

estudo paramétrico variando o comprimento ( $C$ ) do modelo, permitindo verificar se possíveis concentrações de tensão, e outras anomalias, na extremidade onde o momento fletor é aplicado impactam no resultado quando interferem na região crítica próximo ao defeito.

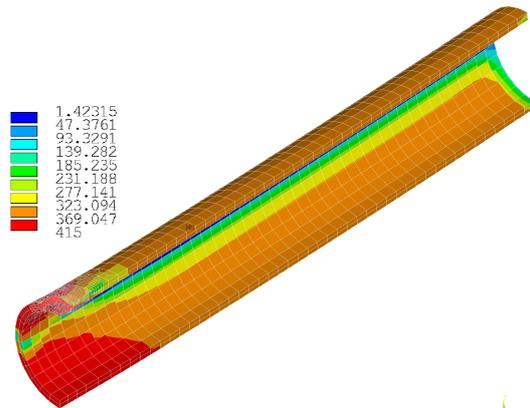
Não houveram variações de resultados entre os casos, Tabela 8, demonstrando que esta rigidez não afeta nos resultados da análise, logo independe da distância entre a região rígida e o defeito. Esta constatação fica ainda mais evidente ao analisar as tensões de Von Mises dos três casos simulados, Figura 15, onde percebe-se uma distribuição de tensões idêntica da região próxima ao defeito. Sendo assim, pode-se concluir que o modelo proposto é válido para as análises deste trabalho.

Tabela 8 – Validação da invariância do comprimento

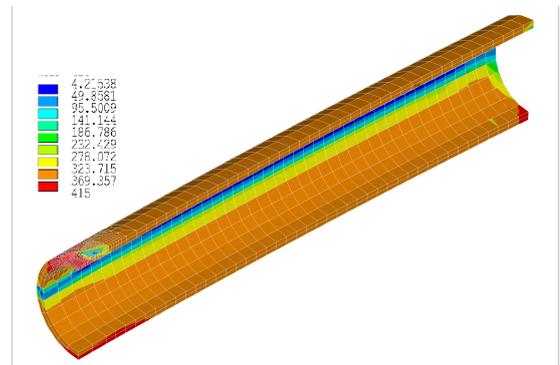
Comprimento do duto	Momento máximo [MEF] (kNm)
$3D$	24,20
$5D$	24,20
$10D$	24,20

**Fonte:** O autor, 2024.

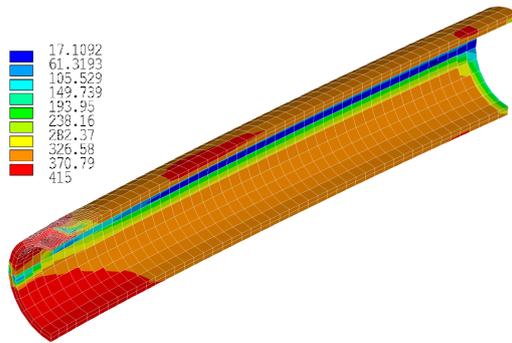
Figura 14 – Tensões de Von Mises da validação com os experimentos



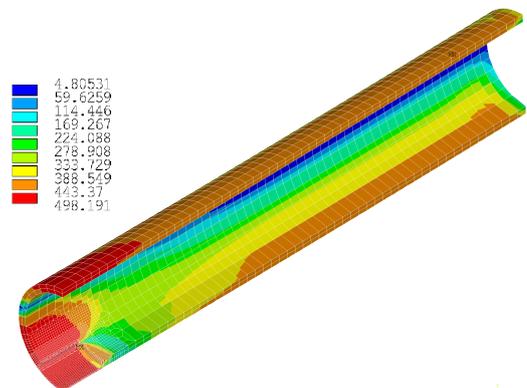
(a) LWT-14



(b) LWT-09



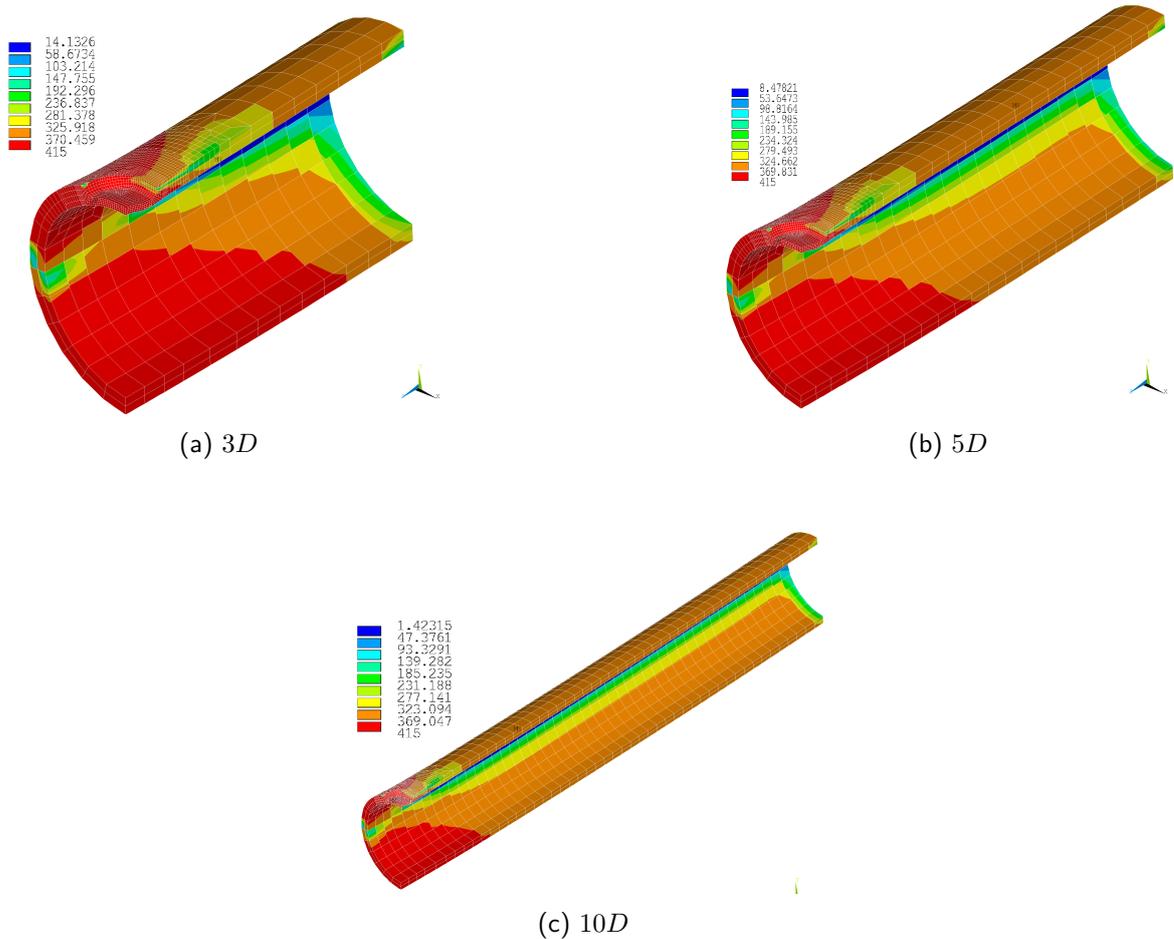
(c) LWT-17



(d) TP-08

Fonte: O autor, 2024

Figura 15 – Tensões de Von Mises da validação de invariância do comprimento



Fonte: O autor, 2024

## 4.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

### 4.2.1 Aplicação dos carregamentos isoladamente

As simulações dos carregamentos, atuando isoladamente, de pressão externa até o colapso e momento fletor até a falha foram feitas já que são dados utilizados na equação de carregamento combinado, além de também constarem nos resultados do estudo paramétrico. Para o caso intacto, Tabela 9, os resultados serão utilizados para normalização dos dados dos demais casos e para construção de uma envoltória utilizando a equação combinada com os expoentes do caso íntegro já apresentada.

As distribuições das tensões de Von Mises do duto intacto encontram-se na Figura 16, onde na Figura 16a é o resultado após a flexão até a falha (584,22 kNm), sendo possível notar a linha neutra na região do centroide, que é a mesma de aplicação do momento. Já na Figura

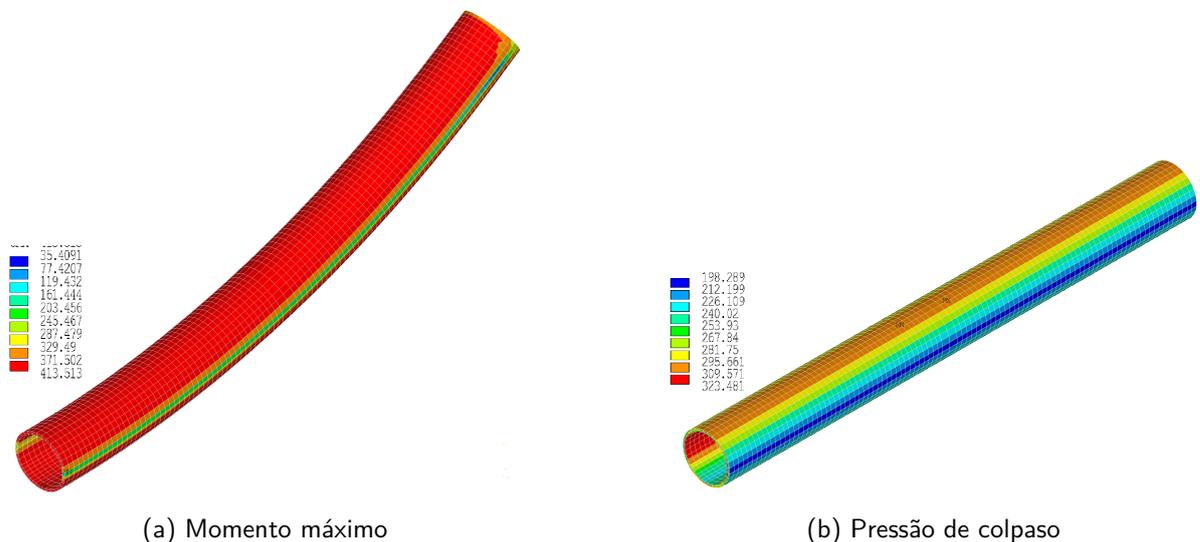
16b trata-se da aplicação de pressão externa até o colapso (32,41 MPa), onde percebe-se a tensão máxima ocorrendo na região oposta a tensão mínima, ainda que a mínima tenha se aproximado dos 200MPa, demonstrando que todo o duto sofreu grandes solicitações como um todo.

Tabela 9 – Momento máximo e pressão de colapso: duto intacto

Caso	Material	Diâmetro ( $D$ )	Espessura ( $t$ )	Comprimento ( $C$ )	$M_{max}$ (kNm)	$P_{col}$ (MPa)
Intacto	STS370	323,85 mm	15,88	10D	584,22	32,41

Fonte: O autor, 2024.

Figura 16 – Tensões de Von Mises e deslocamentos do duto íntegro



Fonte: O autor, 2024

Para os dutos corroídos nos resultados do MEF, descritos na Tabela 10, nota-se uma maior resistência ao momento negativo [ $M_{max}(-)$ ] (que traciona o defeito), em relação ao momento positivo [ $M_{max}(+)$ ] (que comprime o defeito); além de uma maior redução na resistência para os casos com defeitos mais críticos, principalmente com maior profundidade (SP02) e largura (SP06).

Para a pressão externa até o colapso ( $P_{col}$ ), descritas na Tabela 10, percebe-se uma acentuada queda na resistência para maior profundidade (SP02), enquanto para as demais dimensões não há tanta variabilidade, ao contrário do momento fletor. Comparando com o caso sem defeitos, houve redução tanto do momento fletor como da pressão externa, demonstrando a influência dos defeitos de corrosão na resistência aos carregamentos.

A equação analítica do momento fletor máximo resultou em valores consideravelmente distantes em relação às simulações pelo MEF, Tabela 10, que a validação mostrou serem muito próximas de casos experimentais, logo a equação acaba tendendo a segurança (mais conservadora), mas com perda de precisão. Nota-se que os valores para os casos SP00, SP07 e SP08 foram os mesmos, pois a variação entre estes é a ovalização inicial, que não é considerada pelo modelo analítico.

A equação da pressão externa de colapso também levou a resultados mais conservadores em relação às simulações pelo MEF, havendo repetição para os casos SP00, SP05 e SP06 devido às limitações das categorias C1, C2 e C3 ao qual o fator  $R_{Netto}$  (NETTO, 2009) foi calibrado. Conclui-se que é mais viável a utilização do MEF para obtenção dos resultados de pressão de colapso e momento máximo ao invés dos modelos analíticos propostos na literatura.

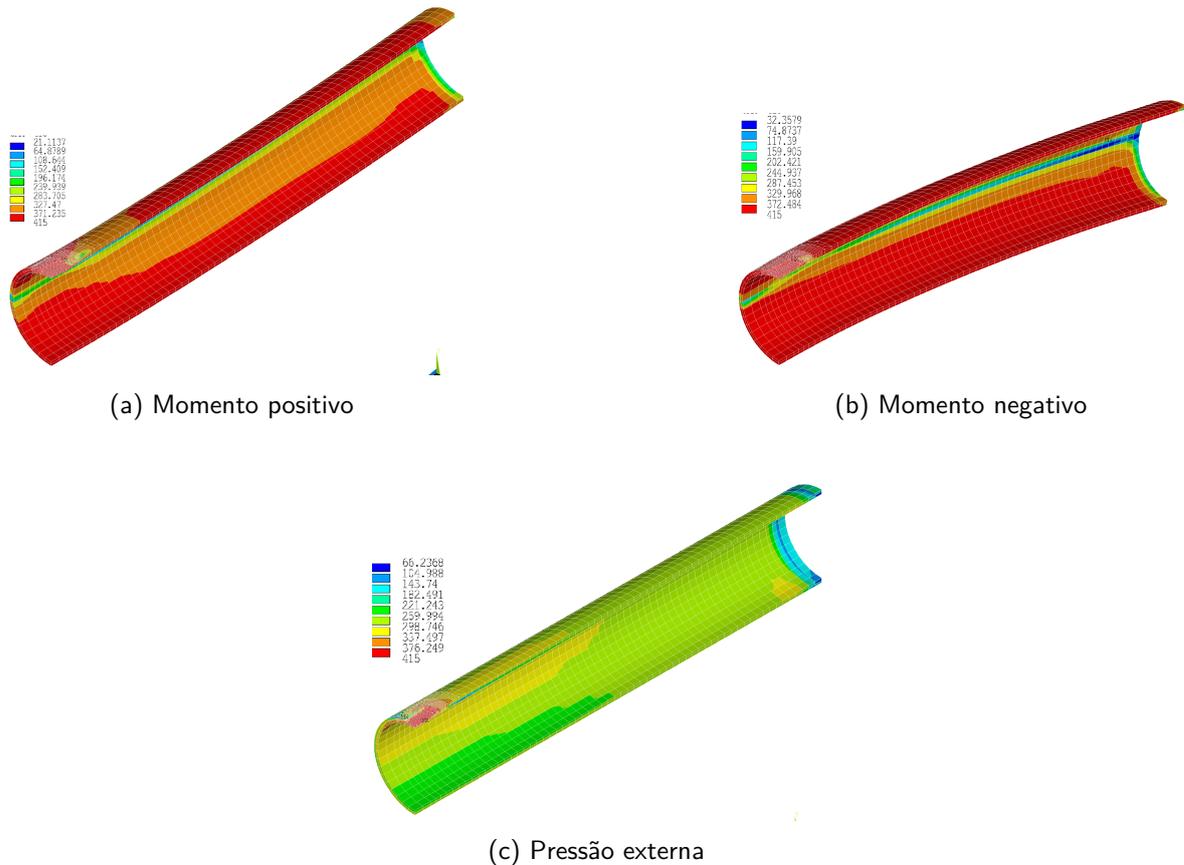
Tabela 10 – Momento máximo e pressão de colapso: casos do estudo paramétrico.

Caso	Simulações MEF			Equações analíticas		Erro relativo (%)		
	$M_{max}$ (+) (kNm)	$M_{max}$ (-) (kNm)	$P_{col}$ (MPa)	$M_{max}$ (kNm)	$P_{col}$ (MPa)	$M_{max}$ (+)	$M_{max}$ (-)	$P_{col}$
SP00	554,78	573,65	28,62	461,11	15,91	15,4	19,6	44,4
SP01	529,74	567,92	23,41	455,75	14,1	14	19,8	39,8
SP02	509,56	558,82	14,1	442,71	13,1	13,1	20,8	7,1
SP03	550,09	570,02	25,42	457,06	15,16	16,9	19,8	40,4
SP04	551,30	567,05	23,42	455,70	15,91	17,3	19,6	32,1
SP05	501,48	554,91	27,96	447,16	15,91	10,8	19,4	43,1
SP06	458,78	516,64	26,35	429,09	15,91	6,5	16,9	39,6
SP07	543,69	572,44	27,36	461,11	14,98	15,2	19,4	45,2
SP08	542,03	570,99	25,72	461,11	13,96	14,9	19,2	45,7

Fonte: O autor, 2024.

Na Figura 17 estão as distribuições das tensões de Von Mises para o caso inicial SP00. Novamente a tensão máxima ocorreu na região do defeito, e percebe-se uma distribuição de tensões mais elevadas, mas não a máxima, nas regiões abaixo e acima da linha neutra, principalmente para momento negativo (Figura 17b) que é superior ao positivo (Figura 17a).

Figura 17 – Tensões de Von Mises do caso SP00 para momento máximo e pressão de colapso



Fonte: O Autor, 2024

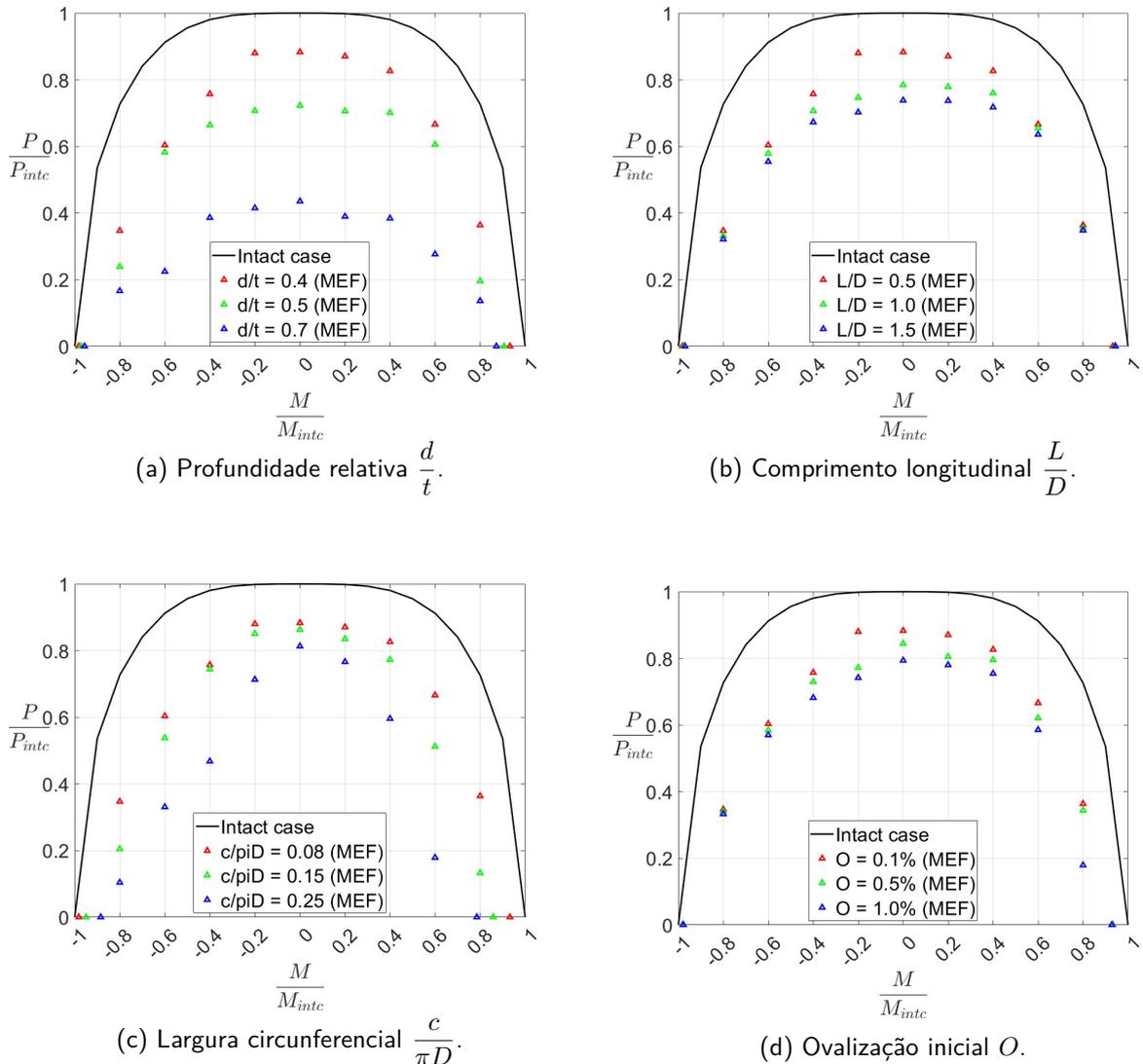
#### 4.2.2 Aplicação dos carregamentos combinados

Na Figura 18 estão os gráficos com os resultados das simulações de carregamentos combinados de momento fletor e pressão externa. Comparando com o caso intacto, é possível notar o quanto os defeitos de corrosão impactam nos resultados, reduzindo a capacidade resistiva dos dutos aos carregamentos combinados. A profundidade (Figura 18a) e a largura (Figura 18c) foram as dimensões que mais impactaram nos resultados, inclusive gerando uma maior assimetria dos dados, enquanto as demais dimensões de comprimento e ovalização (Figura 18b e Figura 18d) tiveram baixa influência, com evoluções mais suaves.

Os resultados para o momento negativo combinado à pressão externa (dados na região negativa do eixo  $x$ ) apresentaram menor resistência em relação ao momento positivo (dados na região positiva), o que é coerente com a Mecânica dos Materiais (BEER et al., 2011). Para o estado de tensões biaxiais, conforme Figura 19, da tensão normal de tração causada pelo momento fletor e a tensão de compressão circunferencial devido à pressão externa na região

do defeito, Figura 19a, caracteriza o estado crítico (MASCIA, 2006), enquanto só compressão, Figura 19b, não afeta intensamente a região corroída quanto o caso crítico.

Figura 18 – Resultado dos estudos paramétricos para o caso de ações combinadas



Fonte: O autor, 2024

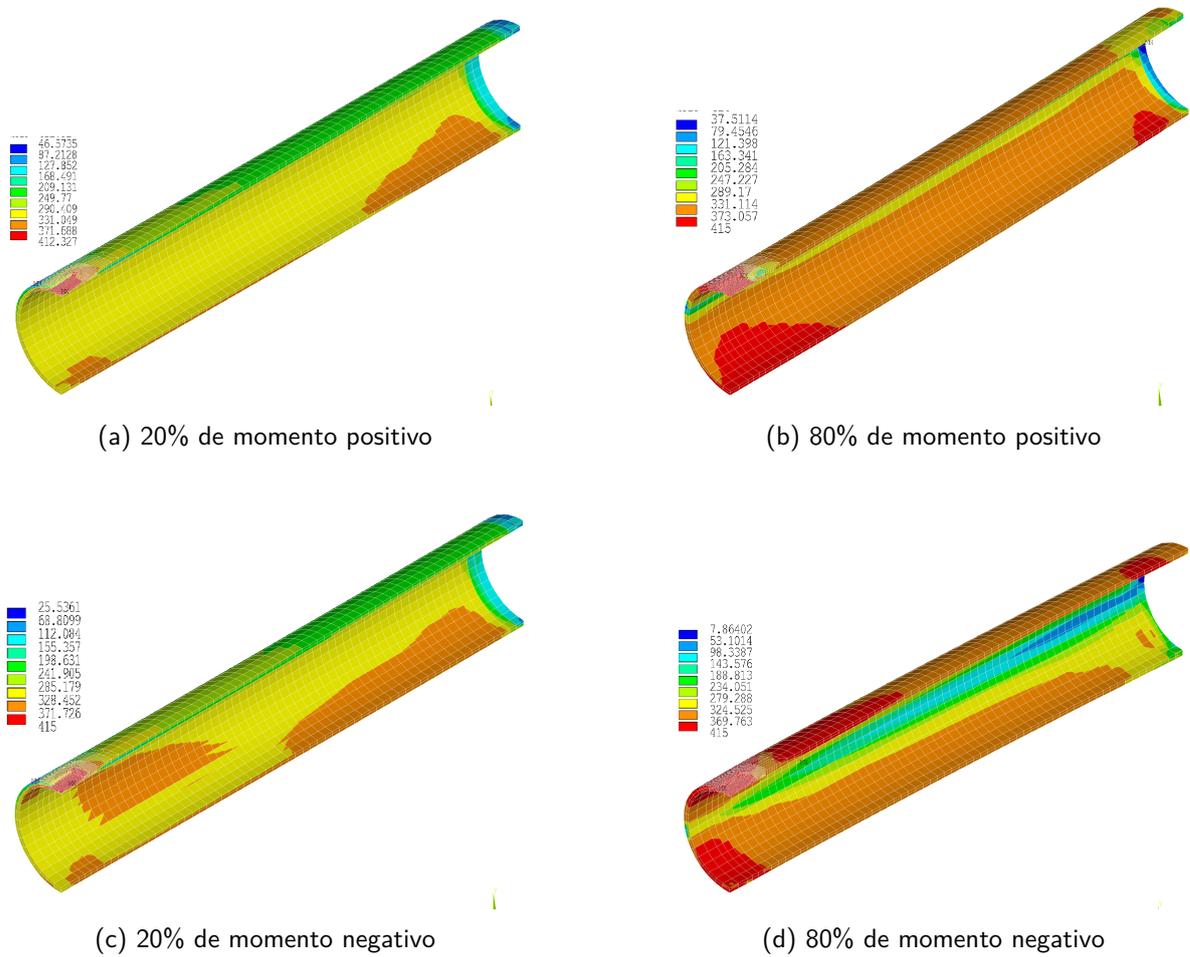
Na Figura 20 estão as distribuições de tensões para o caso inicial (SP00) submetido à carregamentos combinados, novamente mostrando tensões máximas na região corroída. Percebe-se uma distribuição de tensões elevadas para os casos de flexão mais intensos (Figura 20b e Figura 20d) ao contrário dos de menor intensidade de flexão (Figura 20a e Figura 20c), mesmo a pressão de colapso sendo maior.

Figura 19 – Tensões biaxiais



Fonte: O autor, 2024

Figura 20 – Tensões de Von Mises da combinação dos carregamentos



Fonte: O autor, 2024

### 4.3 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS

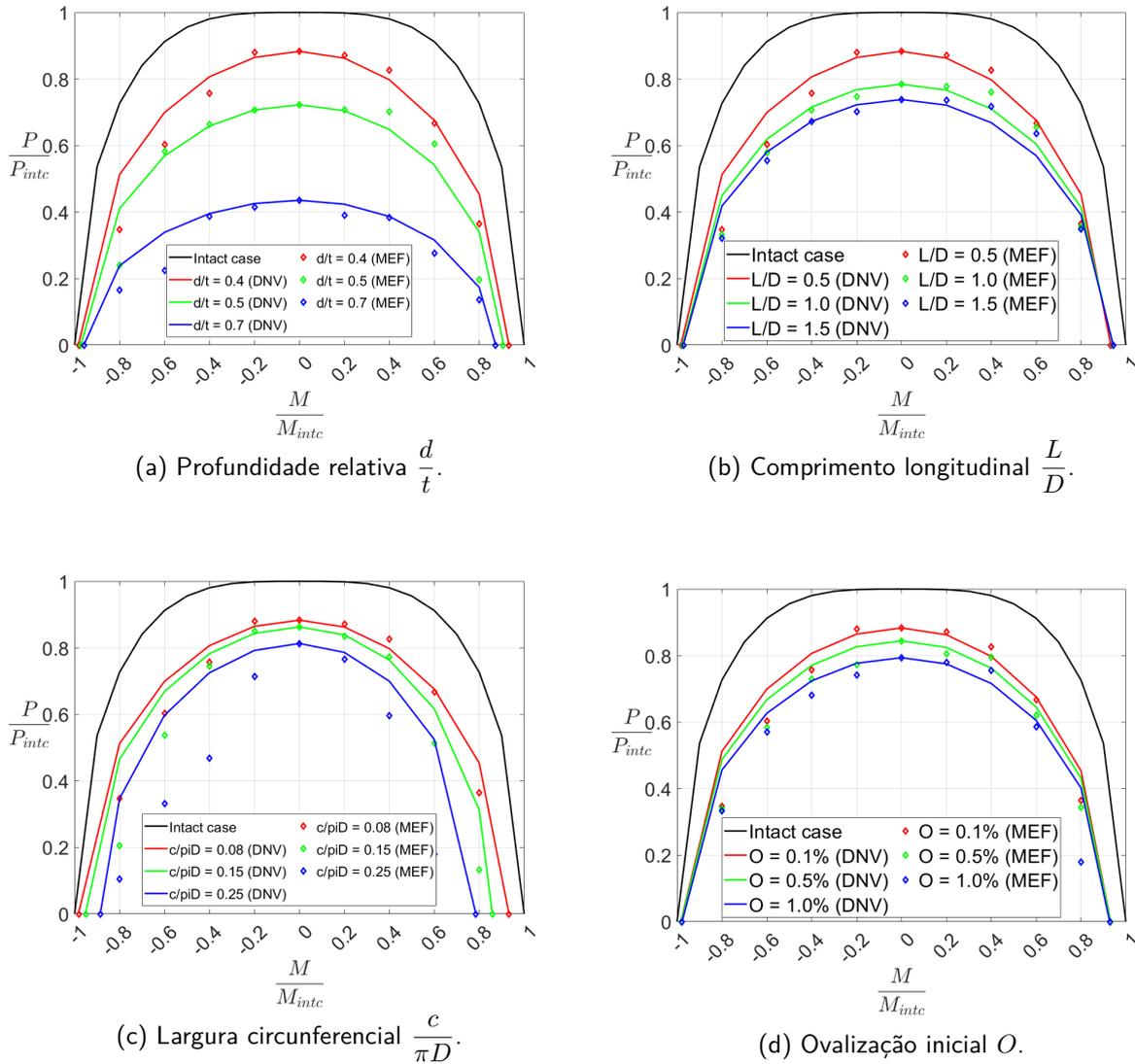
Para a construção da curva a equação de combinação foi aplicada em duas partes: a primeira utilizando o momento máximo negativo para geração da curva à esquerda da origem do eixo  $x$  e a segunda o máximo positivo para a direita da origem do mesmo eixo, já que são situações distintas com comportamentos também distintos.

Nos gráficos da Figura 21 estão as comparações dos resultados das simulações (losangos) com a equação de combinação com os expoentes propostos pela DNV (linha sólida), onde percebe-se uma boa aproximação dos dados, principalmente nos casos onde os dados são mais suaves (Figura 21b e Figura 21d) e um distanciamento nas dimensões mais críticas: sendo mais leve para profundidade (Figura 21a) e mais intenso para a largura (Figura 21c).

Há um maior afastamento dos dados na região de momento negativo, que é a situação crítica conforme já tratado, enquanto os dados se aproximam melhor para o momento positivo. No caso negativo, no geral, os resultados da equação ficaram acima da simulação pelo MEF, logo menos conservadores; o que pode comprometer a segurança em uma análise prática.

Foi feita a correção dos expoentes da equação de combinação de carregamentos a partir dos resultados do MEF, distinguindo as situações de momento negativo e positivo, a partir dos métodos de otimização, sendo esta distinção não considerada, até então, pela literatura. Os resultados serão apresentados na próxima seção.

Figura 21 – Comparação com a equação de combinação



Fonte: O autor, 2024

#### 4.4 APLICAÇÃO DA EQUAÇÃO DE COMBINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS AJUSTADA

Na Tabela 11 estão os resultados da otimização feita para minorar o erro quadrático entre o modelo analítico e as simulações para cada sentido de flexão. Em uma tentativa de uniformizar os dados, foi tirada a média de cada expoente e também foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) de cada média para analisar o quanto a média se afastou dos dados amostrais.

Para o momento positivo, houve um maior CV da média em relação às amostras, enquanto para o negativo, onde houve maior divergência das simulações com os coeficientes da DNV; a variação foi menor, o que é oportuno, já que foi a situação que mais se afastou em relação às

simulações do MEF.

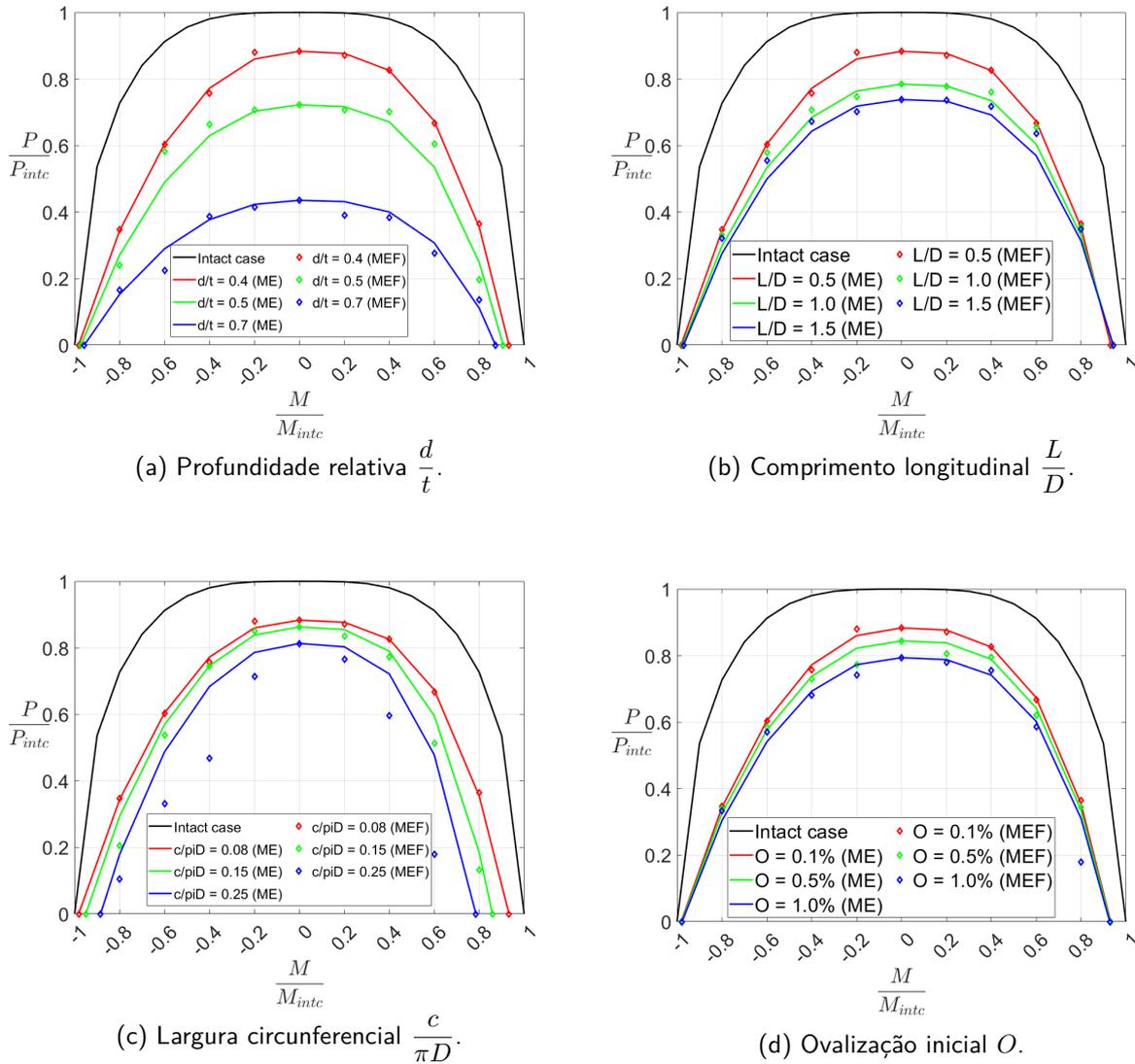
Tabela 11 – Resultado das otimizações

Caso	Momento positivo		Momento negativo	
	$\alpha_p$	$\delta_p$	$\alpha_n$	$\delta_n$
SP00	3,2934	1	2,1933	1,0833
SP01	5,9541	0,4937	2,7451	1
SP02	1,7147	1,7162	1,7559	1,1961
SP03	3,8439	1	2,7064	1
SP04	4,0672	1	2,5813	1,1393
SP05	2,6165	1	2,784	0,6775
SP06	1,6184	1	1,1922	1,0395
SP07	2,8095	1,1722	1,8384	1,3265
SP08	2,7117	1	2,5098	1
<b>MÉDIA</b>	<b>3,1810</b>	<b>1,0425</b>	<b>2,2570</b>	<b>1,0514</b>
<b>CV</b>	<b>42%</b>	<b>30%</b>	<b>24%</b>	<b>17%</b>

Fonte: O autor, 2024.

As curvas foram refeitas com os Expoentes Médios (ME), Figura 22, onde houve uma significativa melhora na região de momento negativo, o que era esperado ao analisar o CV. Também nota-se uma evolução para o caso de momento positivo, ainda que os resultados com os expoentes da DNV já tinham sido mais satisfatórios. A melhora, como esperado, foi maior nos casos em que os dados são mais suaves (Figura 22b e Figura 22d), mas ainda sim houve uma melhora nos dados mais deformados (Figura 22a e Figura 22c)

Figura 22 – Comparação com os expoentes médios calculados



Fonte: O autor, 2024

Para obter uma equação que calcula os expoentes em função do defeito foi feita uma interpolação dos resultados da Otimização (OP) a partir de um polinômio interpolador quadrático, onde as variáveis são as dimensões normalizadas do defeito e da ovalização inicial, conforme Equação 4.1. Os coeficientes do polinômio ( $a_n$ ) obtidos estão descritos na Tabela 12, e o  $R^2$  foi de 1 para todos, logo os dados foram totalmente atendidos.

$$\begin{aligned}
 f\left(\frac{d}{t}, \frac{L}{D}, \frac{c}{\pi D}, \frac{O(\%)}{100}\right) &= a_0 + a_1\left(\frac{d}{t}\right) + a_2\left(\frac{L}{D}\right) + a_3\left(\frac{c}{\pi D}\right) \\
 &+ a_4 \cdot O + a_5\left(\frac{d}{t}\right)^2 + a_6\left(\frac{L}{D}\right)^2 \\
 &+ a_7\left(\frac{c}{\pi D}\right)^2 + a_8 \cdot O^2
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Tabela 12 – Coeficientes do polinômio interpolador

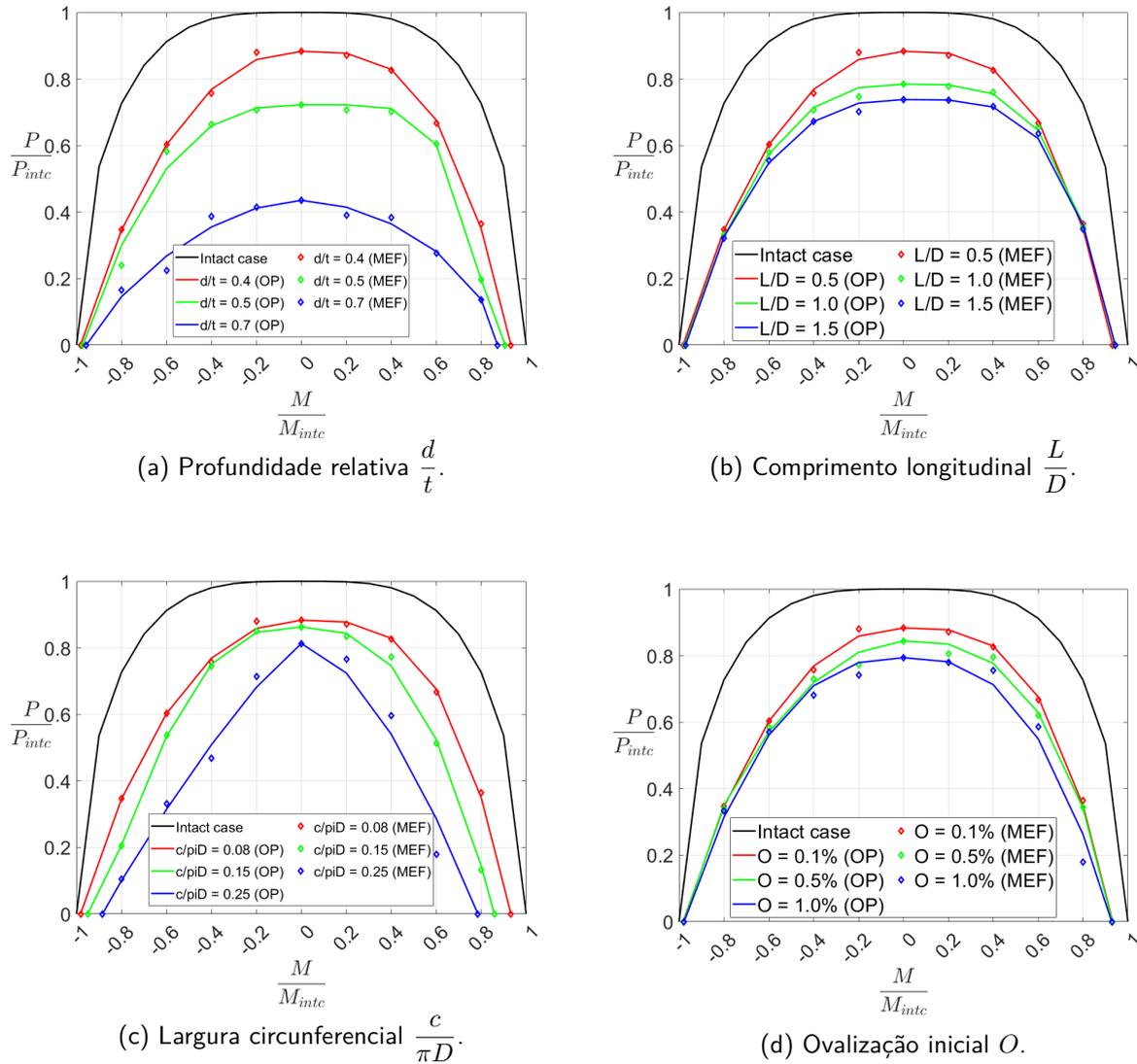
Coeficientes	Momento positivo		Momento negativo	
	$\alpha_p$	$\delta_p$	$\alpha_n$	$\delta_n$
$a_0$	-39,167	10,389	-10,318	3,9291
$a_1$	170,019	-38,5895	36,91	-6,2735
$a_2$	2,0826	0	2,9408	-0,8344
$a_3$	-9,2492	0	41,2969	-18,538
$a_4$	-188,585	94,71	-237,395	144,8667
$a_5$	-159,347	37,2517	-34,88	6,045
$a_6$	-0,6544	0	-1,2764	0,4452
$a_7$	-1,8294	0	-142,8622	55,3959
$a_8$	11268,333	8609	24778,333	-14011,1

**Fonte:** O autor, 2024.

Os resultados da otimização (OP) comparados com o MEF, a partir dos polinômios interpolados, estão na Figura 23. É notório que os resultados melhoraram significativamente para todos os dados, inclusive as mais deformadas (Figura 23a e Figura 23c).

Na Tabela 13 estão os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre os dados das simulações e os resultados da equação de combinação com os diferentes expoentes testados. Em todos os casos houve um melhoramento dos resultados utilizando os ME, sendo mais intensa para os casos SP05 e SP06, também havendo melhoria com os polinômios interpolados a partir dos dados da otimização, onde em todos os casos ficaram acima de 0,9, que demonstra resultados com uma acurácia elevada, e novamente a melhoria mais intensa ocorreu para os casos SP05 e SP06, este último passando de 0,687 para 0,982.

Figura 23 – Comparação com os expoentes médios calculados



Fonte: O autor, 2024

Tabela 13 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para os modelos utilizados

Caso	DNV	Expoentes Médios (ME)	Polinômios (OP)
SP00	0,961	0,99	0,999
SP01	0,938	0,979	0,993
SP02	0,923	0,972	0,985
SP03	0,975	0,992	0,999
SP04	0,978	0,985	0,999
SP05	0,744	0,892	0,946
SP06	0,687	0,823	0,982
SP07	0,96	0,996	0,997
SP08	0,93	0,980	0,988

Fonte: O autor, 2024.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

#### 5.1.1 Modelo de elementos finitos

A geometria e malha MEF gerados pelo PIPEFLAW, combinado com o ponto remoto, levou a resultados bastante satisfatórios para a obtenção do momento máximo suportado por dutos, podendo concluir isto a partir das validações feitas com dados experimentais publicados na literatura.

A ligação rígida entre a seção transversal do duto e o ponto remoto garante que não ocorra deformações excessivas na seção oposta ao defeito, fazendo com que as tensões máximas ocorram na região do defeito de corrosão, que é o esperado. A ligação rígida não afeta nos resultados, sendo verificável a partir da validação com diferentes comprimentos do modelo, logo a distância entre a região rígida e o defeito de corrosão.

As validações com os casos experimentais também autenticaram as curvas dos materiais aproximadas, a partir das propriedades mecânicas do aço carbono disponibilizadas na literatura, pela equação modificada de Ramberg-Osgood.

#### 5.1.2 Estudo paramétrico

##### 5.1.2.1 Carregamentos isolados

A resistência em dutos corroídos submetidos à flexão pura que traciona o defeito (momento negativo) é superior à compressão (compressão), já que a ductibilidade do aço possibilita um melhor comportamento ao alongamento, enquanto para a compressão pode ocorrer instabilidades locais, como flambagem, levado à falha mais facilmente.

As dimensões da corrosão de profundidade e largura são as que mais afetam a resistência à flexão, enquanto que para o colapso por pressão externa a profundidade do defeito é o parâmetro mais crítico.

As equações analíticas resultam em valores de carregamentos mais conservadores que às simulações pelo MEF, o que leva a uma perda de precisão em relação às respostas do MEF. Limitações na equação analítica de momento máximo ao não considerar a ovalização inicial

e o fator  $R_{Netto}$  nas calibrações que limitam a relação entre profundidade e largura, levaram casos distintos a resultados idênticos, o que intensifica a perda de precisão, sendo preferível a utilização de simulações pelo MEF.

Valores intensos de flexão, próximos a falha, resulta em tensões altas em todo o modelo do duto, sendo a tensão máxima no defeito de corrosão; enquanto para o caso de dutos submetidos à pressão externa há tensões intensas no defeito e intermediárias no restante do modelo.

### 5.1.2.2 Carregamentos combinados

Na combinação dos carregamentos de momento e pressão externa, os defeitos de corrosão e ovalização levam a uma perda de resistência considerável, se comparado a dutos sem estas imperfeições.

As dimensões de profundidade e largura foram as que mais impactaram nos resultados, levando a uma perda intensa da resistência, com as curvas dos resultados do estudo com formatos mais deformados. O comprimento do defeito e a ovalização inicial foram os parâmetros que menos afetaram na perda de resistência.

Ainda que o momento negativo seja melhor suportado pelo duto isoladamente, a combinação do mesmo com a pressão externa leva a uma maior redução da resistência ao colapso se comparado ao momento positivo, devido à formação do caso crítico das tensões biaxiais quando ocorre compressão e tração simultaneamente no defeito de corrosão que é a região de falha.

### 5.1.3 Equação de carregamentos combinados

A equação de combinação dos carregamentos, utilizando os expoentes propostos pela DNV, levam a resultados próximos das simulações na maior parte dos dados, entretanto há uma divergência maior nas dimensões mais críticas (profundidade e largura) e um maior afastamento na região em que a combinação é feita com momento negativo, que é o caso crítico já relatado.

#### 5.1.4 Equação de combinação ajustada

A aplicação dos métodos de otimização para minimizar o erro entre as equações e os dados para obter um melhoramento se mostrou bastante satisfatória, já que a aproximação entre os dados aumentou consideravelmente.

A utilização dos expoentes resultantes da média das amostras, obtidas pela otimização do erro, conseguiu reduzir a discrepância entre as simulações e os resultados analíticos, principalmente para a região de momento negativo, que foi a maior com os expoentes da DNV tendo uma afastamento notável, principalmente na largura da corrosão. O CV da média com as amostras foi menor para o momento negativo, o que explica a melhoria considerável para esta situação.

A interpolação por um polinômio quadrático, tendo as dimensões normalizadas do defeito e a ovalização inicial como variáveis, conseguiu atender com total êxito os dados das simulações, já que resultou em um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) máximo de 1.

Utilizando os polinômios, que levam aos expoentes obtidos pelas otimizações, se conseguiu melhorar mais ainda os resultados, inclusive para o caso crítico da largura do defeito. Nos dois ajustes realizados (ME e interpolação dos dados da otimização) houve melhoria na aproximação de todos os casos, principalmente para os dutos SP05 e SP06, que haviam apresentado maior divergência.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Frente ao trabalho desenvolvido, segue algumas sugestões de trabalhos futuros que podem dar continuidade à temática:

- Propor melhorias nas configurações do ponto remoto, visando obter bons resultados sem ligação rígida com a seção transversal de aplicação;
- Fazer análises com defeitos internos, verificando se há diferença relevante nos resultados;
- Simular dutos com diferentes geometrias (diâmetro e espessura) para testar as melhorias feitas na equação de combinação, podendo fazer mais correções;
- Testar a combinação dos carregamento em casos com corrosões irregulares (reais);

- Além da combinação de momento fletor e pressão externa, adicionar força axial e/ou pressão interna;
- Considerar modelos com múltiplos defeitos, alinhados circunferencialmente e longitudinalmente, verificando a influência da geometria e distância entre eles;
- Verificar a influência da posição do(s) defeito(s) em relação à ovalização quando submetido aos carregamentos combinados tratados neste trabalho;
- Utilizar confiabilidade estrutural para analisar a variabilidade estatística dos dados, para o cálculo de probabilidade de falha, inclusive dos polinômios interpolados; para aprimorar a precisão dos resultados.

## REFERÊNCIAS

- ANP. Nota Técnica, *Análise de Impacto Regulatório sobre Regulação de Sistemas Submarinos*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2015. Referência: Processo nº 48610.006769/2012-21.
- ANP. *VII Workshop de Segurança Operacional e Meio Ambiente (VII SOMA)*. 2019. Accessed: 2025-01-28. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2019/vii-workshop-de-seguranca-operacional-e-meio-ambiente-vii-soma>>.
- Ansys, Inc. *Element Reference*. Release 12.0. Canonsburg, PA, 2009. Certified to ISO 9001:2008.
- Ansys Inc. *Ansys Official Website*. 2024. Acesso em: 17 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.ansys.com/>>.
- Ansys Innovation Space. *Utilizing Remote Points Properly - Lesson 4*. n.d. Accessed: 2024-11-19. Disponível em: <<https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/connecting-parts-together/lessons/utilizing-remote-points-properly-lesson-4/>>.
- BARROS, E. W. S. Trabalho de Conclusão de Curso, *Análise de Viabilidade Econômica de Projetos em Engenharia Submarina Utilizando Risers Rígidos ou Flexíveis no Campo de Paru-Alagoas*. Maceió: [s.n.], 2023.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. *Mecânica dos materiais*. [S.l.]: Amgh Porto Alegre, 2011.
- BHARDWAJ, U.; TEIXEIRA, A.; Guedes Soares, C. Failure assessment of corroded ultra-high strength pipelines under combined axial tensile loads and internal pressure. *Ocean Engineering*, v. 257, p. 111438, 2022. ISSN 0029-8018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822008198>>.
- BINAZIR, A.; KARAMPOUR, H.; GILBERT, B.; GUAN, H. Bending capacity of pipe-in-pipe systems subjected to external pressure. In: SPRINGER. *ACMSM25: Proceedings of the 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials*. [S.l.], 2020. p. 657–666.
- BJØRSET, A. Capacity assessment of titanium pipes subjected to bending and external pressure. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, 2000.
- BJØRSET, A.; REMSETH, S.; LEIRA, B.; LARSEN, C. M. Titanium pipes subjected to bending moment and external pressure. *Computers & structures*, Elsevier, v. 81, n. 30-31, p. 2691–2704, 2003.
- British Standards Institution. *BS 7910:2013+A1:2015: Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures*. London: British Standards Institution, 2015.
- BRUÈRE, V. M.; BOUCHONNEAU, N.; MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R.; TORRES, J. V.; ANDRADE, E. Q. de; CUNHA, D. J. Failure pressure prediction of corroded pipes under combined internal pressure and axial compressive force. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 41, p. 1–10, 2019.

CABRAL, H. L.; MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R.; ANDRADE, E. Q. de. The development of a computational tool for generation of high quality fe models of pipelines with corrosion defects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 39, p. 3137–3150, 2017.

CABRAL, H. L.; WILLMERSDORF, R. B.; AFONSO, S. M.; LYRA, P. R.; ANDRADE, E. Development of computational tools for automatic modeling and fe analysis of corroded pipelines. *Int J Model Simul Pet Ind*, Citeseer, v. 1, n. 1, p. 9–22, 2007.

CABRAL, H. L. D. *Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

CHEN, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, J.; LIU, X.; LI, X.; ZHOU, J. Residual bending capacity for pipelines with corrosion defects. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, v. 32, p. 70–77, 2014.

DAULT, D.; CAMPOS, L. C. R. Uso de dutos flexíveis e umbilicais na produção de petróleo nos campos do pré-sal. *TEC-USU*, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 98–143, 2024. ISSN 2596-1284.

DENHAM, M. C. Choosing the number of factors in partial least squares regression: estimating and minimizing the mean squared error of prediction. *Journal of Chemometrics: A Journal of the Chemometrics Society*, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 351–361, 2000.

Det Norske Veritas AS. *Rules for Submarine Pipeline*. Hovik, Norway: Det Norske Veritas, 1996.

Det Norske Veritas AS. *DNV-OS-F101: Submarine Pipeline Systems*. Oslo, Norway: Det Norske Veritas, 2013. Disponível em: <<http://www.dnv.com>>.

DNV. *Nossa História*. 2023. <<https://www.dnv.com.br/about/in-brief/nossa-historia/>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

D'AGUIAR, S. C. M.; MOTTA, R. de S.; AFONSO, S. M. B. An investigation on the collapse response of subsea pipelines with interacting corrosion defects. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 321, p. 118911, 2024.

FERREIRA, A. D. M.; MOTTA, R. de S.; AFONSO, S. M.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R.; ANDRADE, E. Q. de; CUNHA, D. J. Stochastic assessment of burst pressure for corroded pipelines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 43, p. 1–17, 2021.

GILL, P. E.; MURRAY, W.; SAUNDERS, M. A. Snot: An sqp algorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM review*, SIAM, v. 47, n. 1, p. 99–131, 2005.

GLOBALDATA. *Oil and gas pipelines length and capacity and capital expenditure (CAPEX) forecast by region, countries and companies including details of new build and expansion (announcements and cancellations) projects, 2022-2026*. 2022. Disponível em: <<https://www.globaldata.com/store/report/oil-and-gas-pipelines-length-and-capital-expenditure-market-analysis/>>.

Goedele Machado Scheepers. Principais impactos causados pelo derramamento de petróleo na costa brasileira: caracterização de acidentes e técnicas de remediação em vazamentos por hidrocarbonetos. *Brasil Escola*, 2021. Accessed: 2025-01-28. Disponível em: <<https://monografias.brasilecola.uol.com.br/biologia/principais-impactoscausados-pelo-derramamento-de-petroleo-na-costa-brasileira-caracterizacao-de-aciden-htm>>.

GONG, S.; ZHOU, L.; WANG, X.; YUAN, L.; LIU, C. On the influence of interacting dual defects on the collapse pressure of pipes under external pressure. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 157, p. 107140, 2020.

GONG, S.; ZHOU, L.; WANG, X.; YUAN, L.; LIU, C. On the collapse of thick-walled pipes with corrosion defects under external pressure. *Marine Structures*, Elsevier, v. 76, p. 102925, 2021.

HAUCH, S. R.; BAI, Y. Bending moment capacity of pipes. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, v. 122, n. 4, p. 243–252, 2000.

Hexagon. *Patran 2023.4 Release Guide*. Irvine, CA, USA, 2023. Documentação do software Patran versão 2023.4. Disponível em: <<https://simcompanion.hexagon.com/>>.

JÓIA, C. J. B. M. et al. *Dutos Flexíveis: Especificação Técnica e Análise de Projeto*. 1. ed. [S.l.]: Petrobras, 2005. Apostila de Dutos Flexíveis.

KARADENIZ, H. A method for including ovalization effects of tubular member on cross-section properties. In: ISOPE. *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference*. [S.l.], 2001. p. ISOPE-I.

KESHTEGAR, B.; SEGHER, M. e. A. B. Modified response surface method basis harmony search to predict the burst pressure of corroded pipelines. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 89, p. 177–199, 2018.

KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. *Mechanics of Offshore Pipelines: Volume I: Buckling and collapse*. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2023.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, SIAM, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963.

MARTHA, L. *Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2010.

MARTINS, J. R. R. A.; NING, A. *Engineering Design Optimization*. [S.l.]: University of Michigan and Brigham Young University, 2021. First electronic edition: January 2020, compiled on October 5, 2021.

MASCIA, D. N. T. Teoria das tensões. *Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo—Departamento de Estruturas. Campinas: Unicamp*, 2006.

MATHWORKS. *Optimization Toolbox – MathWorks*. 2024.

<https://www.mathworks.com/products/optimization.html>. Accessed: 2024-10-29.

Ministério de Minas e Energia. *Pré-sal alcança 81% de participação na produção nacional de petróleo e atinge recorde com 3,6 milhões de barris produzidos por dia*. 2024. Accessed: 2025-01-28. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/pre-sal-alcanca-81-de-participacao-na-producao-nacional-de-petroleo-e-atinge-recorde-com-3-6-milhoes->>

- MIYAZAKI, K.; KANNO, S.; ISHIWATA, M.; HASEGAWA, K.; AHN, S. H.; ANDO, K. Fracture and general yield for carbon steel pipes with local wall thinning. *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, v. 211, n. 1, p. 61–68, 2002.
- MOTTA, R. d. S.; LEAL, C. F.; FERREIRA, A. D.; AFONSO, S. M.; LYRA, P. R.; WILLMERSDORF, R. B. Reliability analysis of ovalized deep-water pipelines with corrosion defects. *Marine Structures*, Elsevier, v. 77, p. 102969, 2021.
- MOTTA, R. S.; CABRAL, H. L.; AFONSO, S. M.; WILLMERSDORF, R. B.; BOUCHONNEAU, N.; LYRA, P. R.; ANDRADE, E. Q. de. Comparative studies for failure pressure prediction of corroded pipelines. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 81, p. 178–192, 2017.
- MSC Software Corporation. *Patran 2021.2 PCL and Customization*. Irvine, CA, USA, 2021. Documentação do software Patran versão 2021.2. Disponível em: <<http://www.mscsoftware.com/Contents/Services/Technical-Support/Contact-Technical-Support.aspx>>.
- NETTO, T. A. On the effect of narrow and long corrosion defects on the collapse pressure of pipelines. *Applied ocean research*, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 75–81, 2009.
- NETTO, T. A.; FERRAZ, U. S.; BOTTO, A. On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines. *International journal of solids and structures*, Elsevier, v. 44, n. 22-23, p. 7597–7614, 2007.
- OLATUNDE, M.; SRIRAMULA, S.; SIDDIQ, M. A.; AKISANYA, A. R. An investigation on the effect of widespread internal corrosion defects on the collapse pressure of subsea pipelines. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 287, p. 115926, 2023.
- OZER, D. J. Correlation and the coefficient of determination. *Psychological bulletin*, American Psychological Association, v. 97, n. 2, p. 307, 1985.
- PENG, J.; ZHOU, C.-Y.; XUE, J.-L.; DAI, Q.; HE, X.-H. Safety assessment of pipes with multiple local wall thinning defects under pressure and bending moment. *Nuclear engineering and design*, Elsevier, v. 241, n. 8, p. 2758–2765, 2011.
- Petrobras. *Pré-Sal*. 2024. Acessado em: 16 de outubro de 2024. Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br/pre-sal#500m>>.
- PHAN, H. C.; LE, T.-T.; BUI, N. D.; DUONG, H. T.; PHAM, T. D. An empirical model for bending capacity of defected pipe combined with axial load. *International journal of pressure vessels and piping*, Elsevier, v. 191, p. 104368, 2021.
- PIMENTEL, J. T.; FERREIRA, A. D. M.; MOTTA, R. de S.; CABRAL, M. A. F. da S.; AFONSO, S. M. B.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R. M.; ANDRADE, E. Q. de; CUNHA, D. J. da S. New procedure of automatic modeling of pipelines with realistic shaped corrosion defects. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 221, p. 111030, 2020.
- RIKS, E. The application of newton's method to the problem of elastic stability. *Journal of Applied Mechanics*, v. 39, n. 4, p. 1060–1065, 12 1972. ISSN 0021-8936. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3422829>>.

- SHUAI, Y.; WANG, X.-H.; FENG, C.; ZHU, Y.; WANG, C.-L.; SUN, T.; HAN, J.; CHENG, Y. F. A novel strain-based assessment method of compressive buckling of x80 corroded pipelines subjected to bending moment load. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, v. 167, p. 108172, 2021.
- SILVA, L.; SILVA, S.; MOTTA, R. Reliability analysis of the collapse of corroded submarine pipelines subjected to bending moment. In: ABMEC. *Proceedings of the XLV Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, ABMEC. Maceió, Alagoas, Brazil, 2024.
- SILVA, L. A. F.; SOUSA, P. F. S.; SILVA, S. M. B. A.; MOTTA, R. d. S.; HOROWITZ, B. Otimização de custos com consideração de probabilidade de falha em vigas de concreto armado sob flexão. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 12, n. 86, 2024. Disponível em: <[https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento\\_de\\_cidades/article/view/4991](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/4991)>.
- SOARES, E.; BRUÈRE, V. M.; AFONSO, S. M.; WILLMERSDORF, R. B.; LYRA, P. R.; BOUCHONNEAU, N. Structural integrity analysis of pipelines with interacting corrosion defects by multiphysics modeling. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 97, p. 91–102, 2019.
- SULAIMAN, N.; TAN, H. Third party damages of offshore pipeline. *Journal of Energy Challenges and Mechanics*, v. 1, n. 1, 2014. ISSN 2056-9386.
- TEIXEIRA, A.; PALENCIA, O.; SOARES, C. G. Reliability analysis of pipelines with local corrosion defects under external pressure. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 141, n. 5, p. 051601, 2019.
- TIAN, X.; ZHANG, H.; LU, M. Effect of axial force and bending moment on the limit internal pressure of dented pipelines. *Engineering failure analysis*, Elsevier, v. 106, p. 104168, 2019.
- YUDO, H.; AMIRUDDIN, W.; SANTOSA, A. W. B.; MURSID, O.; ADMONO, T. Study on the characteristics of pipe buckling strength under pure bending and external stress using nonlinear finite element analysis. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, v. 12, n. 2, p. 110–116, 2021.
- ZHENG, M.; LUO, J.; ZHAO, X.; ZHOU, G.; LI, H. Modified expression for estimating the limit bending moment of local corroded pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Elsevier, v. 81, n. 9, p. 725–729, 2004.