



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

MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ANÁLISE DE TENSÕES VIA ELEMENTOS FINITOS EM DUTOS RETOS E
CURVOS CONTENDO DEFEITOS DE AMASSAMENTO**

Recife

2024

MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ANÁLISE DE TENSÕES VIA ELEMENTOS FINITOS EM DUTOS RETOS E
CURVOS CONTENDO DEFEITOS DE AMASSAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Maciel Lyra.

Coorientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf.

Recife

2024

Catálogo na fonte:

Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4/1502

M528a Melo, Maize Cibele de Lima.
Análise de tensões via elementos finitos em dutos retos e curvos contendo defeitos de amassamento. / Maize Cibele de Lima Melo. – 2024.
93 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Maciel Lyra.
Coorientador: Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2024.
Inclui referências.

1. Engenharia mecânica. 2. Dutos. 3. Dutos em curva. 4. Defeito de amassamento. 5. Método dos elementos finitos. I. Lyra, Paulo Roberto Maciel (orientador). II. Willmersdorf, Ramiro Brito (coorientador). III. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2024-20

MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ANÁLISE DE TENSÕES VIA ELEMENTOS FINITOS EM DUTOS RETOS E
CURVOS CONTENDO DEFEITOS DE AMASSAMENTO**

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

Aprovada em: 08/02/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Roberto Maciel Lyra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho ao meu pai Francisco Erismar Melo (em memória) e a minha mãe Maurícia Martins de Lima Melo

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado, concedido discernimento e persistência durante essa trajetória.

Agradeço à minha base, à minha família, mãe, irmãs e sobrinhos pelo incentivo e empenho na formação.

Agradeço ao meu orientador Paulo Lyra e ao meu coorientador Ramiro Willmersdorf por todo o apoio, dedicação, incentivo e sugestões. Sou grata por acompanhamento desses excelentes profissionais.

Agradeço à banca examinadora, Nadège e Renato, pela disponibilidade em avaliar e contribuírem com meu trabalho.

Agradeço a todos os amigos que me incentivam e os amigos que ganhei ao longo deste tempo convivendo na UFPE.

Agradeço imensamente ao grupo de pesquisa PADMEC por toda a ajuda para o desenvolvimento deste trabalho e por todo o conhecimento repassado.

Agradeço à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação Energi Simulation, ao Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis (i-LITPEG) e à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

A todos, meu muito obrigada.

RESUMO

Defeitos de amassamento, também chamados de mossas, são defeitos comuns em dutos, originados por danos mecânicos externos. Esse tipo de imperfeição normalmente resulta em uma concentração de tensão que pode representar uma ameaça à segurança e integridade dos dutos. Os dutos desempenham um papel crucial no transporte de fluidos ao longo de grandes distâncias, sendo essenciais para a indústria de petróleo e gás. Em determinadas condições de instalação, torna-se necessário incluir curvaturas em trechos dos dutos. No entanto, é importante destacar que essas seções curvas, assim como qualquer outra parte dos dutos, estão suscetíveis a danos mecânicos. Nesse contexto, o presente trabalho visa avaliar a influência dos defeitos de mossas na integridade estrutural de dutos retos e curvos, submetidos a pressão interna. A pesquisa propõe uma metodologia computacional para gerar modelos de dutos com defeitos de mossas, a serem simulados numericamente por meio do Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* ANSYS. Os defeitos de mossas são sinteticamente gerados por meio de análise de contato não linear, utilizando como indentador um punção esférico com diferentes dimensões. Para garantir a qualidade dos resultados e otimizar o esforço computacional, foi aplicado um refinamento local da malha, com análise da convergência dos resultados e comparação entre uso de elementos de casca e elementos sólidos. O modelo de elementos finitos foi verificado com base nos resultados de ensaios conduzidos por outros pesquisadores. Os resultados mostram a influência do defeito, comprovando o quanto os defeitos de amassamento induzem a concentração de tensão, principalmente em dutos curvos com defeitos no interior e exterior da curvatura, pois mesmo quando apresentam uma pequena profundidade, mostram-se bastante suscetíveis a falhas e não podem ser considerados confiáveis para permanecerem em operação com segurança.

Palavras-chave: dutos; dutos em curva; defeito de amassamento; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Dents are common defects in pipelines and they are caused by external mechanical damage. This type of imperfection usually results in a stress concentration that can threaten the pipeline safety and integrity. Pipelines play a critical role in transporting fluids over long distances and they are essential to the oil and gas industry. Under certain conditions, it is necessary to include bends in pipeline sections. However, it is important to note that these curved sections, like any other part of the pipeline, are susceptible to mechanical damage. In this context, this study aims to evaluate the influence of dent defects on the structural integrity of straight and curved pipelines subjected to an internal pressure. The present research proposes a computational methodology to generate pipeline models with dents, to be numerically simulated by a Finite Element Method (FEM), using Ansys software. The dent defects are generated synthetically by means of non-linear contact analysis, using a spherical punch of variable dimensions as the indenter. In order to guarantee the quality of the results and to optimise the computational effort, a local mesh refinement was applied, along a convergence analysis and comparison between the use of shell elements and solid elements. The finite element model was compared with the results of tests carried out by other researchers. The results show the influence of the defect and demonstrate the extent to which crushing defects induce stress concentration, particularly in curved pipelines with defects on the inside and outside of the curve, which are very susceptible to failure even at small depths and cannot be considered reliable enough to remain in service safely.

Keywords: pipelines; curved pipelines, dent defect, finite element method.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 - | Malha de gasodutos no Brasil | 20 |
| Figura 2 - | Exemplo de estrutura de duto flexível | 22 |
| Figura 3 - | Exemplo de duto rígido | 22 |
| Figura 4 - | Processo de curvamento de dutos a quente por indução | 23 |
| Figura 5 - | Processo de curvamento de dutos a frio | 23 |
| Figura 6 - | Exemplo de duto com defeito de amassamento | 26 |
| Figura 7 - | Classificação das mossas | 26 |
| Figura 8 - | Exemplo de moessa contida | 27 |
| Figura 9 - | Exemplo de moessa não contida | 27 |
| Figura 10 - | Abordagens do estudo | 36 |
| Figura 11 - | Condições de contorno para a 1ª abordagem | 40 |
| Figura 12 - | Procedimento de amassamento e pressurização da 1ª abordagem.. | 41 |
| Figura 13 - | Duto amassado utilizado no ensaio de pressurização | 43 |
| Figura 14 - | Forma da moessa pré-fabricada e pós-fabricada | 43 |
| Figura 15 - | Malha do modelo de elementos finitos | 44 |
| Figura 16 - | Procedimento de amassamento e pressurização da 2ª abordagem. | 45 |
| Figura 17 - | Malha de elementos finitos com elementos <i>solid</i> 187 | 45 |
| Figura 18 - | Malha de elementos finitos com elementos <i>shell</i> 181 | 47 |
| Figura 19 - | Esboço da modelagem das curvaturas de acordo com as especificações | 49 |
| Figura 20 - | Posições do defeito em relação a curvatura | 50 |
| Figura 21 - | Análise da qualidade da malha (<i>skewness</i>) | 51 |
| Figura 22 - | Condições de contorno para a 3ª abordagem | 52 |
| Figura 23 - | Duto reto íntegro submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 54 |
| Figura 24 - | Duto curvo íntegro submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 54 |
| Figura 25 - | Duto reto com defeito causado com maior indentador, i.e. 40 % do diâmetro externo do duto, submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 55 |
| Figura 26 - | Duto reto com defeito causado com menor indentador, i.e. 13,33 % do diâmetro externo do duto, submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 27 - Duto curvo com defeito na posição superior a curvatura, submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 57 |
| Figura 28 - Duto curvo com defeito na posição externa a curvatura, submetido a carga de operação de 7,5 MPa | 57 |
| Figura 29 - Duto curvo com defeito na curvatura externa utilizando elementos sólidos | 58 |
| Figura 30 - Duto curvo com defeito na curvatura externa utilizando elementos de casca | 59 |
| Figura 31 - Comparação do histórico de convergência da tensão equivalente máxima utilizando elementos sólidos e elementos de casca | 59 |
| Figura 32 - Tensão equivalente do duto reto íntegro com incremento de pressão | 60 |
| Figura 33 - Tensão equivalente do duto curvo íntegro com incremento de pressão | 61 |
| Figura 34 - Tensão equivalente do duto reto com defeito causado com maior indentador sob incremento de pressão | 62 |
| Figura 35 - Tensão equivalente do duto curvo com defeito causado com maior indentador sob incremento de pressão | 62 |
| Figura 36 - Tensão equivalente do duto curvo com defeito superior a curvatura sob incremento de pressão | 63 |
| Figura 37 - Pontos ao longo da espessura do centro do defeito | 65 |
| Figura 38 - Distribuição da tensão de von Mises na área amassada no momento em que o indentador é afastado do duto, antes da pressurização | 67 |
| Figura 39 - Localização da falha após o teste experimental | 68 |
| Figura 40 - Distribuições de tensões equivalentes de von Mises | 68 |
| Figura 41 - Trajetórias para traçar resultados da 3ª abordagem | 71 |
| Figura 42 - Eixos para traçar resultados da 3ª abordagem | 71 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|--------------|--|----|
| Gráfico 1 - | Distribuição percentual de causa de incidentes em dutos na Europa nos anos de 2007 à 2016 | 25 |
| Gráfico 2 - | Curva tensão vs deformação do aço API 5L X52 da 2ª abordagem .. | 46 |
| Gráfico 3 - | Curva tensão vs deformação do aço API 5L X80 da 3ª abordagem .. | 48 |
| Gráfico 4 - | Tensão equivalente máxima vs. tempo (reto - menor defeito) | 56 |
| Gráfico 5 - | Tensão equivalente máxima vs. tempo (curvo - defeito interno) | 58 |
| Gráfico 6 - | Pressão crítica e profundidade dos defeitos dos casos da 1ª abordagem | 64 |
| Gráfico 7 - | Variação da deformação plástica equivalente no centro do defeito ... | 66 |
| Gráfico 8 - | Comparativo do histórico de tensão equivalente entre os modelos adotados | 69 |
| Gráfico 9 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória longitudinal do duto com defeito causado sob diferentes avanços do punção | 72 |
| Gráfico 10 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória longitudinal do duto para diferentes posições do defeito | 75 |
| Gráfico 11 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com diferentes curvaturas .. | 76 |
| Gráfico 12 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com defeito causado sob diferentes avanços do punção | 77 |
| Gráfico 13 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com defeito causado sob diferentes posições do defeito | 79 |
| Gráfico 14 - | Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória circunferencial do duto com diferentes curvaturas | |
| Gráfico 15 - | Histórico de tensão equivalente ao longo do tempo nos nós de falha | 80 |
| Gráfico 16 - | Pressão crítica e profundidade dos defeitos casos da 3ª abordagem | 82 |
| Gráfico 17 - | Distribuição de tensões normais ao longo de tempo no ponto central dos defeitos para diferentes casos | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 1 - | Propriedades do material para 1ª abordagem | 37 |
| Tabela 2 - | Pontos da curva tensão vs. deformação para 1ª abordagem | 37 |
| Tabela 3 - | Dimensões da geometria do duto para 1ª abordagem | 38 |
| Tabela 4 - | Propriedades dos materiais e dimensões do duto da 2ª abordagem | 43 |
| Tabela 5 - | Propriedades do aço API 5L X80 adotado na 3ª abordagem | 48 |
| Tabela 6 - | Quantidade de elementos das malhas com refinamento auto adaptativo de cada caso analisado na 1ª abordagem | 63 |
| Tabela 7 - | Variação de parâmetros adotados na 3ª abordagem | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|--------------------------|
| ca. | cerca de |
| Cia. | Companhia |
| Coord. | Coordenador, coordenação |
| ed. | edição |
| et al. | e outros |
| ibid. | na mesma obra |
| id. | do mesmo autor |
| i.e. | isto é |
| il. | ilustrado, ilustração |
| Ltda. | Limitada |
| Org. | Organizador, organização |
| p. | página |
| v. | volume |
| vs. | versus |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANP | Associação Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| API | <i>American Petroleum Institute</i> |
| ASME | <i>American Society of Mechanical Engineers</i> |
| EF | Elementos Finitos |
| FEA | Análise de Elementos Finitos |
| i-LITPEG | Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis |
| ISSO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| LC | Coeficiente de Lorenz |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| NF | Fatores de Nepo |
| PDAM | <i>Pipeline Defect Assessment Manual</i> |
| PADMEC | Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional |
| UFPE | Universidade Federal de Pernambuco |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 17 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 17 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 17 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 18 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 19 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 20 |
| 2.1 | UTILIZAÇÃO DE DUTOS | 20 |
| 2.2 | CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS | 21 |
| 2.2.1 | Dutos flexíveis | 21 |
| 2.2.2 | Dutos rígidos | 22 |
| 2.2.2.1 | Dutos Curvos | 23 |
| 2.3 | INTEGRIDADE DE DUTOS | 24 |
| 2.4 | DANOS MECÂNICOS EM DUTOS | 24 |
| 2.4.1 | Defeitos de amassamento | 25 |
| 2.4.2 | Classificação das mossas | 26 |
| 2.5 | MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM DUTOS | 28 |
| 2.5.1 | Método de elementos finitos | 28 |
| 2.5.2 | Análise de contato no MEF | 29 |
| 2.6 | ESTADO DA ARTE | 30 |
| 3 | METODOLOGIA | 36 |
| 3.1 | 1ª ABORDAGEM: ANÁLISE DE DUTOS RETOS E CURVOS, ÍNTEGROS E COM DEFEITO | 37 |
| 3.1.1 | Tipo de análise e especificações do material para 1ª abordagem .. | 38 |
| 3.1.2 | Modelagem da geometria e tipo de elemento para 1ª abordagem . | 40 |
| 3.1.3 | Configurações de malha, condições de contorno e configurações de contato para 1ª abordagem | 39 |
| 3.2 | 2ª ABORDAGEM: REPRODUÇÃO DE MODELOS DA LITERATURA .. | 42 |
| 3.2.1 | Reprodução do modelo de Shuai et al. (2018) | 42 |
| 3.2.2 | Extensão do modelo FE validado | 46 |
| 3.3 | 3ª ABORDAGEM: ESTUDO PARAMÉTRICO DE DUTOS CURVOS ... | 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.1 | Tipo de análise e especificações do material para 3ª abordagem .. | 47 |
| 3.3.2 | Modelagem da geometria e tipo de elemento para 3ª abordagem .. | 49 |
| 3.3.3 | Configurações de malha, condições de contorno e configurações de contato para 3ª abordagem | 50 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 54 |
| 4.1 | 1ª ABORDAGEM: ANÁLISE DE DUTOS RETOS E CURVOS, ÍNTEGROS E COM DEFEITO | 54 |
| 4.1.1 | Condições de operação | 54 |
| 4.1.2 | Comparação entre os tipos de elementos | 58 |
| 4.1.3 | Análise da pressão crítica | 60 |
| 4.2 | 2ª ABORDAGEM: REPRODUÇÃO DE MODELOS DA LITERATURA .. | 65 |
| 4.2.1 | Comparação de resultados de deformação, tensão e pressão crítica | 65 |
| 4.2.2 | Extensão do modelo para estudo paramétrico | 69 |
| 4.3 | 3ª ABORDAGEM: ESTUDO PARAMÉTRICO DE DUTOS CURVOS .. | 70 |
| 4.3.1 | Distribuições de tensões equivalentes longitudinais e ao longo do perímetro | 72 |
| 4.3.2 | Histórico de tensão equivalente | 82 |
| 4.3.3 | Análise da pressão crítica | 84 |
| 4.3.4 | Histórico de tensões normais | 85 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 87 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 87 |
| 5.2 | TRABALHOS FUTUROS | 88 |
| | REFERÊNCIAS | 89 |

1 INTRODUÇÃO

Dutos são tubulações que desempenham um papel fundamental no transporte de fluidos ao longo de grandes distâncias, com vasta empregabilidade em indústrias e são subdivididos em dois grandes grupos: dutos rígidos e dutos flexíveis. Os dutos rígidos de aço são considerados os meios mais eficientes e econômicos para transporte de petróleo e gás, geralmente compostos de aço leve com alta resistência, entretanto dependendo do tempo de uso e condições de serviço estão sujeitos a manifestações de defeitos, principalmente devido a exposição em ambientes hostis (Jin et al., 2020).

De acordo com Torres (2016), o tipo de duto, bem como suas dimensões, depende da necessidade e das condições de instalação. Podem ser classificados quanto a seu emprego e ao fluido a ser conduzido. O arranjo estrutural depende da infraestrutura disponível, por vezes, dutos rígidos devem ser capazes de superar obstáculos topológicos e/ou redirecionar a condução do fluido. Com isso, surge a necessidade de realizar curvaturas nestas tubulações.

Segundo Cianciarullo (2022), os dutos são ativos em constante crescimento, pois avanços tecnológicos e produtivos voltados a exploração do petróleo e gás impulsionam esforços conjuntos de pesquisas e desenvolvimento, visando evitar riscos prejudiciais ao processo produtivo, ao meio ambiente e aos indivíduos. Para isso, é necessária constante avaliação de problemas que possam surgir.

A causa mais comum de danos mecânicos e falhas em dutos é a interferência externa. Segundo Wang et al. (2021), o defeito de amassamento é um dos reflexos dessa causa, surgindo frequentemente em dutos enterrados de longa distância, devido a impacto de pedras de aterro, impactos de objetos de escavação e subsidência de terra local. Este, como qualquer outro defeito, está relacionado a vários fatores que devem ser avaliados.

Entre os métodos para avaliar problemas de engenharia, destaca-se o MEF (Método de Elementos Finitos), que é um método numérico de análise computacional eficaz, bastante utilizado para investigar a integridade estrutural de dutos com defeitos. Este método requer mão de obra capacitada para gerar modelos que representem adequadamente a geometria, carregamentos e condições de contorno dentro das configurações reais e, posteriormente, exige interpretação adequada dos resultados obtidos (Souza, 2008).

Diante desta temática, o presente trabalho propõe a avaliação de dutos retos e curvos com defeitos de amassamento, por meio de um estudo direcionado à geração de modelos computacionais que contenham os defeitos de interesse e à avaliação da integridade estrutural via Método dos Elementos Finitos (MEF). Apesar da existência de vários estudos que avaliam defeitos de amassamento em dutos, estes geralmente se concentram em seções retas. O presente estudo estende a avaliação para seções curvas, as quais também são suscetíveis a danos. Busca-se compreender se a curvatura das seções influencia na gravidade desses defeitos. Este trabalho se insere no contexto de pesquisas recentes do grupo PADMEC (Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que se concentra principalmente em defeitos de corrosão em dutos. Uma pesquisa recente do grupo, conduzida por Nepomuceno (2023), aborda defeitos de corrosão em seções curvas de dutos, reforçando a relevância e a atualidade do tema tratado neste estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo modelar numericamente e analisar, por meio do método de elementos finitos, dutos retos e curvos (considerando curvaturas à quente) que apresentam defeitos de amassamento, de modo a avaliar como esses amassamentos influenciam na integridade e dos dutos.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Realizar modelagem de dutos íntegros, retos e curvos;
- b) Gerar defeitos de amassamento por meio de análise de contato nos dutos, utilizando como indentador um punção esférico;
- c) Fazer análise comparativa entre dutos íntegros e com defeito, considerando tanto seções retas quanto curvas, e estabelecendo uma pressão interna de operação para cada caso;
- d) Realizar estudo comparativo entre a utilização de elementos de casca e elementos sólidos da malha de elementos finitos;

- e) Fazer análise da pressão crítica, aplicando pressurização interna gradativa nos dutos em diferentes casos, até o ponto em que ocorra a falha;
- f) Validar o modelo numérico desenvolvido comparando os resultados com um caso da literatura que apresenta ensaios experimentais;
- g) Realizar um estudo paramétrico em dutos curvos, com ênfase nos seguintes parâmetros: curvatura do duto, posição do defeito em relação a curvatura e avanço do punção que gera o defeito.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os dutos são fundamentais para o funcionamento eficiente e seguro de diversas indústrias, especialmente para o setor de energia. Devido a isso, a realização de estudos sobre dutos com defeitos é de extrema importância em virtude das implicações significativas que esses defeitos podem ter na integridade estrutural e, consequentemente, na segurança e eficiência operacional desses sistemas. As indústrias petrolíferas dependem dessas infraestruturas para conduzir fluidos ao longo de grandes distâncias, assim todos os defeitos que venham a existir devem ser bem compreendidos e avaliados, de modo a determinar a gravidade ou aceitabilidade de permanência em operação.

Apesar de serem encontrados diversas formas de defeitos em dutos, os defeitos de amassamento merecem atenção especial, pois podem levar a concentrações de tensão, comprometendo a integridade estrutural do duto e aumentando o risco de falhas catastróficas. Pesquisas e estudos existentes na área, revelam a pertinência do assunto, mas pouco se fala sobre a análise de defeitos em seções curvas que também são sujeitas a danos mecânicos, o presente estudo propõe essa abordagem.

Portanto, a justificativa para o estudo reside na necessidade de compreender como essas imperfeições afetam o desempenho dos dutos e como a resiliência das seções curvas são afetadas com este tipo de defeito. A compreensão aprofundada dos efeitos dessas imperfeições com o MEF proporciona *insights* valiosos sobre o comportamento estrutural dos dutos em condições realistas, permitindo o desenvolvimento de estratégias para mitigar riscos e impactos adversos ao meio ambiente e a sociedade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é estruturado em cinco principais etapas. A primeira, apresentada até aqui, compreende a parte introdutória, na qual é feita uma breve explanação do assunto, são apresentados os objetivos a serem alcançados e justificativa. A segunda etapa aborda a revisão bibliográfica sobre a temática do estudo, apresentando o estado da arte das principais literaturas de forma cronológica. A terceira etapa expõe a metodologia utilizada, detalhando todo o procedimento computacional e a validação do modelo de elementos finitos. Isso inclui o esclarecimento sobre o uso do *software*, detalhes sobre como foram adotadas as especificações do material, tipo de análise, dimensões da geometria, tipo de elemento utilizado, configurações da malha, condições de contorno e configuração de contato. Na quarta etapa, são descritos os resultados obtidos e as discussões relacionadas a eles, elencados de acordo com a análise de dutos em condições de operação, comparação entre os tipos de elementos, análise da pressão de falha para os diferentes casos, avaliação do modelo numérico computacional com comparação dos resultados de ensaios conduzidos por outros pesquisadores e resultados do estudo paramétrico, que exibem a distribuição de tensão equivalente e normal sob diferentes condições e combinações de parâmetros. Ao final, são apresentadas as principais conclusões das análises realizadas.

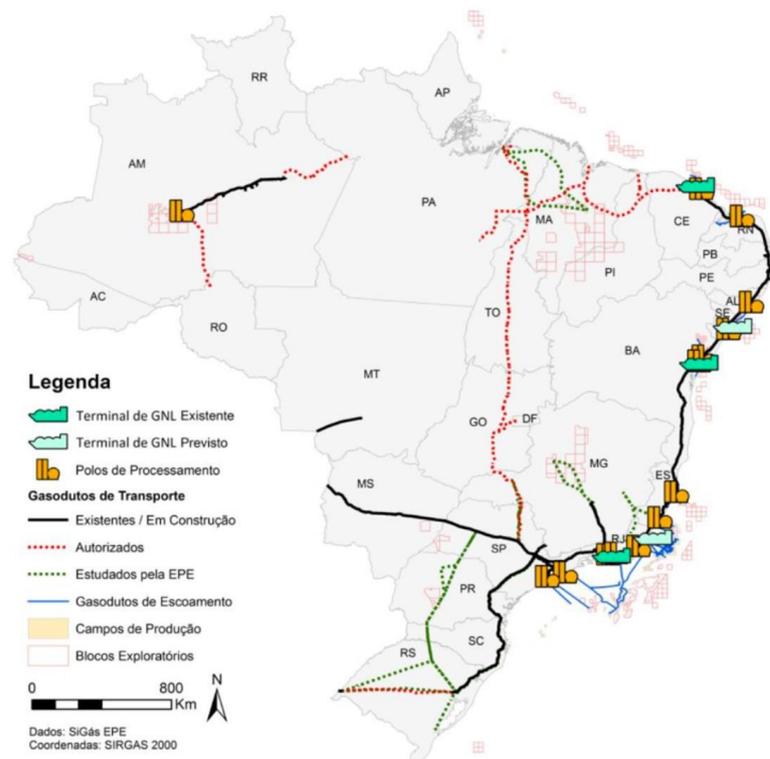
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 UTILIZAÇÃO DE DUTOS

Há cerca de 7.000 anos, já existia a ideia de dutos para transporte de fluidos, usados como simples canais para irrigação, que expandiu significativamente a partir do final do século XIX, principalmente devido ao desenvolvimento do motor a combustão, usados agora para transporte de hidrocarbonetos a longas distâncias. Agora, no século XXI, os dutos são indispensáveis nas indústrias de energia, especificamente a do óleo e gás (Cianciarullo, 2022).

Segundo a ANP (2023), o Brasil destaca-se como o maior produtor, com a maior capacidade de refino e o principal consumidor de petróleo na América do Sul. Em 2022, o país possuía 589 linhas de dutos dedicadas ao transporte de petróleo e seus derivados, gás natural e etanol, alcançando uma extensão total de 20,2 mil quilômetros. Uma grande proporção dessa extensão, cerca de 9,3 mil quilômetros, é destinada ao transporte de gás natural. Na Figura 1 está apresentado um panorama da rede de gasodutos brasileira.

Figura 1 – Malha de gasodutos no Brasil



Fonte: Poder 360 (2019)

Conforme relatado por Cianciarullo (2022), atualmente existem mais de 4,4 milhões de quilômetros de dutos espalhados pelo mundo, representando um ativo em contínua expansão. Progressos tecnológicos e de produção, focados na exploração e no transporte de petróleo e gás, estimulam colaborações em pesquisa e desenvolvimento, mitigando perigos que podem afetar negativamente o processo de produção, o ambiente e as pessoas.

Para certificar a segurança na utilização de dutos, existem normas que especificam requisitos e fornecem recomendações para o projeto, materiais, construção, testes, operação, manutenção e abandono de sistemas de dutos. Por exemplo, a ISO 13623 (2017) trata sobre dutos para transporte de petróleo e gás natural, e a ISO 13703 (2000) aborda sistemas de dutos em plataformas de produção *offshore*, entre outras normas.

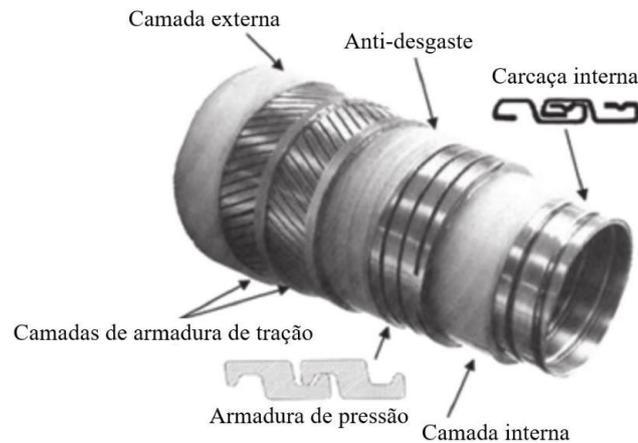
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS

Segundo Torres (2016), o tipo e as dimensões dos dutos variam conforme a demanda e as circunstâncias de instalação. É possível classificá-los de acordo com sua utilização e o tipo de substância que transportam. Basicamente, há duas classificações principais: dutos flexíveis e dutos rígidos.

2.2.1 Dutos flexíveis

Dutos flexíveis, conforme exemplificado na Figura 2, são compostos por camadas concêntricas de materiais metálicos e poliméricos, onde as camadas metálicas são responsáveis por suportar as cargas estruturais a que estão submetidos, enquanto as camadas poliméricas funcionam como componentes de vedação e anti-desgaste (Sousa et al., 2014). Eles são empregados principalmente na exploração de petróleo em águas profundas e evidenciam complexidade de instalação e dificuldades no desenvolvimento tecnológico de equipamentos e sistemas. Mas mesmo em caso de sistemas amplos, possuem vantagem relacionada ao transporte em forma de bobina (Morais, 2013).

Figura 2 – Exemplo de estrutura de duto flexível



Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2014)

2.2.2 Dutos rígidos

Já os dutos rígidos (Figura 3) são caracterizados por apresentar pouca ou nenhuma flexibilidade, e representam a maior quantidade de dutos utilizados atualmente, sendo compostos por aço carbono ou ligas de alta especificação. Encontram-se aplicações desde interligações curtas até grandes distâncias, que, a depender da necessidade, podem ser subterrâneos, aparentes ou aéreos. Fazem parte desta classificação os dutos rígidos por vezes chamados de “*pipelines*”, que são empregados no mar e possuem revestimento polimérico multicamadas. Quanto a locomoção, são transportados em forma de bobina somente quando possuem diâmetros reduzidos, normalmente são seccionados de 6 m ou 12 m e soldados na instalação (Prado, 2015).

Figura 3 - Exemplo de duto rígido



Fonte: Modal Dutoviário (2016)

2.2.2.1 Dutos Curvos

Dutos rígidos de aço frequentemente precisam superar obstáculos e/ou mudar a direção do transporte de fluidos, sendo necessárias curvaturas para tal. Esses dutos podem ser curvados de duas maneiras: a quente por indução e a frio. O curvamento a quente por indução (Figura 4) é utilizado quando se deseja um raio de curvatura pequeno, que de acordo com a ABNT NBR 15273 (2021) são aprovados raios de curvatura a partir de 3 vezes o diâmetro nominal do duto, sendo desenvolvido para garantir resistência mecânica compatível com seções retas. Por outro lado, o curvamento a frio (Figura 5) é realizado sem aquecimento do material. No entanto, esse método afeta as propriedades mecânicas devido ao encruamento provocado pela deformação plástica durante o processo, o que impede a obtenção de pequenos raios de curvatura sem causar danos (Veiga, 2008).

Figura 4 – Processo de curvamento de dutos a quente por indução



Fonte: (a) Gas Net (2006); (b) Ad Normas (2020)

Figura 5 – Processo de curvamento de dutos a frio



Fonte: Veiga (2008)

A norma ABNT NBR 15273 (2021) define os requisitos técnicos necessários para o fornecimento de curvas produzidas por meio do processo de curvamento por indução. Quanto a curvatura dos dutos, a norma ABNT NBR 15280-1 (2009), que trata sobre projetos de dutos *onshore*, indica a padronização de curvas a quente, especificando os ângulos de 45°, 90° e 180°.

2.3 INTEGRIDADE DE DUTOS

Os dutos devem ser projetados para oferecer alta funcionalidade, o que requer a implementação de regulamentações técnicas voltadas para a gestão da segurança operacional. No Brasil, essa responsabilidade é atribuída à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). O regulamento técnico da ANP (2011) estabelece os requisitos essenciais e mínimos para buscar manter a integridade de dutos terrestres.

Para aprofundar-se na temática de dutos em geral, é importante compreender o comportamento mecânico dos materiais. Segundo Callister e Rethwisch (2012), componentes fabricados com materiais metálicos são expostos a tensões e forças externas.

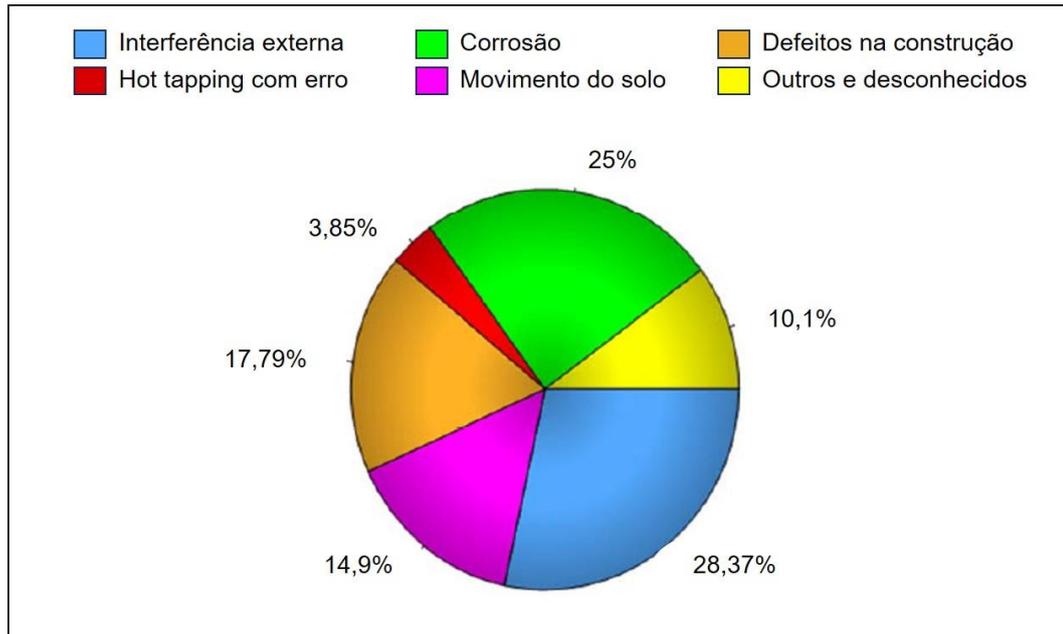
Dutos empregados em transportes de fluidos estão expostos a fatores externos que podem danificar sua integridade. Quando o carregamento do corpo é submetido a tensões acima de um certo limite, ocorre uma mudança dimensional permanente chamada deformação plástica, o que pode caracterizar um dano mecânico, afetando uma simetria radial previamente existente em um duto, fazendo com que haja a formação de zonas críticas de falhas através da geração de concentradores de tensão (Callister e Rethwisch, 2012).

2.4 DANOS MECÂNICOS EM DUTOS

A norma ASME B31.8 (2018) define danos mecânicos em dutos como sendo um defeito originado pela aplicação de forças externas, que podem incluir amassamento, remoção do revestimento ou do próprio material, deslocamento de material, perfuração e existência de tensões residuais. Os quais apresentam características aparentes, como a presença de mossas, vincos na parede do duto, arranhões, manchas e superfícies corroídas.

Estes danos mecânicos originados por interferência externa, são a causa dominante de falhas em dutos. Como exemplo, pode-se observar no Gráfico 1 que, na Europa, nos anos de 2007 a 2016, a distribuição percentual de incidentes revela que a principal causa de falhas em dutos é a interferência externa.

Gráfico 1 - Distribuição percentual de causa de incidentes em dutos na Europa nos anos de 2007 à 2016



Fonte: Adaptado de Egig (2018)

2.4.1 Defeitos de amassamento

O defeito de amassamento em dutos é causado por interferência externa, tratando-se de uma deformação plástica na parede do duto, responsável por uma distorção da seção transversal. Na Figura 6, é mostrado um exemplo de duto contendo um amassamento. A depender da profundidade do amassado, esse defeito pode ser classificado como mozza simples no qual a mudança da curvatura é muito suave, mozza com dobra que possui curvatura mais acentuada, e mozza com defeito, quando se encontra em combinação com outras formas de defeitos (Rafi, 2011). De acordo com a norma ASME B31.8 (2018), esse tipo de defeito é considerado nocivo quando sua profundidade ultrapassa 6% do diâmetro nominal do duto, quando afeta a costura de solda ou quando interagem com ranhuras, indicando a necessidade de substituição da seção do duto com defeito.

Figura 6 - Exemplo de duto com defeito de amassamento

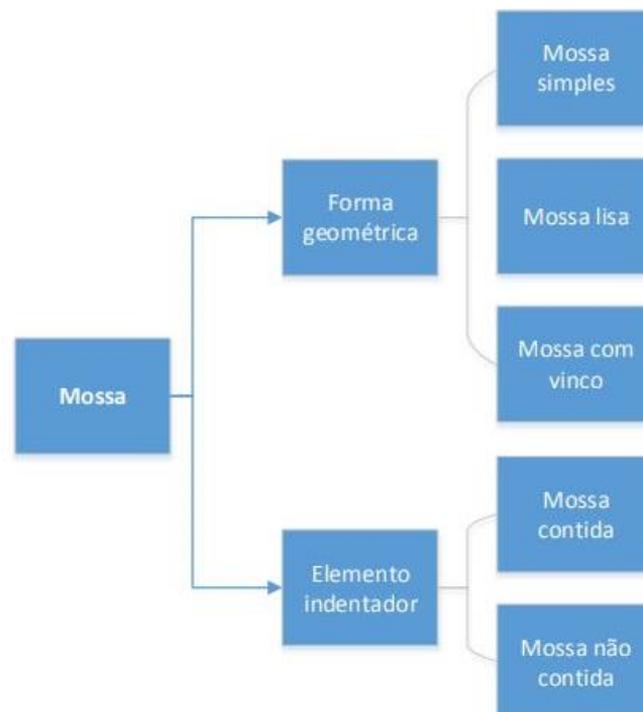


Fonte: Rafi et al. (2011)

2.4.2 Classificação das mossas

Sousa (2017) classifica as mossas com base em sua forma geométrica e na disposição do indentedor, conforme está mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Classificação das mossas



Fonte: Sousa (2017)

De acordo com as classificações listadas pelo autor, a mossa simples refere-se a uma leve alteração na curvatura da parede do segmento de duto, sem redução

significativa da espessura e sem associação a junta soldada ou a quaisquer outras imperfeições ou defeitos. Por outro lado, a moossa lisa é caracterizada por uma variação suave na curvatura da parede do segmento de duto, mas está associada a outros defeitos ou descontinuidades, como sulcos, ranhuras, trincas e soldas. A moossa com vinco é definida como uma mudança abrupta na seção transversal de um segmento de duto, apresentando um vinco com raio de curvatura menor ou igual a até cinco vezes a espessura da parede. A moossa contida (Figura 8), também chamada de restrita, por permanecer em contato contínuo com o indentador, não está livre para permitir um retorno elástico ou se readaptar geometricamente devido à variação da pressão interna. Já a moossa não contida (Figura 9), irrestrita, é aquela em que o indentador que a causou se afasta do segmento de duto afetado, permitindo que este recupere a fração elástica da profundidade máxima.

Figura 8 – Exemplo de moossa contida



Fonte: Adaptado de Huang e Zhang (2021)

Figura 9 – Exemplo de moossa não contida



Fonte: Huang e Zhang (2021)

2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DEFEITOS EM DUTOS

Para avaliação das consequências de defeitos de amassamento em dutos, a maneira mais convencional é a forma experimental, no entanto é impossível obter todas as informações necessárias para compreensão completa dos dados do experimento, além da inviabilidade de testes em escala real para uma ampla gama de parâmetros (Rafi, 2011).

Sendo assim, os estudos e pesquisas com foco em danos mecânicos em dutos tem tomado certa relevância. Lima et al. (2010) relatam que diversos métodos analíticos semiempíricos se propõem a avaliar a adequação ao uso de dutos com dano, porém são muito conservativos e considera configurações simplificadas. Um método alternativo para estudar e prever o comportamento de elementos estruturais, é a utilização do método de elementos finitos, através de técnicas de modelagem para análise computacional em *softwares* que permitem estas investigações.

2.5.1 Método de elementos finitos

O método dos elementos finitos pode ser entendido como uma abordagem numérica que oferece soluções aproximadas para equações diferenciais que representam problemas encontrados nas ciências e engenharias. Zienkiewicz e Taylor (2000) são referências fundamentais no desenvolvimento e na aplicação do método dos elementos finitos. Para aplicar esse método, é necessário formular o problema em um espaço geométrico, o qual é subdividido em regiões menores por meio de uma malha finita.

Com o avanço do MEF inúmeros elementos finitos foram desenvolvidos e podem ser empregados, incluindo elementos tridimensionais, como tetraédricos e hexaédricos. Em cada elemento finito, as variáveis desconhecidas são aproximadas por meio de funções conhecidas. Classicamente, essas funções podem ser expansões polinomiais lineares ou de ordem superior, expressas em termos das posições geométricas que definem a forma do elemento finito. Esse procedimento resulta em um sistema de equações não lineares finitas, relacionadas aos parâmetros desconhecidos nos elementos. As soluções dessas equações são então obtidas por meio de técnicas de álgebra linear (Pepper e Heinrich, 2006).

Atualmente, a maioria das análises por meio do método de elementos finitos é realizada em *softwares* de engenharia, a exemplo do Ansys. Essas ferramentas possibilitam a criação de modelos computacionais, permitindo simulações e análises de produtos em diversas abordagens. Uma das abordagens existentes em *software* para modelagem numérica de elementos finitos é configuração de contato entre dois corpos. Essa configuração é utilizada para simular as interações entre partes do sistema, as quais podem ser compostas por materiais diversos.

2.5.2 Análise de contato no MEF

Segundo Maas et al. (2016), os avanços nos métodos de elementos finitos possibilitam a criação de modelos numéricos que simulam o contato entre dois corpos. Para tal, é necessário definir propriedades e configurar modos específicos no *software*. Existem diversas formulações amplamente empregadas em *softwares* comerciais de elementos finitos, e essas se diferenciam devido a uma série de fatores, que incluem o tipo de contato, o método de tratamento de contato, a linearidade do material e da geometria, as condições de contorno, a complexidade do problema, entre outros.

De acordo com Silva (2009), o contato entre corpos é um fenômeno comum em sistemas mecânicos, sendo essencial compreender a distribuição de tensões nessa região, o que muitas vezes é difícil de calcular. A complexidade destas análises, por muitas vezes impossibilita a determinação de soluções analíticas, assim, os problemas são normalmente resolvidos por técnicas numéricas, envolvendo o MEF. A solução inclui adaptação de formulações numéricas para simular as condições de não penetração entre as superfícies, seguindo uma abordagem incremental e iterativa. Além disso, há estudos do problema de contato partindo do equacionamento básico dos princípios da mecânica (como deslocamentos virtuais e métodos de energia) e chegando às formulações variacionais do problema de contato.

O *software* Ansys disponibiliza uma ferramenta que permite a análise de contato, conforme indicado no Manual de Instruções do Usuário (2020). Os principais parâmetros a serem escolhidos pelo usuário incluem: o tipo de contato, podendo ser ligado, sem separação, sem atrito, áspero ou com atrito; a seleção das superfícies de contato, indicando qual será a superfície alvo; o comportamento do contato, assimétrico para contato entre corpos rígidos e flexíveis, ou simétrico para um contato rígido

com rígido ou flexível com flexível; e o método dos algoritmos de contato, podendo ser por penalidades, multiplicadores de Lagrange ou Lagrangiana aumentada.

2.6 ESTADO DA ARTE

Tratando-se de avaliação de defeitos em dutos, existe um projeto do ano de 2003 titulado como “*Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)*”, desenvolvido em conjunto com indústrias de petróleo e gás, para produzir um documento especificando métodos para avaliar defeitos em dutos, levando em consideração amassamentos em variadas condições.

Segundo Cosham e Hopkins (2003) o PDAM descreve o melhor método para avaliar um determinado tipo de defeito, define os dados de entrada necessários, apresenta as limitações do método e define um fator apropriado para levar em conta a incerteza do modelo. Para prever a resistência à ruptura e à fadiga de um duto contendo defeito de amassamento sujeito a pressão interna, se a profundidade da mocha for superior a 10% do diâmetro do duto, o manual recomenda seguir o procedimento voltado a duas literaturas que tratam de métodos de avaliação de defeitos, são elas: Roovers et al. (2000) e Hopkins (1992), que recomendam fazer uma revisão dos parâmetros de tenacidade disponíveis e de métodos laboratoriais que quantificam a resistência do defeito.

Sabendo que os defeitos de amassamento são encontrados em diferentes situações, muitas das bibliografias voltadas a esta temática tratam a deformação de modo isolado ou combinada com outro defeito. Algumas destas serão citadas a seguir.

Cunha et al. (2009) faz uma avaliação da vida útil a fadiga dos dutos com mochas planas, onde utiliza o *software* Abaqus para gerar malha e modelar o processo de amassamento através de análises de elementos finitos visando determinar as tensões envolvidas, posteriormente faz ensaio experimental aplicando pressão interna cíclica em dutos com escala reduzida. A pesquisa propôs um novo algoritmo para avaliar a vida útil em fadiga de dutos com amassamento simples sob condições de pressão interna cíclica.

Rafi (2011) desenvolveu sua tese sobre o comportamento estrutural de tubulações amassadas, onde realizou testes em escala real para avaliar a influência de parâmetros nas distribuições de deformação de mochas. O autor faz uma revisão do critério de avaliação de mochas da norma ASME B31.8 e fornece recomendações

para melhoria do critério, sugerindo que a norma deveria abranger todos os parâmetros que afetam o defeito, não se limitando apenas à profundidade.

Alguns estudos da temática são voltados a profundidade da moessa, um exemplo é o artigo de Allouti et al. (2012), que avalia a influência da profundidade com relação a pressão crítica da tubulação. Para tal estudo, os autores realizam uma série de testes mecânicos e fazem análise de elementos finitos, para comparar resultados numéricos com experimentais. Buscam validar uma regra puramente empírica, que especifica que um amassamento com a profundidade de 10% do diâmetro externo do duto é considerado crítico. Após a validação, concluem que esta regra é tida como conservadora, e então é preferível utilizar um critério de falha baseado da ductilidade do material.

Jajo (2013) em sua tese estudou o comportamento do amassamento nos dutos de aço sob carga de pressão, realizou testes experimentais em escala real e análise de elementos finitos. Neste trabalho, além da comparação do experimental com a análise de elementos finitos (FEA), um estudo paramétrico foi realizado para determinar o efeito de diferentes parâmetros na distribuição de deformação de um duto amassado. O modelo de EF foi validado, apresentando resultados próximos dos resultados do ensaio experimental. O estudo concluiu que fatores como o diâmetro e a espessura do tubo, bem como a pressão interna, influenciam a concentração de tensão ao redor do defeito. Observou-se que a tensão máxima não se localiza no centro do defeito, e essa característica permanece constante independentemente dos diferentes formatos do indentador responsável por causar o defeito.

Nunes (2017) em sua dissertação propõe reparo do tipo dupla calha para dutos com amassamento, baseado na instalação de calhas concêntricas, preenchendo o defeito com resina e aplicando carga de compressão. Para este estudo foi produzido um defeito de 6% de profundidade em relação ao diâmetro nominal do duto, o que por norma é considerado crítico. Para este trabalho foi simulada a reprodução de um modelo numérico, e a execução de ensaios experimentais em dutos com o defeito e com o reparo proposto. O autor ressalta a convergência dos dados do modelo numérico com os experimentais, validando que a modelagem por elementos finitos pode ser uma ferramenta útil no desenvolvimento deste tipo de trabalho. Por fim, as amostras reparadas foram submetidas a ensaios hidrostáticos até a ruptura, ambos os dutos romperam fora da região reparada.

A tese elaborada por Sousa (2017) retrata a análise da integridade estrutural de dutos com mossas. Este estudo compreende uma parte experimental, onde o autor elabora corpos de prova em escala reduzida e utiliza-os para gerar geometria 3D usando um tomógrafo industrial, com intuito de fazer análise via elementos finitos a partir desta geometria. Além disto, o autor faz modelagem de uma outra geometria em escala real no *software* Ansys, com esta faz uma análise de pressão crítica para diferentes profundidades do indentador.

Binquan et al. (2018) também faz uma análise de falha em dutos investigando o comportamento do defeito de amassamento. Esta análise é integralmente feita via elementos finitos, onde são discutidos os efeitos de alguns parâmetros, como a espessura, pressão interna, deslocamento e raio do indentador.

Sabe-se que o defeito de amassamento pode ser encontrado de diferentes maneiras. Para investigar algumas destas maneiras Han et al. (2018) realizou simulações em dutos com mossas longitudinais, transversais e inclinadas, com penetrador em forma de "V". Foram estudados comportamentos em cada uma destas abordagens, com ênfase nos efeitos da relação diâmetro-espessura e deslocamento do penetrador.

Segundo Zhang et al. (2020), na prática, os defeitos de amassamentos em dutos tendem a se re-arredondar devido influência da pressão interna. Em seu trabalho investigou a influência desta pressão, fazendo uma modelagem via elementos finitos no *software* Abaqus e teste experimental em escala reduzida.

Wang et al. (2021) faz uma avaliação da resposta mecânica de dutos com múltiplas mossas alinhadas, através do método de elementos finitos e teste de pressurização em escala real. O estudo revelou que a depender da distância das múltiplas mossas elas podem ser tratadas como defeitos de amassamento combinado, interação de defeitos ou desconsideração de interação.

Sun et al. (2021) estuda a interação entre o defeito de amassamento e o defeito de corrosão, através de modelagem via elementos finitos no *software* Abaqus conseguindo avaliar está interação com relação a pressão de falha das tubulações. O trabalho propõe um critério para determinar o espaçamento crítico entre os defeitos em questão, o qual envolve a profundidade e comprimento dos defeitos.

Ainda sobre a interação de defeitos, Okodi et al. (2021) analisou modelos de dutos com trincas longitudinais dentro de mossas. Por meio do método de elementos finitos pôde investigar a propagação destas fissuras e prever a pressão de ruptura associada.

Zhao e Cheng (2021) relata que até o momento os estudos sobre avaliação de falhas em dutos amassados têm sido limitados, cita que a ASME B31.8 contém algumas problemáticas que torna a avaliação dos resultados não suficientemente confiáveis. Em seu trabalho desenvolveu um novo método para avaliação de mochas em dutos, baseado no critério do indicador de falha dúctil combinado com uma deformação por um modelo de elemento finito.

Tian e Lu (2022) estabeleceu modelo de elementos finitos para análise de dutos com amassamento e goivagem. Huang et al. (2022) desenvolveu um modelo considerando a interação mecânica e eletroquímica para investigar defeitos em dutos com amassamento e corrosão. É possível notar que os estudos mais atuais que envolve defeito de amassamento em dutos, fazem uso de ferramentas que permitem modelagem numérica via elementos finitos, e de modo geral relacionam a avaliação deste defeito com a interação de algum outro.

Tratando-se de estudos sobre dutos curvos, esse é um campo relevante na engenharia, com diversas literaturas que abordam aspectos como análise estrutural, integridade, fenômenos de fadiga, efeitos de pressão interna, entre outros. Algumas dessas literaturas serão citadas a seguir.

Um dos primeiros estudos voltados a dutos curvos foi desenvolvido por Calladine (1974), no qual foram investigados as características mecânicas e os modos de falha de dutos curvos. O foco principal deste estudo é compreender o comportamento desses tubos sob condições extremas, tais como altas pressões ou cargas que possam causar falha ou colapso do material. Utilizando o cálculo do momento limite plástico, os resultados demonstram uma correlação moderada entre o momento plástico e o coeficiente de Poisson.

Robertson et al. (2005) investiga o colapso plástico de dutos curvos, acoplados a uma seção reta, sob pressão interna combinada e momentos fletores, utilizando análise elastoplástica por elementos finitos. O estudo identifica três categorias de falha dúctil em tubos: carga limite, carga plástica e cargas de instabilidade. Conclui-se que métodos tradicionais podem subestimar riscos em algumas combinações de carga. A carga plástica depende do critério de colapso utilizado e a carga de instabilidade considera grandes deformações. Diferentes tipos de carregamento resultam em fortalecimento ou enfraquecimento geométrico dos dutos.

Batista et al. (2007) investigam o impacto do curvamento a quente e do tratamento térmico subsequente na microestrutura e propriedades mecânicas de um duto

API 5L X80. O estudo analisa a variação microestrutural e as propriedades nas partes reta, curvada e nas zonas de transição do duto. Foram realizados ensaios de microdureza, tração e Charpy-V. Os principais resultados indicaram que após o curvamento a quente, houve uma considerável diferença microestrutural entre as regiões reta e curvada do duto, resultando em um limite de escoamento na região curvada abaixo do padrão exigido, mas com aumento de tenacidade. A aplicação de um tratamento térmico após o curvamento mostrou ser eficaz na recuperação do limite de escoamento para valores normativos, garantindo propriedades mecânicas adequadas para o duto curvado.

Riagusoff et al (2010) investigaram, através da utilização do método dos elementos finitos, a modelagem e análise de tubulações submetidas a curvatura pelo processo a frio. O estudo focou em compreender as implicações desse processo, particularmente no que se refere à ovalização e ao aparecimento de ondulações locais. Para isso, foram empregados modelos tanto analíticos quanto numéricos, visando analisar a distribuição de tensões e deformações. Os resultados da pesquisa revelaram a presença de elevadas tensões residuais e áreas com deformações intensificadas, nas quais as ondulações se manifestam.

Shou e Huang (2020) analisam o dano causado pela corrosão em dutos subterrâneos. Utilizando o *software* de análise numérica Abaqus, o estudo simula dutos subterrâneos retos e curvos com defeitos de corrosão. Após a validação com modelos físicos em escala reduzida em laboratório, os modelos numéricos são aplicados para analisar o comportamento mecânico desses dutos. Um método de reabilitação de duto é avaliado, o CIPP (tubo curado no local). Os resultados indicam que o método CIPP pode reforçar tubulações danificadas, reduzindo a concentração de tensões e o deslocamento diferencial próximos às cavidades de corrosão.

Nepomuceno (2023) analisa como defeitos de corrosão internos afetam a pressão de falha em dutos curvos e retos, com foco na influência de parâmetros geométricos específicos. Utilizando modelagem por MEF com o *software* Pipeflaw, a pesquisa identificou que a profundidade do defeito é o parâmetro mais relevante para a previsão da pressão de falha. Após extensivas simulações e análises, foram propostos novos fatores, denominados Fatores de Nepo (NF), que melhoraram significativamente a precisão das previsões quando comparados ao tradicional Coeficiente de Lo-

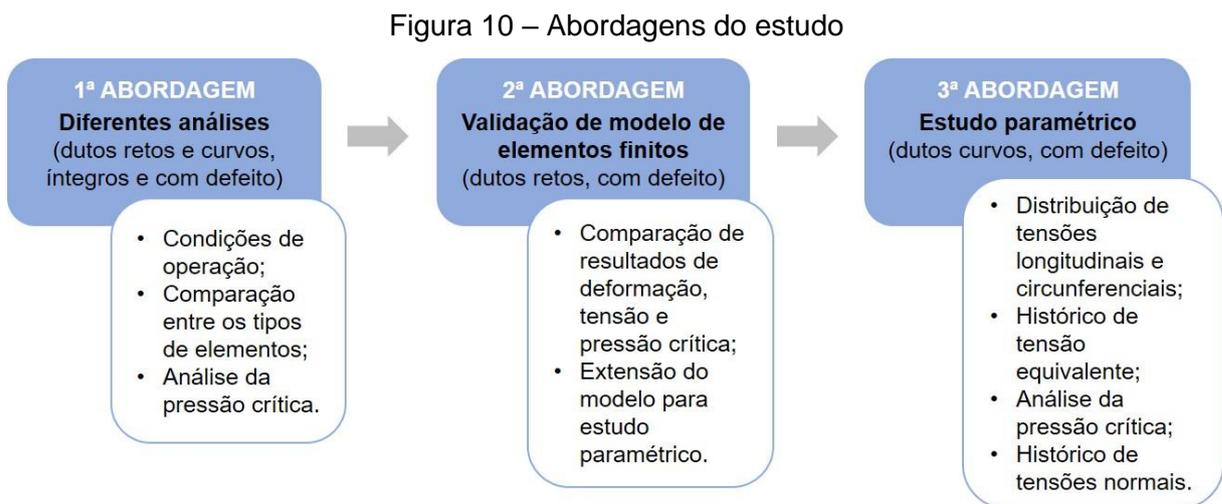
renz (LC), reduzindo o erro de previsão para valores inferiores aos anteriormente reportados. O estudo sugere que um foco na profundidade do defeito pode aprimorar consideravelmente as estimativas de resistência de dutos corroídos.

Levando isso em consideração, nota-se que, embora existam diversos estudos focados nos defeitos de amassamento em dutos, estes se limitam às seções retas. O presente trabalho estende essa investigação para seções curvas, observando que, apesar da existência de pesquisas voltadas a dutos curvos, estas frequentemente abordam aspectos diferentes e, mesmo quando focam na análise de defeitos, não analisam especificamente amassamentos. Dessa forma, este estudo propõe uma abordagem inovadora ao analisar defeitos de amassamento em seções curvas de dutos.

3 METODOLOGIA

Na presente seção, será exposta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, detalhando todo o procedimento computacional adotado nas diferentes análises. Todas as análises foram realizadas usando o método dos elementos finitos. Para geração dos defeitos nos dutos, foi utilizado um punção esférico como indentedor. Quanto à classificação dos defeitos, todos são identificados como moças irretitas e com vinco, caracterizando-se pelo afastamento do punção do duto e apresentam mudança na seção transversal.

Com o intuito de proporcionar uma compreensão mais clara do que foi realizado, tanto a metodologia quanto os resultados a serem apresentados foram subdivididos em três abordagens principais, conforme ilustrado na Figura 10.



Fonte: O autor (2024)

Partindo disto, todo o procedimento computacional, para geração do modelo numérico e simulação de todos as abordagens envolveu a utilização do *software* Ansys, incluindo três de suas interfaces: Ansys Workbench, Ansys Space Claim e Ansys Mechanical. A primeira interface gerencia as interfaces subsequentes, permitindo a configuração do material a ser utilizado e a definição do tipo de análise. A segunda interface permite a modelagem 3D da geometria necessária. Na terceira interface, realiza-se a configuração da malha, a inserção de condições de contorno, configuração de contato e a execução de simulações para análise dos resultados.

As simulações realizadas na 1ª abordagem foram modeladas usando a versão estudante do ANSYS 2022-R2, em um computador com 8 GB de memória RAM e processador Intel Core i7 de até 2.9 GHz. Para a 2ª e 3ª abordagens, foi utilizada a versão do ANSYS 2020-R1, executada em um computador com 18 GB de memória RAM e processador Intel Core i5 de até 2.8 GHz.

3.1 1ª ABORDAGEM: ANÁLISE DE DUTOS RETOS E CURVOS, ÍNTEGROS E COM DEFEITO

3.1.1 Tipo de análise e especificações do material para 1ª abordagem

O tipo de análise definida para o estudo é a estrutural estática, levando em consideração grandes deformações e a não linearidade do material. Essa abordagem possibilita a determinação dos deslocamentos, das forças estruturais, das tensões e das deformações a serem analisadas.

As especificações do material empregado em todas as análises estão de acordo com modelo de duto estudado no trabalho de Pimentel (2014). Trata-se de um aço estrutural cujo os parâmetros estão mostrados na Tabela 1, seguindo dos valores da curva tensão vs deformação mostrados na Tabela 2.

Tabela 1 – Propriedades do material para 1ª abordagem

| | |
|---|-------------|
| Módulo de Elasticidade (E) | 205.966 MPa |
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0,3 |
| Tensão de Escoamento (σ_{esc}) | 359 MPa |
| Tensão Última Verdadeira (σ_{rup}) | 472,94 MPa |

Fonte: Adaptado de Pimentel (2014)

Tabela 2 – Pontos da curva tensão vs. deformação para 1ª abordagem

| Deformação (m m ⁻¹) | Tensão (MPa) |
|---------------------------------|--------------|
| 0,001743 | 359 |
| 0,009085 | 390 |
| 0,019432 | 425 |
| 0,045966 | 465 |
| 0,099845 | 472,94 |

0,199691

472,94

Fonte: Adaptado de Pimentel (2014)

Na interface Workbench, foi criado um novo material, diferente do aço estrutural padrão do *software*. Os dados de entrada específicos do material foram alimentados através das informações de elasticidade isotrópica, tensão de escoamento, tensão última e endurecimento isotrópico multilinear. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de descrever o comportamento plástico do material que compõe o modelo desejado. A definição do uso do novo material ocorreu na interface Mechanical. Nesse ponto, além de estabelecer o material da estrutura, foi definido o comportamento de rigidez, sendo flexível para os dutos e rígido para os indentadores. Essa escolha foi feita através da seleção entre as opções descritas no *software*.

3.1.2 Modelagem da geometria e tipo de elemento para 1ª abordagem

Nesta abordagem, os dados da geometria do modelo do duto também seguem as dimensões do modelo de duto de Pimentel (2014), mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões da geometria do duto para 1ª abordagem

| Diâmetro Externo (mm) | Espessura (mm) | Comprimento (mm) |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 547,6 | 8,1 | 1.500 |

Fonte: Adaptado de Pimentel (2014)

As dimensões utilizadas englobaram os casos de dutos retos e curvos, sendo que para o modelo de duto curvo considerou-se uma curvatura de 90°. Visando reduzir o esforço computacional durante as simulações, as geometrias foram modeladas considerando a simetria do duto. Para o duto reto, foram aplicadas condições de dupla simetria, resultando na modelagem de 1/4 do duto. Já para o duto curvo, foi adotada uma única simetria, levando à modelagem de 1/2 do duto.

Quanto à geometria do indentador, optou-se por um punção esférico com diâmetro equivalente a 40 % do diâmetro externo do duto, conforme adotado nos estudos de Nogueira (2014) e Araújo (2015). Com o objetivo de entender a influência do tamanho do punção, também foi modelado um punção menor, com diâmetro equivalente a 1/3 do diâmetro do punção anterior (13,333 % do diâmetro externo do duto).

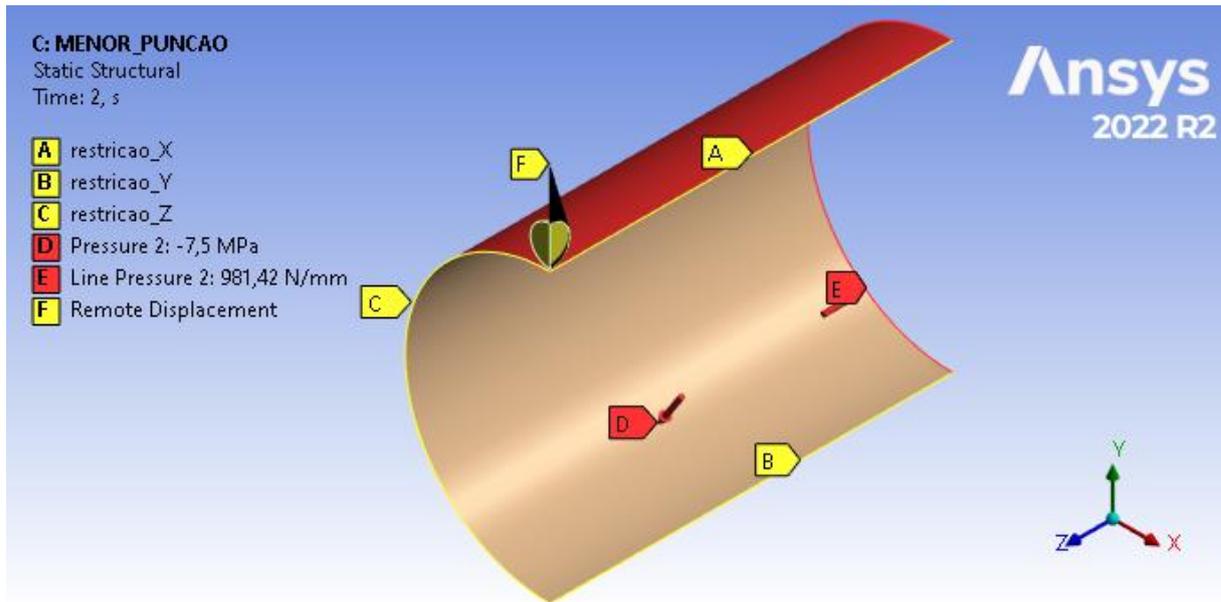
Para criar a geometria, tanto elementos de casca bidimensional quanto elementos sólidos foram utilizados na modelagem do duto. Foram adotados elementos *shell* 181, que possuem 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, para as análises do presente estudo. Esses elementos oferecem maior economia computacional devido ao processo de discretização que reduz o número de nós e são indicados para análises de grandes deformações não lineares. No entanto, com o intuito de comparar os tipos de elementos e determinar se os elementos *shell* 181 poderiam ser adotados com confiança nas análises de tensão do estudo, foi realizada uma simulação utilizando elementos *solid* 187, que possuem 10 nós e 3 graus de liberdade por nó. Foram adotados 4 elementos na espessura do duto na região do defeito para confrontar os resultados por meio de uma análise de convergência de malha, buscando obter resultados mais acurados em termos da tensão máxima equivalente.

3.1.3 Configurações de malha, condições de contorno e configurações de contato para a 1ª abordagem

Quanto a configuração da malha, buscou-se estabelecer uma malha estruturada, implementando um controle de refinamento local nas regiões sujeitas aos maiores valores de tensão. Para isto, foram considerados elementos quadráticos. Para garantir um refinamento adequado em todos os casos, a malha foi gerada utilizando o modo de configuração auto adaptativa, com 3 loops de refinamento máximo e 3 de profundidade de refinamento. Esse procedimento foi seguido por uma análise de convergência, visando gerar resultados acurados.

Foram estabelecidas as mesmas condições de contorno e pressão interna para análise dos diferentes casos. Essas condições seguem o que foi adotado no estudo de Araújo (2015), conforme ilustrado na Figura 11. Nesta figura, é possível visualizar as condições de simetria, estabelecidas pelo deslocamento nulo para eixo X (A) e para eixo Z (C), a condição para evitar movimento do corpo rígido estabelecida no eixo Y pela restrição (B), pressão na face interna do duto (D), a pressão de linha axial no eixo Z negativo (E) e condição de deslocamento remoto do indentador com 60 mm no eixo Y negativo, enquanto os demais deslocamentos e rotações permanecem nulos (F).

Figura 11 – Condições de contorno para a 1ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

Nos casos dos dutos curvos, as condições adotadas permanecem consistentes. Contudo, é estabelecida uma única condição de simetria (no eixo Y para os curvos), restrições são aplicadas em ambas as extremidades, e o deslocamento do indentedor, apesar de manter a mesma magnitude, será diferente em relação a posição dos eixos em cada um dos casos.

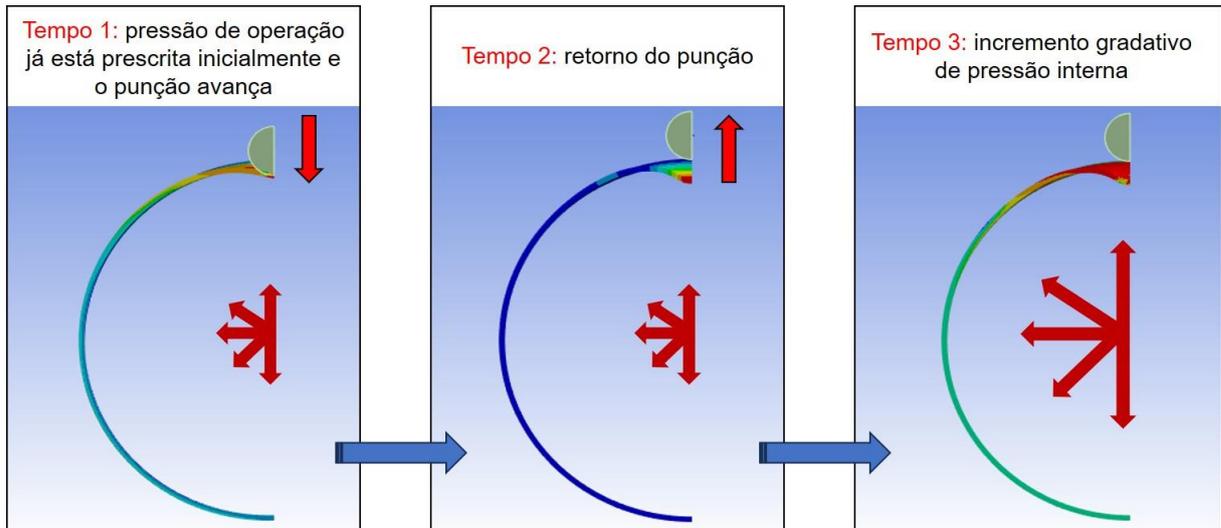
A pressão de linha axial (PI) representa um esforço de tração nas extremidades, que diz respeito a força que a pressão interna causaria na tampa do duto, e é calculada através da Equação (1) (Araújo, 2015).

$$Pl = \frac{P_i \pi r_i^2}{2 \pi r_m} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde P_i refere-se a pressão interna no duto, r_i ao raio interno e r_m ao raio médio.

Os passos das simulações são definidos por meio de intervalos de tempo no *software*. O procedimento adotado para cada intervalo de tempo nesta primeira abordagem pode ser visualizado na ilustração da Figura 12.

Figura 12 – Procedimento de amassamento e pressurização da 1ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

Para as primeiras análises, são estabelecidas as condições de operação adotando dois tempos, onde inicialmente já é adotada a pressão de operação de 7,5 MPa com a respectiva pressão axial calculada, e é prescrito o deslocamento do punção de 60 mm. No segundo instante de tempo, ocorre o recuo do punção, enquanto a pressão interna é mantida. Os defeitos de amassamento são gerados sob estas condições para todos os casos estudados nesta primeira abordagem.

Em seguida, a pressão é incrementada visando obter a pressão crítica para cada caso. A partir do terceiro intervalo de tempo, são definidos valores crescentes para a pressão interna, juntamente com a respectiva pressão axial, até que a simulação seja interrompida ao atingir uma condição crítica. Isso permite a identificação do tempo da pressão interna de falha, pois é possível captar a pressão que atua em cada instante. O critério de falha adotado nessas análises é o aumento gradual da pressão interna até que a tensão em um determinado ponto alcance o limite de ruptura nos casos de dutos com defeitos ou o limite de escoamento nos casos de dutos íntegros.

Na configuração da análise de contato, a região de contato estabelecida foi a superfície do duto, enquanto a região de alvo foi definida na superfície do punção, adotando um deslocamento prescrito de 60 mm para ambos os tamanhos do punção. O tipo de contato considerado foi o unilateral padrão sem atrito. Optou-se por um comportamento assimétrico, uma vez que os corpos não possuem as mesmas características de rigidez, trata-se de um contato entre um material rígido e outro flexível. A formulação escolhida para a análise de contato foi a Lagrangeana aumentada, pois

geralmente apresenta melhor condicionamento e é menos sensível à magnitude do coeficiente de rigidez de contato (Manual de Instruções do Usuário, 2020). As demais configurações permaneceram por conta do controle automático do *software*.

A análise dos resultados nesta 1ª abordagem leva em consideração as tensões equivalentes (von Mises) e deformação total do duto para cada caso. Para gerar os resultados, o módulo de grandes deformações do ANSYS esteve ativado, permitindo que o *software* realizasse uma análise não linear e mostrasse, em proporção verdadeira, a deformação sofrida. Dessa forma, foi possível avaliar e estabelecer uma compreensão do estudo em termos de tensões e deformações.

3.2 2ª ABORDAGEM: VALIDAÇÃO DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

3.2.1 Reprodução do modelo de Shuai et al. (2018)

A validação do modelo de elementos finitos apoiou-se na reprodução de modelos já consolidados e validados na literatura. Para isso, foi adotada como referência a pesquisa conduzida por Shuai et al. (2018), que investigou a resposta de deformação de um duto com defeito de amassamento submetido a um aumento contínuo de pressão interna. Realizou-se um teste experimental de ruptura em escala real, e uma modelagem através do método de elementos finitos foi utilizada para comparar os resultados numéricos com os experimentais neste estudo. Diante disto, para verificar o modelo de elementos finitos, o presente estudo reproduziu o modelo validado nesta literatura.

Shuai et al. (2018) detalham a metodologia empregada nas análises, a qual envolveu um experimento de pressurização em escala real (Figura 13) de uma seção de duto reto com 7.466 mm de comprimento, diâmetro externo de 720 mm e espessura da parede de 8,1 mm. As demais especificações e propriedades do material estão apresentadas na Tabela 4. Para viabilizar o experimento, o duto foi selado nas extremidades; dado que o comprimento é mais de 10 vezes o diâmetro, essa medida foi suficiente para eliminar o efeito de enrijecimento das duas tampas no comportamento da deformação.

Figura 13 – Duto amassado utilizado no ensaio de pressurização



Fonte: Shuai et al. (2018)

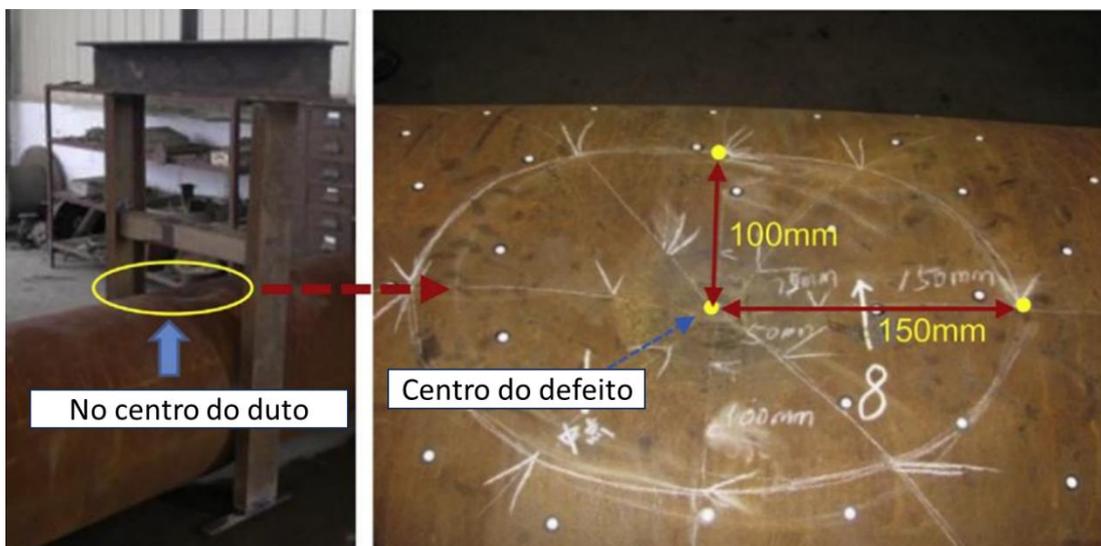
Tabela 4 – Propriedades dos materiais e dimensões do duto da 2ª abordagem

| Classificação | D/mm | t/mm | L/mm | E/GPa | ν | σ_y /MPa | σ_b /MPa |
|---------------|------|------|------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| API 5L X52 | 720 | 8.1 | 7466 | 208 | 0.3 | 375 | 468 |

Fonte: Adaptado de Shuai et al. (2018)

A mocha foi gerada por um indentador esférico rígido (Figura 14), com 100 mm de diâmetro e um deslocamento predeterminado de 67 mm. Após a geração do defeito, foi aplicada uma pressão interna até que o duto atingisse a ruptura.

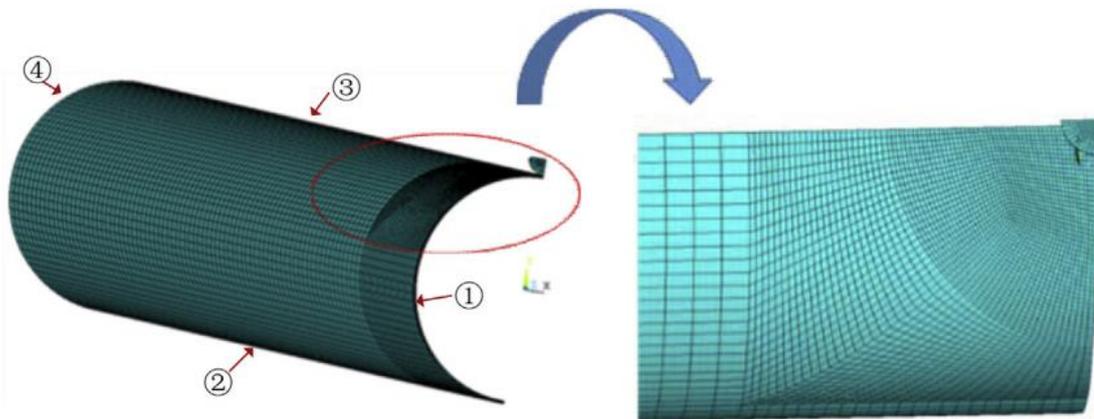
Figura 14 – Forma da mocha pré-fabricada e pós-fabricada



Fonte: Shuai et al. (2018)

Posteriormente, Shuai et al. (2018) desenvolveram o modelo de elementos finitos utilizando o *software* Ansys, mantendo todas as especificações do material e geometria em conformidade com o modelo real utilizado no teste experimental. A malha é composta por elementos isoparamétricos hexaédricos, com refinamento na região próxima ao defeito, conforme ilustrado na Figura 15. As condições de contorno e carregamento do duto incluem simetria de 1/4, restrição para evitar o movimento de corpo rígido, aplicação de pressão na superfície interna do duto e carga de tração axial na superfície oposta ao defeito, reproduzindo assim o efeito da tampa.

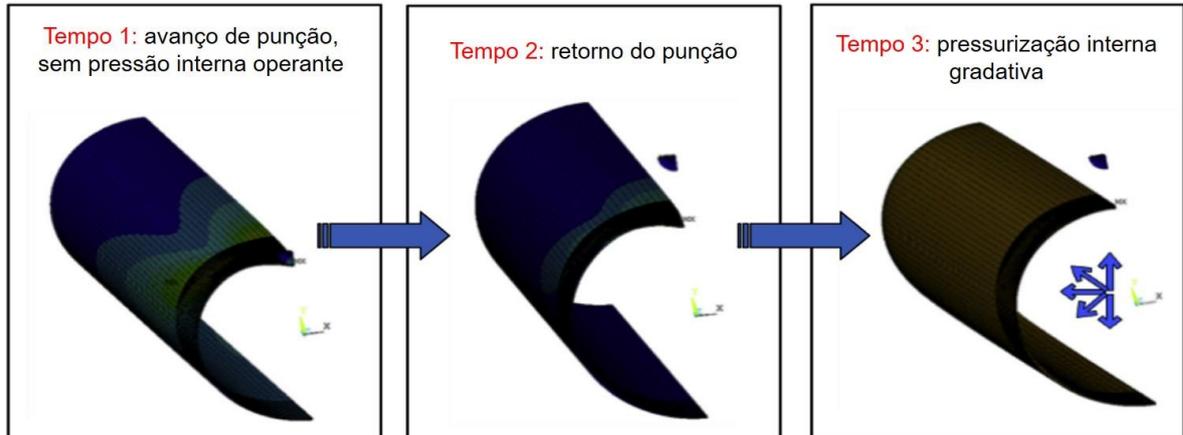
Figura 15 – Malha do modelo de elementos finitos



Fonte: Shuai et al. (2018)

O material utilizado é elastoplástico, com endurecimento isotrópico. Essa característica é incorporada por meio da inserção de dados provenientes da curva tensão-deformação verdadeira, adotando o modelo de Ramberg-Osgood, o qual foi obtido através de ensaios de tração uniaxial realizados em amostras do material. O procedimento de amassamento e pressurização seguiu as mesmas etapas do teste experimental, as quais estão ilustradas na Figura 16. Inicialmente, o indentador foi movido verticalmente com um deslocamento predefinido de 67 mm. Em seguida, o indentador foi afastado do duto a uma altura suficiente para garantir que não entrasse novamente em contato durante o processo de pressurização. Por fim, o duto foi pressurizado gradativamente, aplicando uma pressão uniforme em toda a superfície interna e uma carga axial devidamente calculada. É importante ressaltar que, como trata-se de um defeito irrestrito, é levado em conta a recuperação elástica após o retorno do punção.

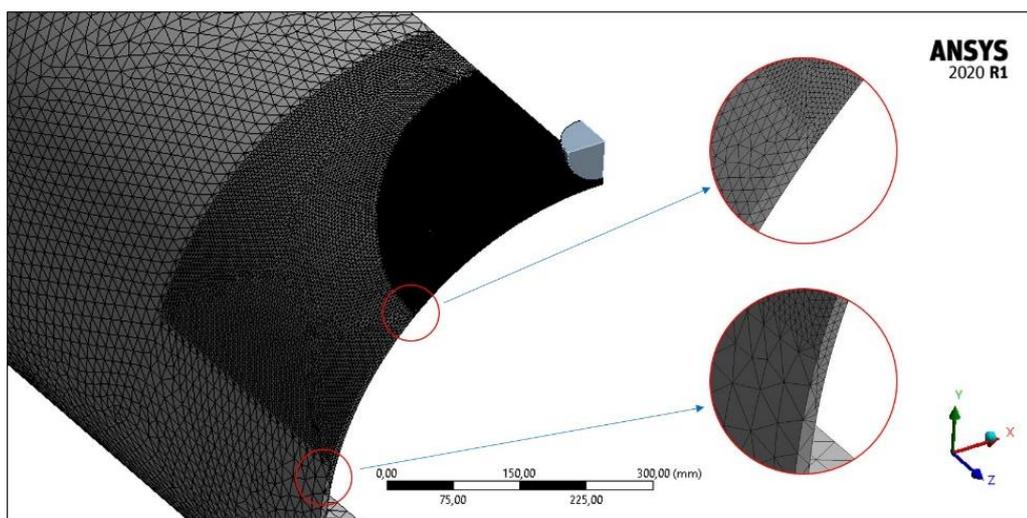
Figura 16 – Procedimento de amassamento e pressurização da 2ª abordagem



Fonte: Adaptado de Shuai et al. (2018)

Com base nisso, o modelo de elementos finitos foi criado, esperando ser equivalente ao da literatura, mantendo as mesmas especificações do duto e propriedades do material. A malha de elementos finitos foi constituída por elementos do tipo *solid 187*, assim como o da 1ª abordagem. A malha foi refinada adequadamente nas proximidades do defeito, por estudos de convergência de malha, com elementos de 2 mm na região da moosa, e de 5 mm e 20 mm fora da região da moosa, seguindo estudos de convergência de malha. A malha de elementos finitos gerada é apresentada na Figura 17.

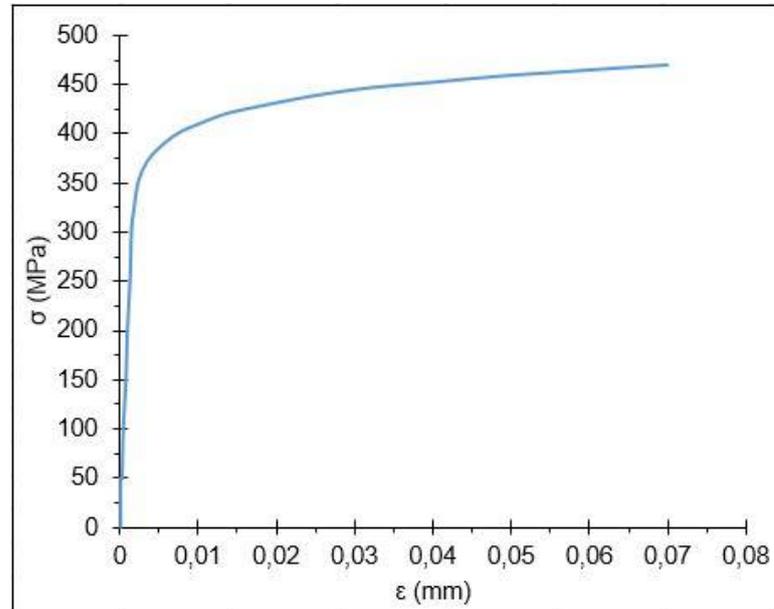
Figura 17 – Malha de elementos finitos com elementos *solid 187*



Fonte: O autor (2024)

Os dados da curva tensão-deformação verdadeira do material foram replicados, sendo extraídos de maneira aproximada da curva fornecida pelo autor (Figura 6).

Gráfico 2 – Curva tensão vs deformação do aço API 5L X52 da 2ª abordagem



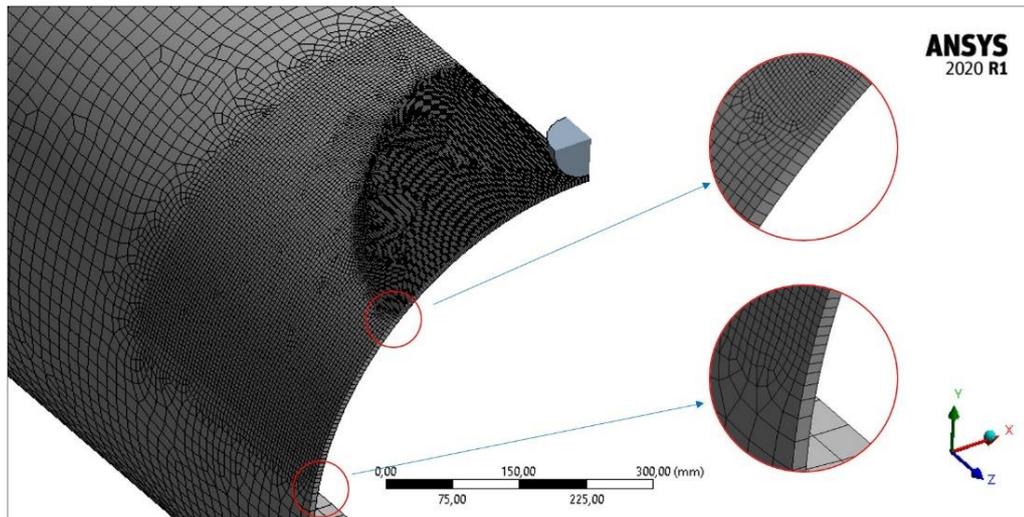
Fonte: Adaptado de Shuai et al. (2018)

O mesmo procedimento computacional adotado pela literatura de referência, passo a passo, foi seguido, conforme ilustrado na Figura 16, com prescrição por intervalo de tempo. Quanto às configurações das análises de contato, foram adotadas as mesmas especificações expostas na 1ª abordagem.

3.2.2 Extensão do modelo FE validado

Visando ampliar o modelo para o estudo paramétrico, realizou-se uma simulação adotando uma nova malha de elementos finitos, a qual pode ser vista na Figura 18, utilizando elementos do tipo *shell* 181. Como citado na 1ª abordagem, esses elementos possuem 4 nós e 6 graus de liberdade em cada nó, demandam menor esforço computacional comparado a elementos sólidos e podem ser adequados para aplicações não lineares de grande deformação.

Figura 18 – Malha de elementos finitos com elementos *shell* 181



Fonte: O autor (2024)

Posteriormente, foi conduzida uma simulação utilizando o material API 5L X80. De acordo com API (2018), esse material possui um limite de escoamento mais elevado em comparação ao X52, e, ao longo dos anos, tem sido mais comumente empregado em dutos rígidos com o avanço no desenvolvimento dos aços.

Tanto os resultados comparativos que validam o modelo de elementos finitos, quanto os resultados referentes ao modelo estendido (adotando nova malha e novo material), podem ser vistos no próximo capítulo, no item 4.2.

3.3 3ª ABORDAGEM: ESTUDO PARAMÉTRICO DE DUTOS CURVOS

O estudo paramétrico concentrou-se nos casos de dutos curvos, considerando a variação dos seguintes parâmetros: curvatura do duto, posição do amassamento em relação a curvatura e avanço do indentador responsável pela geração do amassamento.

3.3.1 Tipo de análise e especificações do material para 3ª abordagem

O tipo de análise definida para o estudo é a estrutural estática, assim como as análises da 1ª e 2ª abordagem.

As especificações do material a ser adotado em todas as análises seguem o modelo de duto estudado no trabalho de Huang e Zhang (2021). O tipo de material é

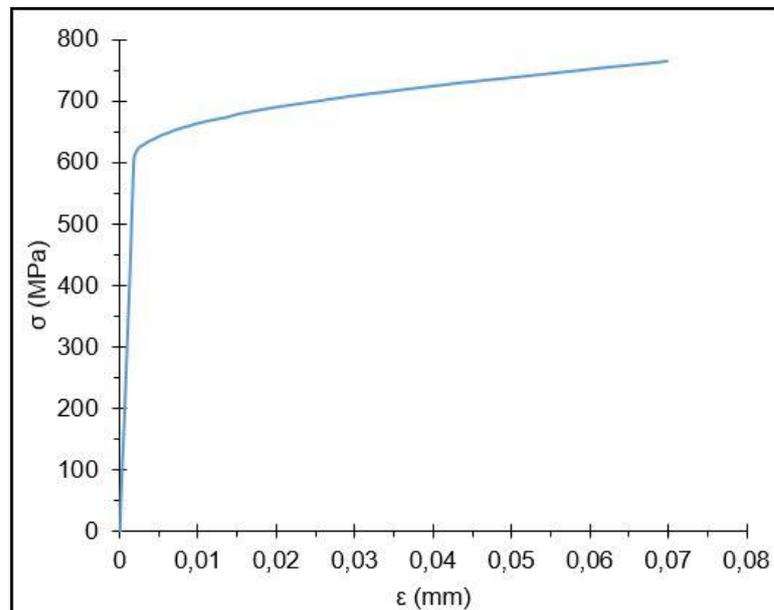
o API 5L X80, cujos valores da tensão de escoamento são da ordem de 80 ksi (551,58 MPa), um aço estrutural cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 5, adotando a curva tensão-deformação mostrada no Gráfico 3.

Tabela 5 – Propriedades do aço API 5L X80 adotado na 3ª abordagem

| Parâmetros do aço para dutos | Valor |
|--------------------------------|---------|
| Classificação | X80 |
| Módulo de Elasticidade (MPa) | 208.000 |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| Tensão de Escoamento (MPa) | 629 |
| Tensão Última Verdadeira (MPa) | 764 |

Fonte: Adaptado de Huang e Zhang (2021)

Gráfico 3 – Curva tensão vs deformação do aço API 5L X80 da 3ª abordagem



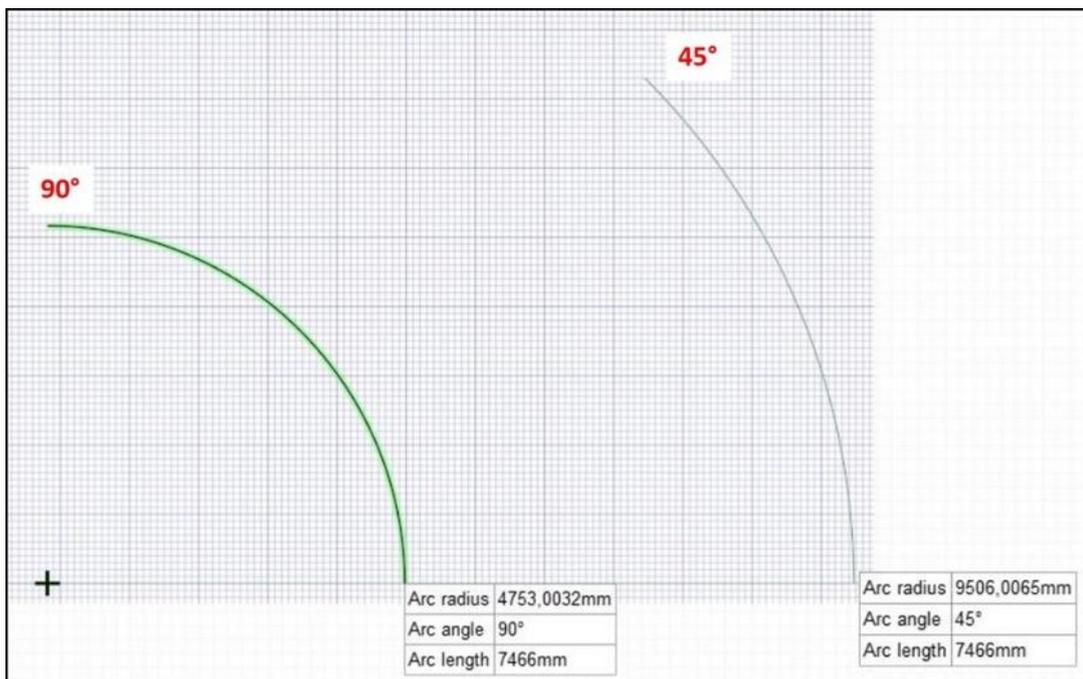
Fonte: Adaptado de Huang e Zhang (2021)

A criação do novo material na interface Workbench do *software* e sua seleção na interface Mechanical seguiram conforme explicado e aplicado na 1ª abordagem.

3.3.2 Modelagem da geometria e tipo de elemento para 3ª abordagem

Nesta abordagem, os dados da geometria do duto seguem o modelo validado, conforme especificações de Shuai et al. (2018), já apresentados na Tabela 4. Essas dimensões foram estendidas para os casos das modelagens de dutos curvos, tanto para o ângulo entre as faces de 90° quanto o ângulo de 45°. Nesse contexto, o comprimento do duto é fixo de 7.466 mm e foi definido como o perímetro do duto curvado, conforme ilustrado na Figura 19. O raio de curvatura para o ângulo de 90° é de 4.753 mm, que equivale a aproximadamente 6,6D (6,6 vezes o diâmetro nominal do duto). Já para o ângulo de 45°, o raio é de 9.506 mm, que equivale a aproximadamente 13,2D. A partir disso, a circunferência dos dutos na extremidade do arco foi desenhada com o valor do diâmetro nominal, e em seguida, aplicou-se a ferramenta de varredura do *software*, criando assim a superfície de interesse.

Figura 19 - Esboço da modelagem das curvaturas de acordo com as especificações

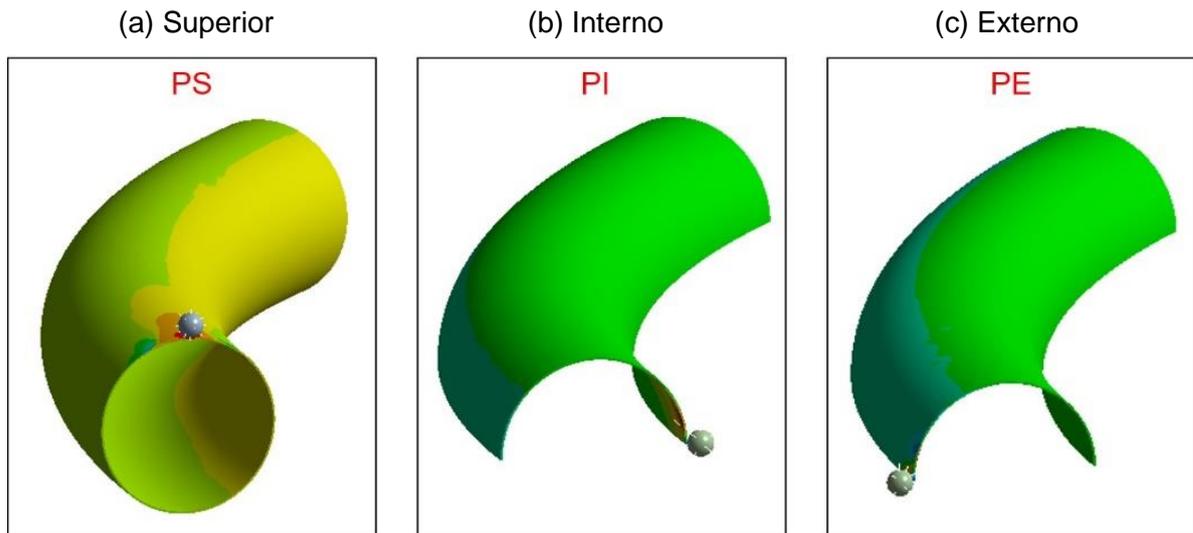


Fonte: O autor (2024)

Quanto à geometria do indentador, optou-se por um punção esférico com diâmetro de 100 mm. Tendo em vista a redução do esforço computacional durante as simulações, as geometrias dos dutos foram modeladas considerando simetria. No duto cujo defeito está localizado na posição superior, foi aplicada uma única simetria,

com a modelagem correspondente a 1/2 do duto (Figura 20 (a)). Para o defeito na posição interna, a curvatura foi modelada considerando uma dupla simetria, com a geometria representando 1/4 do duto (Figura 20 (b)). Na posição externa, foi adotada a mesma simetria usada na posição interna, representando 1/4 do duto (Figura 20 (c)).

Figura 20 – Posições do defeito em relação a curvatura



Fonte: O autor (2024)

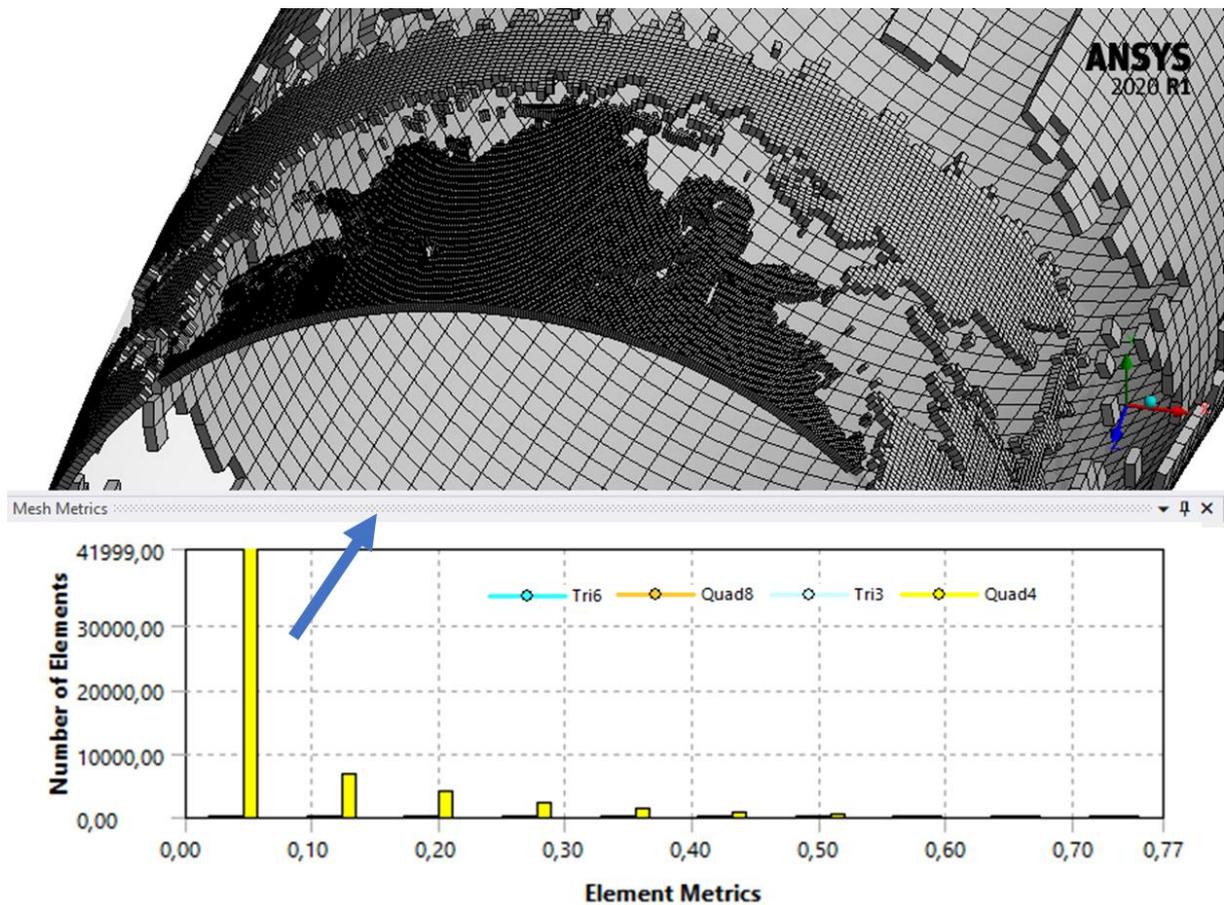
3.3.3 Configurações da malha, condições de contorno e configurações de contato para 3ª abordagem

Os elementos da malha seguem as diretrizes mencionadas na 1ª e 2ª abordagens, sendo do tipo *shell* 181. Na configuração da malha buscou refinamento local na região do defeito. Para atingir esse objetivo, a geometria foi subdividida em três partes, da mesma forma que foi subdividida na 2ª abordagem, conforme ilustrado na Figura 14. A partir do plano central do duto, paralelo ao plano do defeito, foram desenhados centralizados nos eixos de coordenadas um círculo com diâmetro de 500 mm e um quadrado de dimensão 700 x 700 mm. Em seguida, a ferramenta de projeção na superfície foi aplicada para subdividir nas regiões desejadas, formando uma única geometria que permite selecionar diferentes regiões para especificar o nível do refinamento. Para as diferentes posições do defeito, o círculo (região do defeito) teve o tamanho dos elementos especificado como 2 mm, na região do quadrado (próxima ao defeito) foi especificado o tamanho dos elementos como 5 mm, e no restante do duto

(região mais distante do defeito) o tamanho dos elementos foi especificado como 20 mm.

Para todos os casos desta 3ª abordagem, adotou-se a mesma configuração de malha, iniciando o refinamento sempre a partir do centro do defeito, independentemente de sua posição. Tanto para esta abordagem quanto para a 2ª, a malha foi refinada manualmente utilizando ferramentas do *software*. A qualidade desta malha foi analisada considerando a distribuição dos elementos a partir do gráfico de *skewness* fornecido pelo *software* (Figura 21), que representa uma das principais medidas de qualidade da malha, relacionada a distorção do elemento. Neste contexto, a *skewness* é crucial para avaliar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos por simulações de elementos finitos. Conforme Huei-Huang (2021), a solução numérica pode ser comprometida se os valores de *skewness* ultrapassarem 0,95. Quanto menor esse valor, melhor a qualidade do elemento, indicando menor distorção.

Figura 21 – Análise da qualidade da malha (*skewness*)

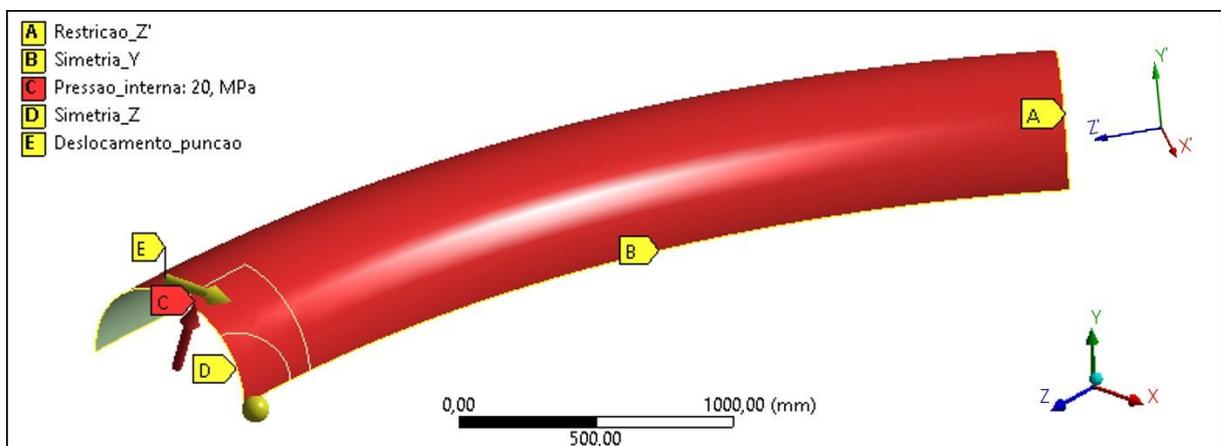


Fonte: O autor (2024)

Observando a medida de qualidade na Figura 21, é possível ver que a maioria dos elementos da malha possuem o valor entre 0 e 0,1 e nenhum ultrapassa 0,6, o que comprova a qualidade da malha.

Foram estabelecidas condições para um caso de duto curvado a quente, com a geometria curvada já pré-definida e enterrado. Isso significa que as condições de carregamento incluem a pressão interna, com restrições nas extremidades. Na Figura 22, estão apresentadas as condições de contorno e pressão interna adotadas. É possível visualizar condições de simetria para o eixo Y (B) e para o eixo Z (D), a condição para evitar o movimento do corpo rígido, estabelecida no eixo Y pela restrição (B), a condição de restrição da extremidade oposta ao defeito (A) prescrita pelo deslocamento nulo no eixo Z' de acordo com um novo sistema de coordenadas criado na face da extremidade angulada, a pressão na face interna do duto (C) e a condição de deslocamento remoto para o indentador no eixo X. Para os casos dos dutos com o defeito na posição superior, as condições adotadas são as mesmas, mas é estabelecida uma única condição de simetria (no eixo Z), e é adicionada uma condição para evitar o movimento de corpo rígido, estabelecida por um ponto restrito no eixo Y. Vale ressaltar que o sistema de coordenadas global é o mesmo para todas as simulações. Nas posições de defeito interno e externo à curvatura, o deslocamento do punção é prescrito no eixo X, enquanto para a posição superior, é prescrito no eixo Y. Para prescrever corretamente, todos os outros eixos e graus de liberdade devem ser considerados nulos.

Figura 22 – Condições de contorno para a 3ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

Os passos das simulações são prescritos por meio de intervalos de tempo no *software*. Em cada intervalo, um passo do procedimento, conforme mencionado na validação do modelo e ilustrado pela Figura 16, é especificado. As configurações de contato adotadas, para todos os casos, também foram mantidas conforme detalhadas na 1ª abordagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 1ª ABORDAGEM: ANÁLISE DE DUTOS RETOS E CURVOS, ÍNTEGROS E COM DEFEITO

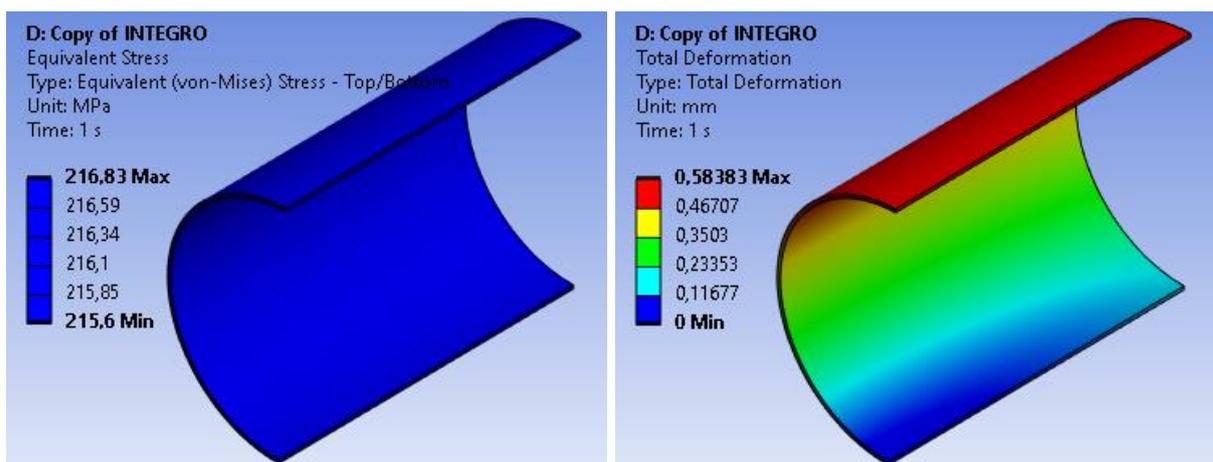
4.1.1 Condições de operação

Os primeiros resultados a serem apresentados referem-se as simulações do duto íntegro em condições de operação, considerando uma pressão interna de 7,5 MPa. Na Figura 23 está mostrado o resultado do duto reto íntegro e na Figura 24 do duto curvo íntegro.

Figura 23 - Duto reto íntegro submetido a carga de operação de 7,5 MPa

(a) Tensão equivalente

(b) Deformação total



Fonte: O autor (2024)

Figura 24 - Duto curvo íntegro submetido a carga de operação de 7,5 MPa

(a) Tensão equivalente

(b) Deformação total

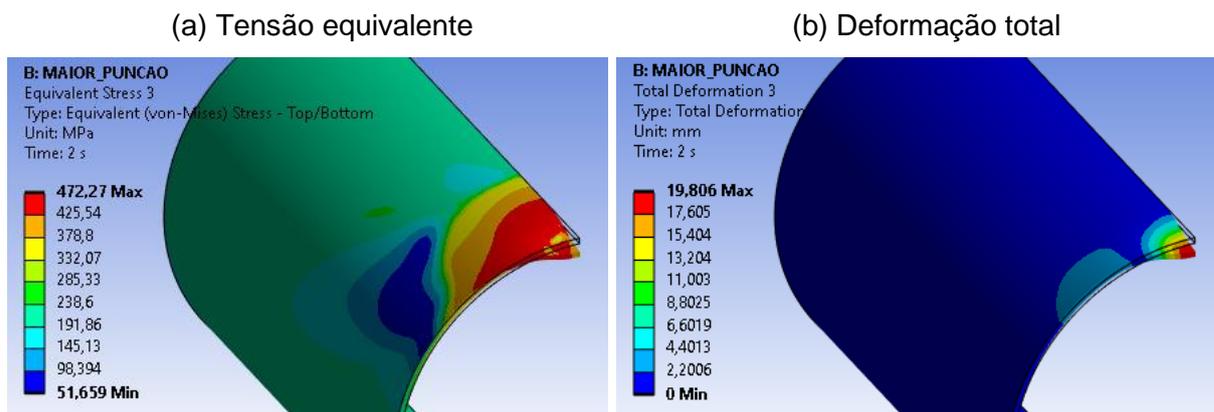


Fonte: O autor (2024)

Nestas figuras, é possível perceber que a distribuição de tensão ao longo do duto reto íntegro é uniforme, registrando 216,83 MPa, enquanto no duto curvo íntegro, a tensão máxima de 279,43 MPa ocorre na parte interna da curvatura, apresentando níveis de tensão mais elevados que o duto reto. Para ambos os casos, o material não atinge a tensão de escoamento (359 MPa), e deslocamento máximo é inferior a 1 mm.

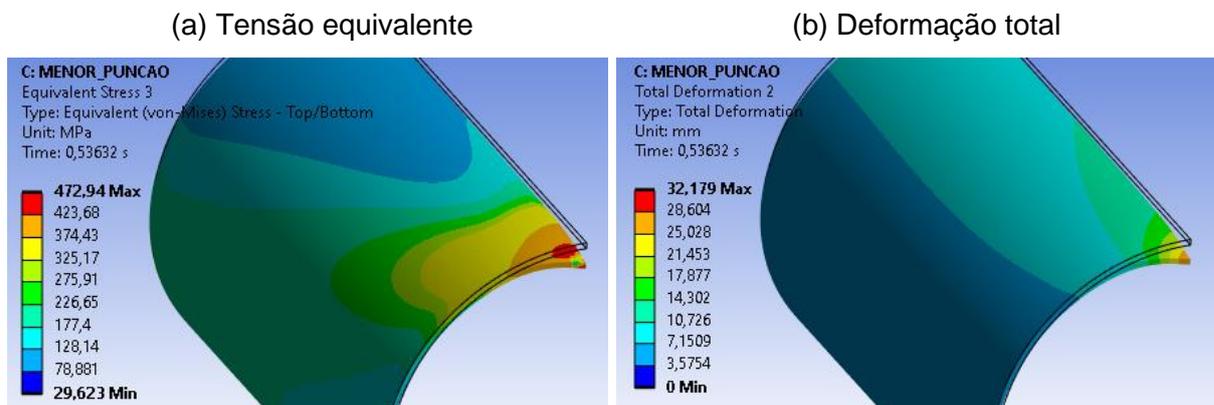
Quanto às análises de contato, nas Figuras 25 e 26 estão mostrados a distribuição de tensão de von Mises e deformação total das simulações referentes ao duto reto com defeito utilizando diferentes tamanhos de punção. Vale salientar que os resultados são plotados no instante de tempo 2 s, após o retorno do punção, então os resultados correspondem a tensão equivalente residual e a profundidade do duto após o retorno elástico.

Figura 25 - Duto reto com defeito causado com maior indentador, i.e. 40 % do diâmetro externo do duto, submetido a carga de operação de 7,5 MPa



Fonte: O autor (2024)

Figura 26 - Duto reto com defeito causado com menor indentador, i.e. 13,33 % do diâmetro externo do duto, submetido a carga de operação de 7,5 MPa

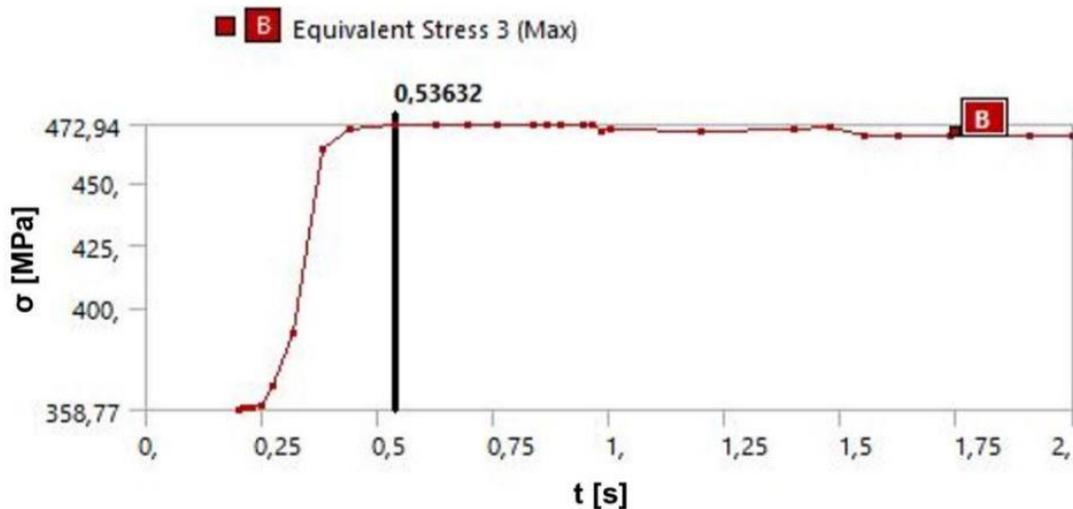


Fonte: O autor (2024)

Como esperado, a tensão máxima e deslocamento máximo em ambos os casos acontecem na mesma região, de contato com o punção. No caso do maior indentador, o duto atinge a tensão de escoamento e exibe uma deformação permanente. Nota-se que a tensão equivalente residual é bem próxima da tensão última do material, próximo da ruptura. Já para o menor indentador, antes mesmo de concluir o tempo de deslocamento total do indentador o duto atinge a tensão de ruptura do material, evidenciando a influência do tamanho do indentador.

Vale ressaltar que, para as condições de operação, no primeiro tempo da simulação, é prescrito o deslocamento do indentador e no segundo tempo o retorno. Na Figura 26 pode ser visto que antes do primeiro instante de tempo (1 s), que corresponde ao avanço total do menor indentador, a tensão de ruptura é atingida. Isso também está mostrado no Gráfico 4, que o valor da tensão é crescente até atingir o valor da tensão de escoamento.

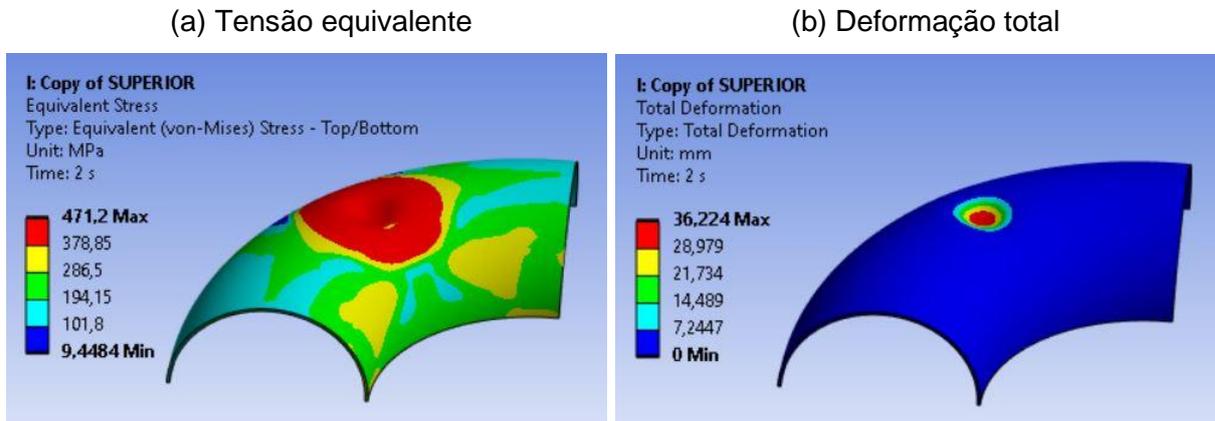
Gráfico 4 - Tensão equivalente máxima vs. tempo (reto - menor defeito)



Fonte: O autor (2024)

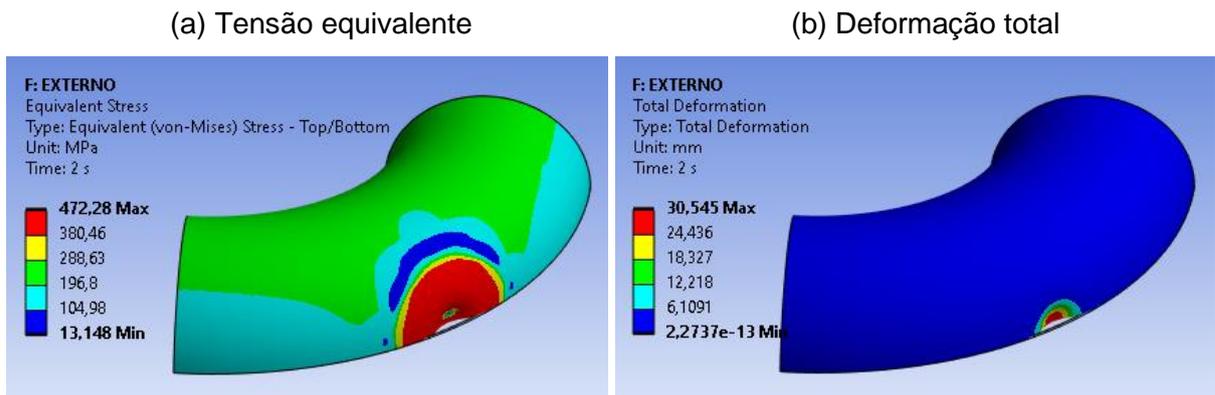
Como o duto reto atinge ruptura com o indentador de menor tamanho, para as análises do duto curvo, os defeitos são gerados apenas com indentador maior, ou seja, 40 % do diâmetro externo do duto. Na Figura 27, está mostrado o duto com defeito na posição superior a curvatura, e na Figura 28, o defeito na posição externa a curvatura.

Figura 27 - Duto curvo com defeito na posição superior a curvatura, submetido a carga de operação de 7,5 MPa



Fonte: O autor (2024)

Figura 28 - Duto curvo com defeito na posição externa a curvatura, submetido a carga de operação de 7,5 MPa

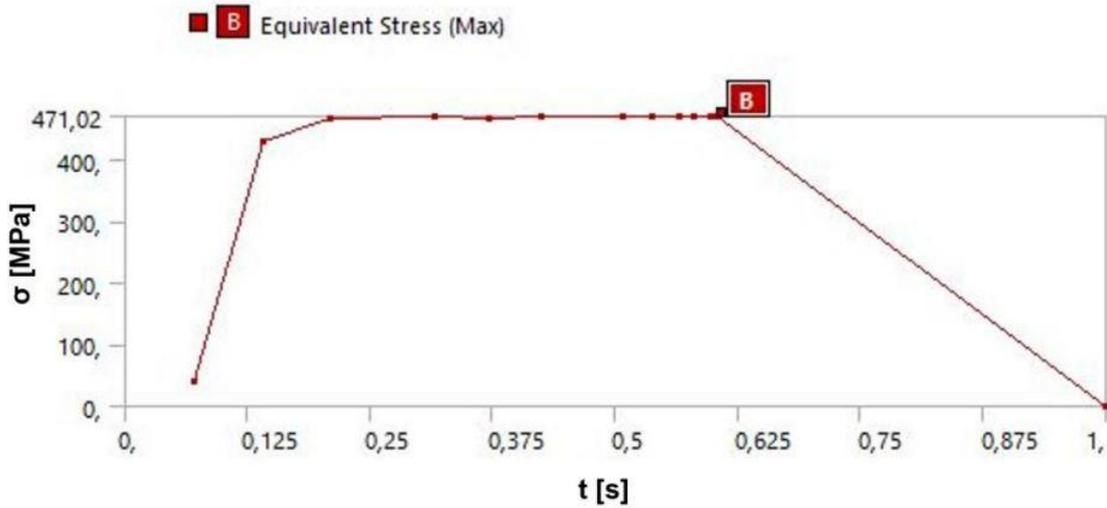


Fonte: O autor (2024)

A tensão equivalente, tanto para o caso do amassamento superior a curvatura (471,2 MPa) como na posição externa (472,28 MPa), apresenta valor máximo próximo ao que foi obtido no caso do duto reto (472,27 MPa), porém apresentam um percentual de aproximadamente 65 % de aumento da deformação após o retorno do indentador, vale ressaltar que já leva em conta a recuperação elástica do material.

E se tratando do duto curvo com defeito na curvatura interna, a simulação indica que, durante o tempo de deslocamento do indentador, o duto falha, ainda sob condições de operação. No Gráfico 6, pode ser observado o momento que ocorre a falha, a partir do instante em que a curva apresenta comportamento decrescente. Vale ressaltar o resultado obtido na simulação do duto curvo íntegro (Figura 24), onde mostra que a concentração de tensão máxima está localizada na parte interna da curvatura.

Gráfico 5 - Tensão equivalente máxima vs. tempo (curvo -defeito interno)

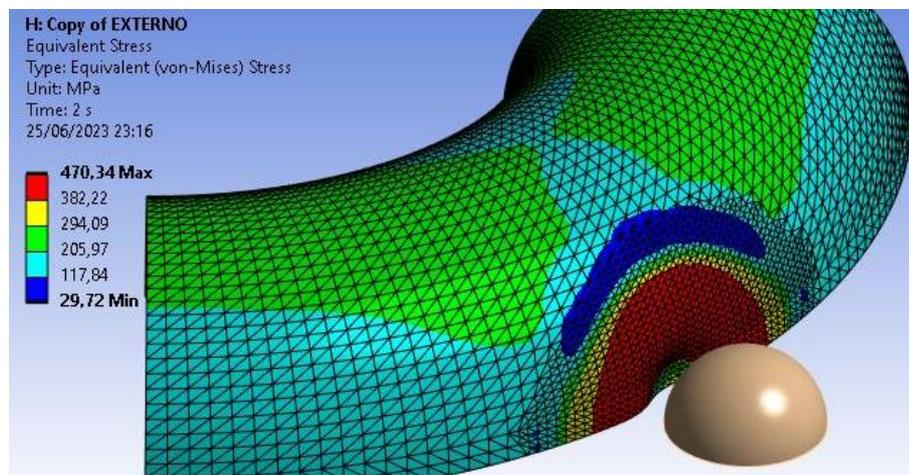


Fonte: O autor (2024)

4.1.2 Comparação entre os tipos de elementos

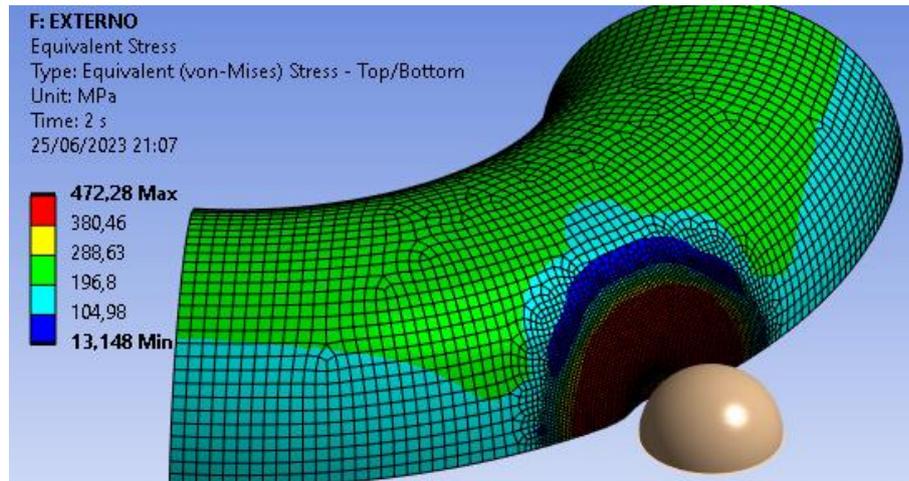
Para comparação preliminar o uso dos elementos de casca e elementos sólidos, foi realizada uma simulação da tensão equivalente para o caso do duto curvo com defeito na curvatura externa utilizando elementos sólidos (*solid 187*) tetraédricos com 4 elementos na espessura da região do defeito (Figura 29). A malha deste mesmo caso adotando elementos de casca (*shell 181*), pode ser vista na Figura 30. Na Figura 31, está mostrada a comparação do histórico de convergência da tensão equivalente máxima versus a quantidade de elementos para ambos os modelos.

Figura 29 - Duto curvo com defeito na curvatura externa utilizando elementos sólidos



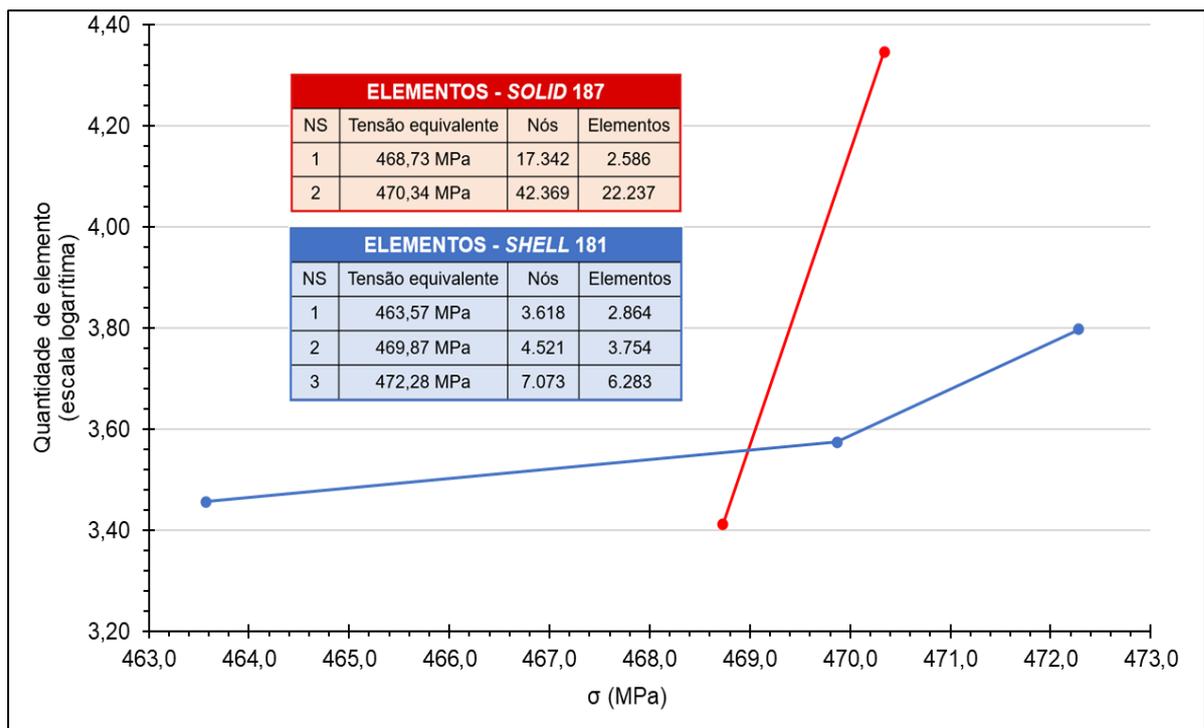
Fonte: O autor (2024)

Figura 30 - Duto curvo com defeito na curvatura externa utilizando elementos de casca



Fonte: O autor (2024)

Figura 31 – Comparação do histórico de convergência da tensão equivalente máxima utilizando elementos sólidos e elementos de casca



Fonte: O autor (2024)

Utilizando elementos sólidos, não foi possível obter convergência de malha adequada, pois excederia a quantidade limite do número de elementos que o *software* na versão estudante permite. No entanto, é possível perceber que o uso de elementos de casca requer um número bem menor de elementos para apresentar convergência.

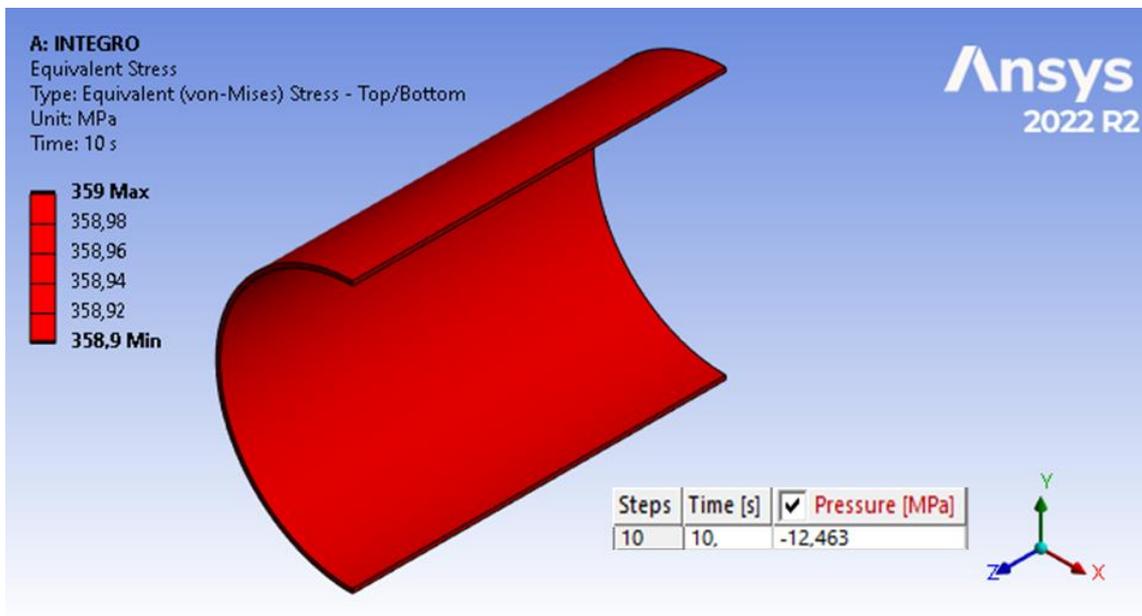
A coerência entre os resultados para os diferentes tipos de elementos mostra que, para estas análises o uso de elementos de casca foi viável.

O tempo necessário para gerar os resultados, dos casos mais refinados, da simulação com elementos sólidos foi de 11 horas e 49 minutos, enquanto para a simulação utilizando elementos de casca foi 1 hora e 25 minutos. Portanto, estima-se que em termos de tempo, as simulações com elementos sólidos demorem em torno de 8 vezes mais do que as simulações com elementos de casca para os estudos realizados.

4.1.3 Análise da pressão crítica

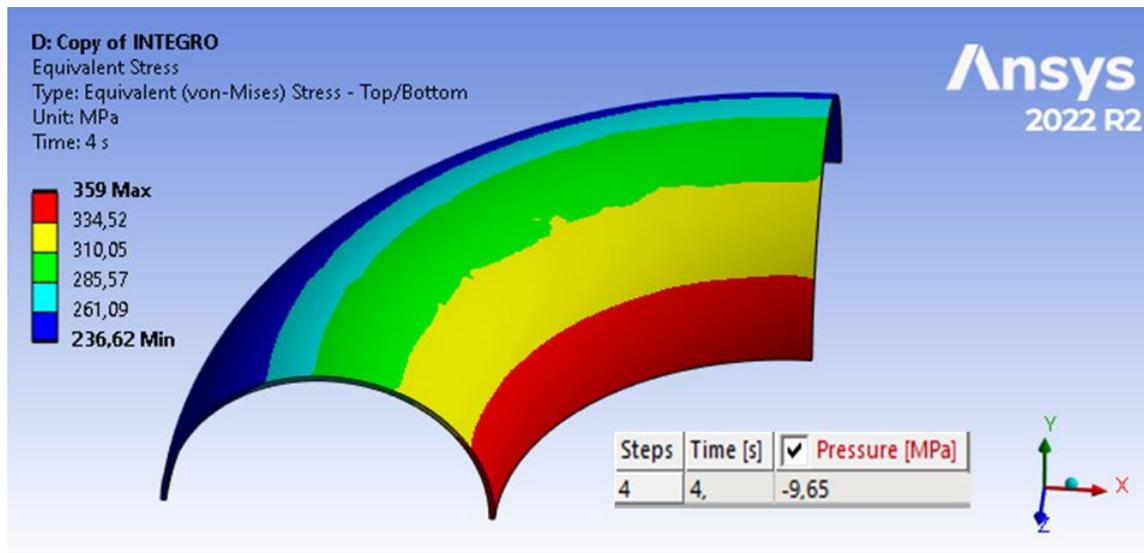
Os resultados a seguir referem-se as análises de pressão crítica a nível de escoamento para os dutos íntegros e a ruptura para os dutos com defeito, a escala adotada para visualização em todos os casos é a verdadeira. Na Figura 32, está mostrado o resultado em termos de tensão da simulação do duto reto íntegro, e na Figura 33, o duto curvo íntegro.

Figura 32 - Tensão equivalente do duto reto íntegro com incremento de pressão



Fonte: O autor (2024)

Figura 33 - Tensão equivalente do duto curvo íntegro com incremento de pressão

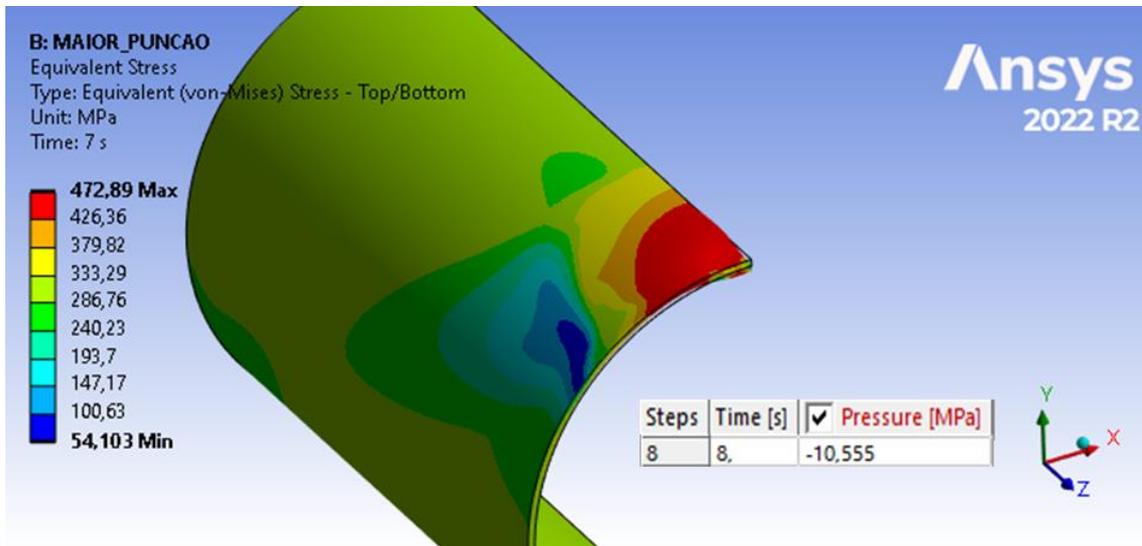


Fonte: O autor (2024)

Com o incremento gradativo da pressão interna, o duto reto íntegro atinge a tensão de escoamento com uma pressão de 12,463 MPa, apresentando coerência com estudo de Araújo (2015), que analisa este mesmo modelo de duto íntegro e através de análise analítica, obtém tensão de escoamento com a pressão pouco superior a 12 MPa. Já o duto curvo íntegro atinge a tensão de escoamento com uma pressão inferior à do duto reto, com 9,65 MPa. Ao atingir a tensão de escoamento, para os casos dos dutos íntegros, o *software* não permite maiores incrementos de pressão.

Para os casos de contato, a tensão de escoamento foi atingida durante a geração do defeito, isto explica a deformação plástica permanente após o retorno do punção. Ao incrementar a pressão interna, os dutos se comportam de modo a desfazer as mossas, mas como existem tensões residuais a tensão de ruptura é atingida. Os resultados destas simulações podem ser observados a seguir. Na Figura 34 está mostrada a tensão equivalente do duto reto com defeito causado com maior indentador.

Figura 34 - Tensão equivalente do duto reto com defeito causado com maior indentador sob incremento de pressão

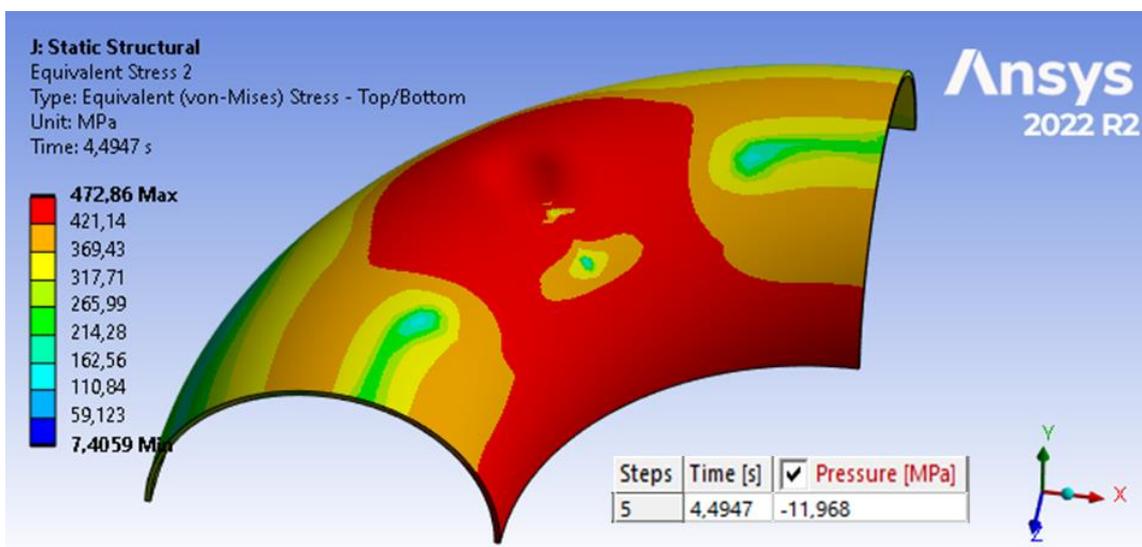


Fonte: O autor (2024)

A pressão crítica para o caso do duto reto com defeito causado com maior indentador é de 10,555 MPa, inferior a pressão para atingir a tensão de escoamento para o caso deste mesmo duto sem o defeito, foi de 12,463 MPa.

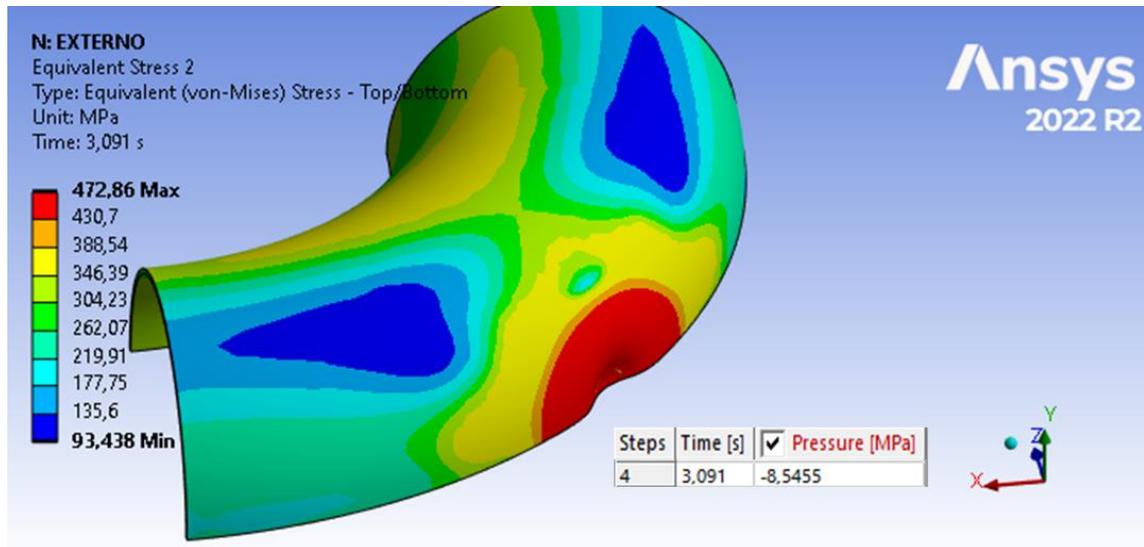
Nas Figura 35 e 36, estão mostrados os resultados das análises da pressão crítica para os casos do duto curvo com defeito.

Figura 35 - Tensão equivalente do duto curvo com defeito superior a curvatura sob incremento de pressão



Fonte: O autor (2024)

Figura 36 - Tensão equivalente do duto curvo com defeito na curvatura externa sob incremento de pressão



Fonte: O autor (2024)

A pressão crítica para o duto curvo com defeito superior a curvatura é de 11,968 MPa, maior do que o valor da pressão em que este mesmo duto íntegro atinge o escoamento, que foi 9,65 MPa. Na Figura 35, é perceptível que a região crítica se estende na região do defeito e região da curvatura interna, comportamento esperado para ruptura do duto íntegro. Já o duto com defeito na curvatura externa apresenta pressão crítica de 8,545 MPa, valor inferior a pressão para atingir a tensão de escoamento para o caso deste mesmo duto íntegro.

Como explicando anteriormente no capítulo 3, a malha de elementos finitos para esta primeira abordagem foi gerada utilizando a ferramenta de refinamento auto adaptativo, buscando a convergência para cada resultado. Assim, cada caso resultou em uma quantidade diferente de elementos na malha, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de elementos das malhas com refinamento auto adaptativo de cada caso analisado na 1ª abordagem

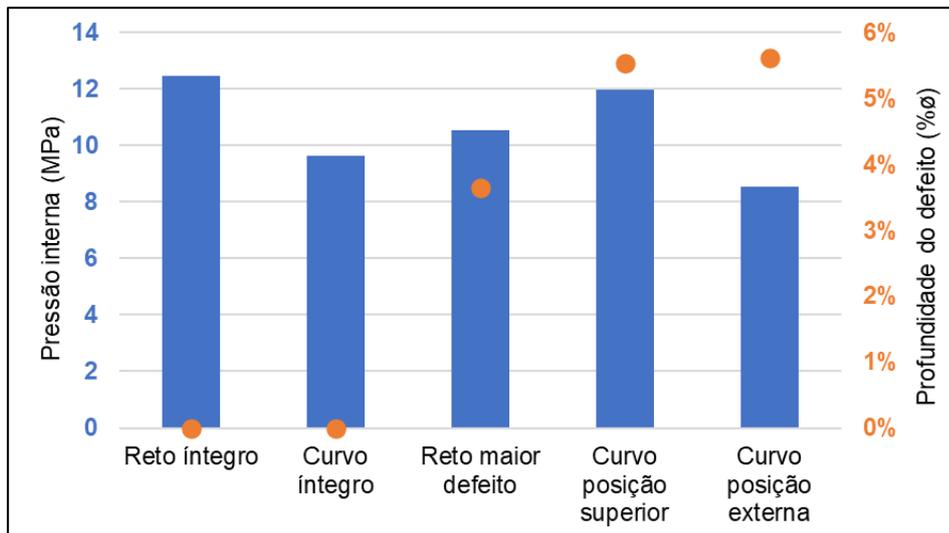
| Casos Analisados | Quantidade de Elementos |
|--------------------|-------------------------|
| Duto reto íntegro | 6.375 |
| Duto curvo íntegro | 9.768 |

| | |
|--|-------|
| Duto reto com maior defeito | 6.785 |
| Duto reto com menor defeito | 6.430 |
| Duto curvo com maior defeito na posição superior | 5.951 |
| Duto curvo com maior defeito na posição externa | 6.283 |

Fonte: O autor (2024)

Para uma melhor comparação dos resultados de pressão crítica em relação a profundidade permanente do defeito, no Gráfico 6 está apresentado estes resultados para cada um dos casos em que foi analisada a pressão crítica.

Gráfico 6 – Pressão crítica e profundidade dos defeitos dos casos da 1ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

Para interpretação do Gráfico 6, é importante lembrar que, nos casos de dutos íntegros, a pressão de falha corresponde ao momento em que o material atinge a tensão de escoamento. Por outro lado, nos casos de dutos com defeitos, a tensão de ruptura é alcançada com pressões inferiores às necessárias para que os dutos intactos atinjam a tensão de escoamento, com exceção do duto curvo com defeito na posição superior. Todos os dutos com defeitos possuem uma profundidade permanente inferior a 6%, destacando-se que os dutos curvos com defeitos são os que apresentam maior profundidade e, conseqüentemente, suportam uma pressão mais baixa. É importante ressaltar que esses casos apresentados no Gráfico 6 correspondem aos que suportaram a pressão de operação estabelecida em 7,5 MPa, e foi considerado um

acréscimo de pressão a essa pressão de operação. Assim, por exemplo, no caso do duto curvo com defeito na posição externa, um incremento de 1 MPa resulta em ruptura com uma pressão total de 8,5 MPa.

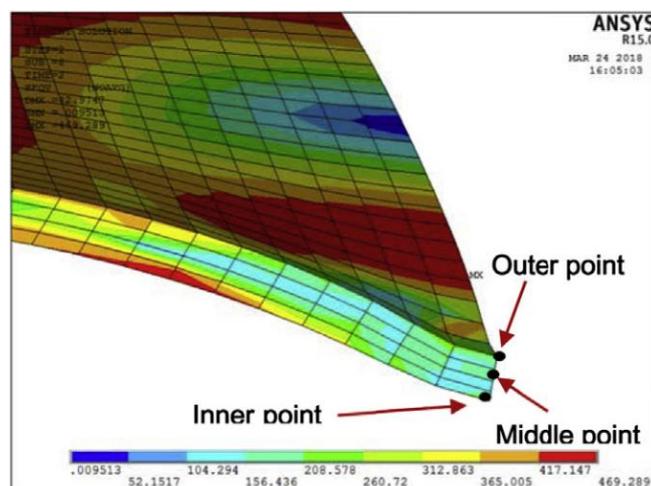
Embora a análise da pressão crítica tenha sido realizada nos casos que suportam a pressão de operação, é importante destacar que os casos envolvendo o duto com o menor punção e o duto curvo com defeito na parte interna da curvatura falharam durante o avanço do punção, não resistindo à pressão de operação. Portanto, dentre os casos analisados nesta primeira abordagem, estes são os mais susceptíveis à falha.

4.2 2ª ABORDAGEM: VALIDAÇÃO DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

4.2.1 Comparação de resultados de deformação, tensão e pressão crítica

A partir da reprodução do modelo de elementos finitos de Shuai et al. (2018), foi possível comparar o histórico da deformação plástica equivalente no centro da moosa em três pontos da espessura: ponto externo à superfície, ponto médio e ponto interno à superfície (conforme apresentado na Figura 37). Os resultados deste histórico, obtidos por Shuai et al. (2018), estão mostrados no Gráfico 7 (a), enquanto os resultados do histórico nos mesmos pontos, gerados no modelo do presente estudo, estão apresentados no Gráfico 7 (b).

Figura 37 – Pontos ao longo da espessura do centro do defeito

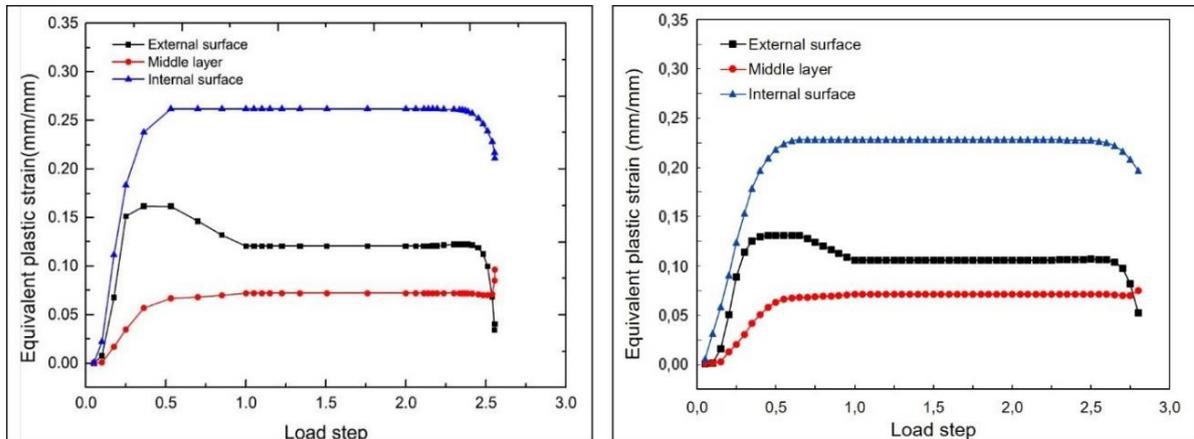


Fonte: Shuai et al. (2018)

Gráfico 7 – Variação da deformação plástica equivalente no centro do defeito

(a) Resultado de Shuai et al. (2018)

(b) Resultado do presente estudo



Fonte: (a) Shuai et al. (2018); (b) O autor (2024)

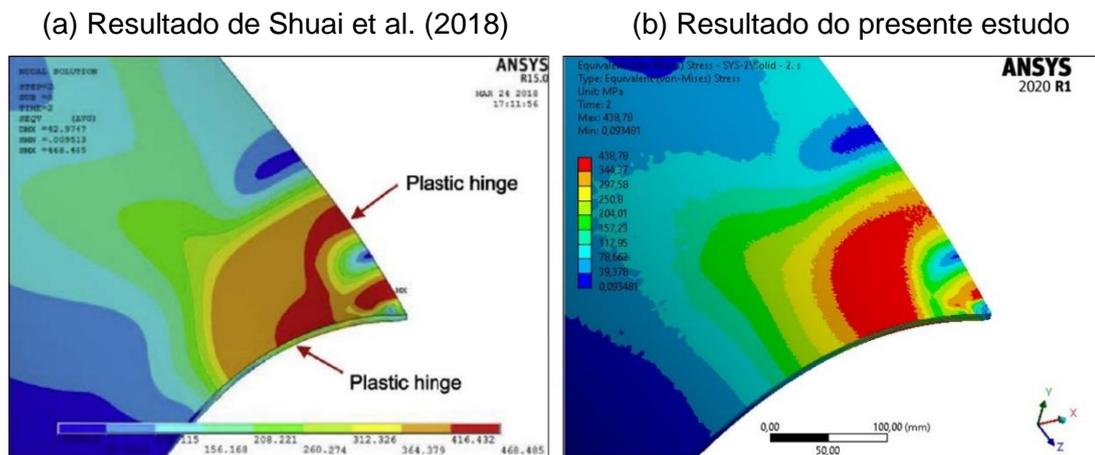
Notavelmente, a deformação equivalente plástica varia significativamente em cada um dos pontos analisados. De acordo com Shuai et al. (2018), no primeiro instante de tempo, quando o punção avança, observa-se um aumento na deformação equivalente plástica nos pontos interno e médio, estabilizando-se à medida que a profundidade da moosa aumenta. Simultaneamente, a deformação equivalente plástica no ponto externo inicialmente aumenta e, posteriormente, diminui à medida que a profundidade da moosa aumenta. Isso ocorre porque, durante o processo de indentação, a tensão na superfície externa é composta por tensão de flexão e tensão de membrana. À medida que a profundidade da moosa aumenta, a tensão de membrana também cresce, resultando em dois tipos de tensões que se compensam parcialmente, provocando a diminuição da deformação equivalente plástica.

Nos instantes em que o indentador é afastado e o duto é pressurizado, a deformação equivalente plástica permanece constante. No entanto, ao atingir a pressão de ruptura, a deformação plástica equivalente nos pontos das superfícies externa e interna diminuem rapidamente, enquanto a do ponto intermediário aumenta. Observa-se que as deformações equivalentes plásticas do modelo desenvolvido no presente estudo apresentam comportamento semelhante e valores aproximados em comparação ao modelo de referência. A diferença percentual no valor máximo do ponto interno é de $\approx 8\%$, e no ponto externo é de $\approx 13\%$, essa discrepância se deve as aproximações da malha, do material e a configuração do contato. O ponto que apresenta resultados mais distantes quantitativamente é o final das curvas, Shuai et al. (2018) não menciona o valor da pressão final que estabelece para o tempo de 3 segundos. O

valor adotado para a simulação do modelo desenvolvido foi de 12 MPa para o tempo de 3 segundos, possivelmente menor do que o valor utilizado para o modelo de referência, o que justifica o deslocamento mais para a direita no final das curvas.

Outra comparação realizada refere-se aos resultados da distribuição de tensão equivalente de von Mises na área do defeito, após a remoção do indentador e antes da pressurização do duto. O resultado de Shuai et al. (2018) está apresentado na Figura 38 (a), enquanto o resultado do modelo desenvolvido para comparação está mostrado na Figura 38 (b).

Figura 38 – Distribuição da tensão de von Mises na área amassada no momento em que o indentador é afastado do duto, antes da pressurização



Fonte: (a) Shuai et al. (2018); (b) O autor (2024)

Observa-se que a tensão equivalente máxima não ocorre no ponto central do defeito, mas em um ponto a uma curta distância do centro, na direção axial. Segundo Shuai et al. (2018), o resultado ilustra que existe uma grande zona afetada ao redor do defeito, essa zona pode ser considerada como uma dobradiça plástica, que quando submetida a variações de pressão interna pode ocasionar fadiga e afetar a segurança e vida útil do duto. No resultado de Shuai et al. (2018), o valor da tensão equivalente de von Mises é de 466 MPa, enquanto no resultado do modelo desenvolvido no presente estudo é de 438 MPa. Assim, o erro relativo é de 6%.

Quanto ao teste experimental, a falha não ocorre na área do defeito, como evidenciado na Figura 39. Shuai et al. (2018) detalha a consistência do teste e compara com experimentos de outros pesquisadores. Entretanto, para validar seu modelo nu-

mérico de elementos finitos, incrementou a pressão interna, considerando como critério de falha o momento em que a região distante do defeito, a mesma região que rompeu no teste experimental, atinge a tensão última do material (468 MPa). Na Figura 40 (a), esse momento é apresentado, enquanto na Figura 40 (b) é ilustrado o momento em que a primeira região do modelo desenvolvido neste trabalho atinge a tensão última do material (no centro do defeito).

Figura 39 - Localização da falha após o teste experimental

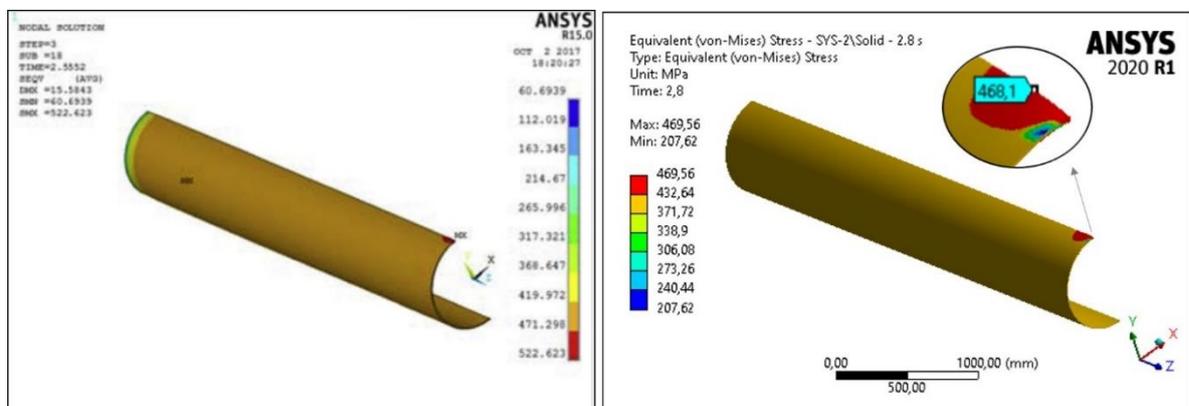


Fonte: Shuai et al. (2018)

Figura 40 – Distribuições de tensões equivalentes de von Mises

(a) Resultado de Shuai et al. (2018)

(b) Resultado do presente estudo



Fonte: (a) Shuai et al. (2018); (b) O autor (2024)

A pressão na qual o modelo de Shuai et al. (2018) atinge o critério de falha estabelecido é de 11,104 MPa. O modelo desenvolvido no presente estudo não permite maiores incrementos de pressão quando a primeira região (centro do defeito) atinge a tensão última do material. Dessa forma, para uma comparação com a literatura, foi considerada a pressão registrada no momento em que a região distante do defeito atinge a tensão de escoamento do material (375 MPa), isso ocorre quando a região do defeito alcança a tensão última do material, com uma pressão de 9,6 MPa.

Já a pressão quando a tensão de von Mises da região distante da moosa atingiu 375 MPa para o modelo da literatura é de 9,83 MPa e no resultado experimental foi de 9,73 MPa. Assim, o erro relativo da pressão do modelo da literatura com relação ao experimental é de 1,028 %, enquanto o do modelo desenvolvido no presente estudo é de 1,336 %.

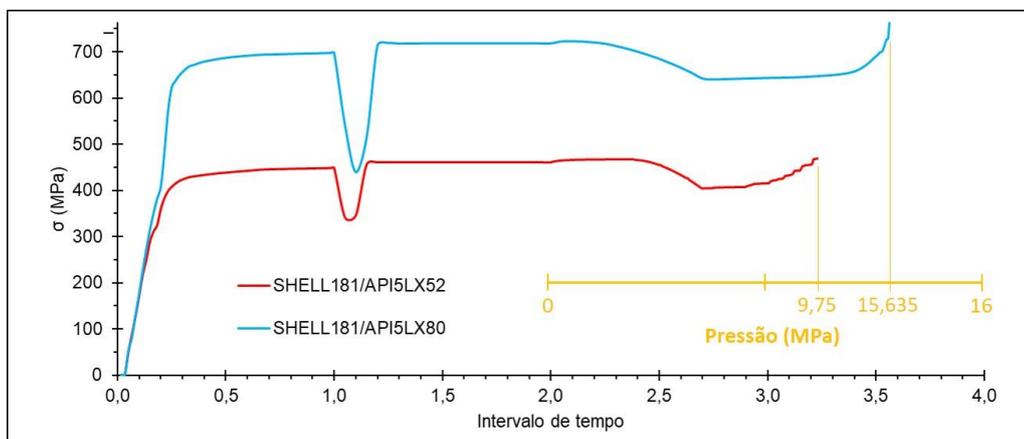
A análise comparativa para a validação do modelo de elementos finitos foi satisfatória, uma vez que os resultados se mostraram coerentes e próximos dos resultados da literatura. A diferença entre os resultados pode ser justificada pela configuração da malha de elementos finitos, pela aproximação da curva tensão-deformação do material e pelas condições adotadas na análise de contato. Dessa forma, pode-se considerar o modelo de elementos finitos desenvolvido neste estudo como validado para aplicação.

4.2.2 Extensão do modelo para estudo paramétrico

Os resultados a seguir referem-se ao modelo estendido, no qual houve uma alteração na malha de elementos finitos, optando-se agora por uma malha do tipo casca, conforme descrito anteriormente no capítulo de metodologia (ver Figura 18). Além disso, um novo material foi adotado para este modelo, o API 5L X80.

Como resultado da modificação do tipo de elemento, a simulação apresentou uma pressão crítica de 9,75 MPa ao adotar *shell* 181, conforme ilustrado no Gráfico 8. Quanto a modificação do material, o resultado da pressão crítica ao adotar o API 5L X80 é de 15,635 MPa, que também pode ser observado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Comparativo do histórico de tensão equivalente entre os modelos adotados



Fonte: O autor (2024)

Observa-se que no início do primeiro intervalo de tempo, as curvas coincidem na fase elástica. O material X52, possuindo uma tensão de escoamento mais baixa, entra na fase plástica antes do X80, que suporta uma tensão maior antes de iniciar a deformação plástica. Após esse intervalo inicial, com o recuo do punção, observa-se um alívio de tensão, seguido pela pressurização interna. Durante a pressurização, o material API 5L X52 alcança sua tensão máxima sob uma pressão interna muito similar à observada no modelo que utiliza elementos sólidos 187 (9,6 MPa), enquanto o material API 5L X80 exige uma pressão interna superior para atingir sua tensão máxima.

4.3 3ª ABORDAGEM: ESTUDO PARAMÉTRICO DE DUTOS CURVOS

A fim de compreender a variação dos parâmetros adotados na análise, foram organizados na Tabela 7, detalhando a nomenclatura, o parâmetro ao qual se refere e as especificações de cada um deles. Cada caso dos resultados a seguir está intitulado com as junções das nomenclaturas correspondentes.

Tabela 7 – Variação de parâmetros adotados na 3ª abordagem

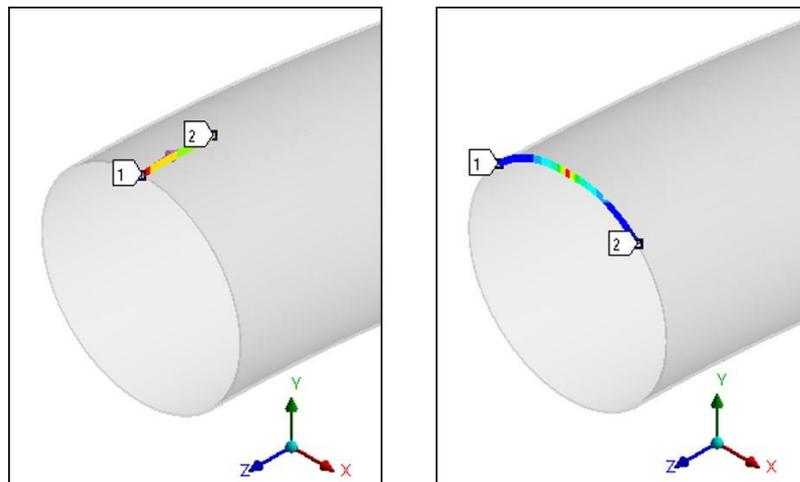
| NOMECLATURA | PARÂMETRO | ESPECIFICAÇÃO |
|-------------|--|----------------------|
| C90 | Ângulo entre as faces da seção curvada | 90° |
| C45 | Ângulo entre as faces da seção curvada | 45° |
| PS | Posição do defeito | Superior a curvatura |
| PI | Posição do defeito | Interno a curvatura |
| PE | Posição do defeito | Externo a curvatura |
| A20 | Avanço do punção | 20 mm |
| A40 | Avanço do punção | 40 mm |
| A60 | Avanço do punção | 60 mm |

Fonte: O autor (2024)

O avanço de 20 mm corresponde uma profundidade de 2,8% do diâmetro nominal do duto, o de 40 mm corresponde a profundidade de 5,6% e o de 60 mm corresponde a 8,4% da profundidade.

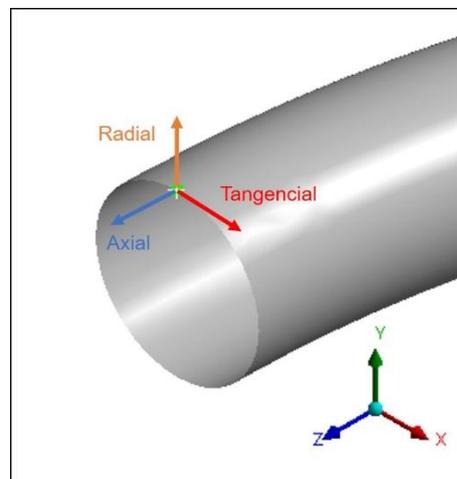
Para análise dos resultados, são gerados gráficos comparativos entre os casos. Isso inclui a distribuição de tensão equivalente de von Mises para as trajetórias circunferencial e ao longo do perímetro da curvatura do duto, prescritas através de trajetórias em linhas (conforme mostrado na Figura 41), no segundo instante de tempo definido. Também são gerados os históricos de tensão nos nós de falha, isto é, nos nós da malha que primeiro atingem a tensão última do material durante a pressurização. Além disso, são apresentadas as pressões de falha com a projeção da profundidade dos defeitos para os casos mais críticos, e gráficos de distribuição de tensão normal nos eixos tangencial, radial e axial partindo do centro do defeito, conforme eixos descritos na Figura 42.

Figura 41 – Trajetórias para traçar resultados da 3ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

Figura 42 – Eixos para traçar resultados da 3ª abordagem



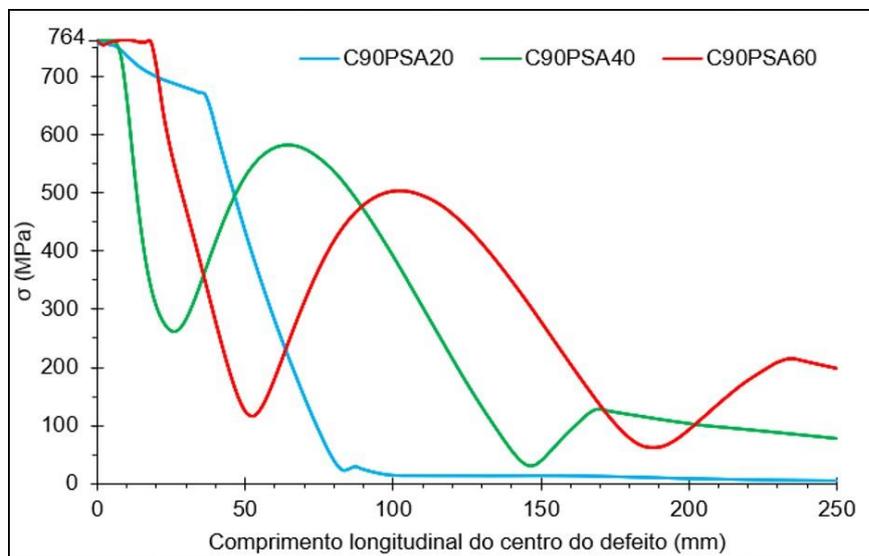
Fonte: O autor (2024)

4.3.1 Distribuições de tensões equivalentes longitudinais e ao logo do perímetro

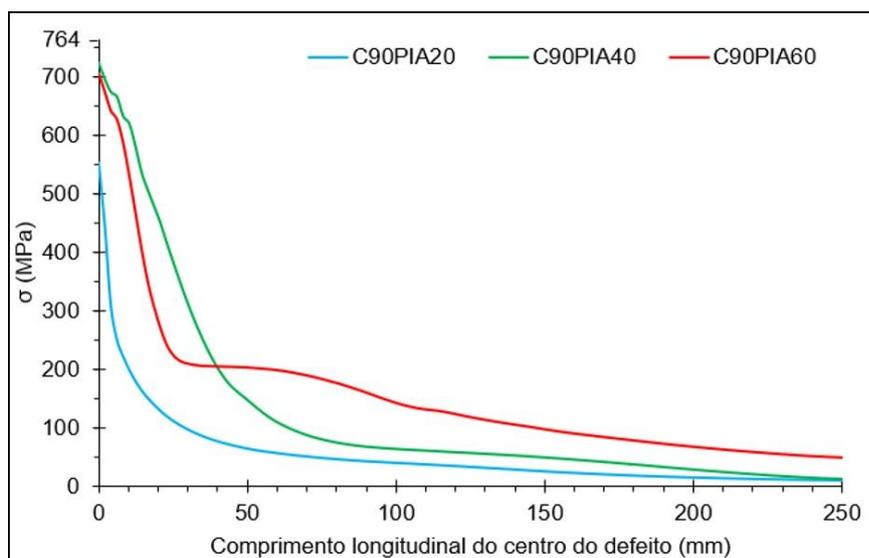
Os gráficos a seguir representam a distribuição longitudinal da tensão equivalente de von Mises no instante de tempo de 2 s, ou seja, ilustram a tensão residual após o recuo do indentedor e antes da pressurização. No Gráfico 9, são contempladas as combinações possíveis para analisar os diferentes avanços do punção.

Gráfico 9 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória longitudinal do duto com defeito causado sob diferentes avanços do punção

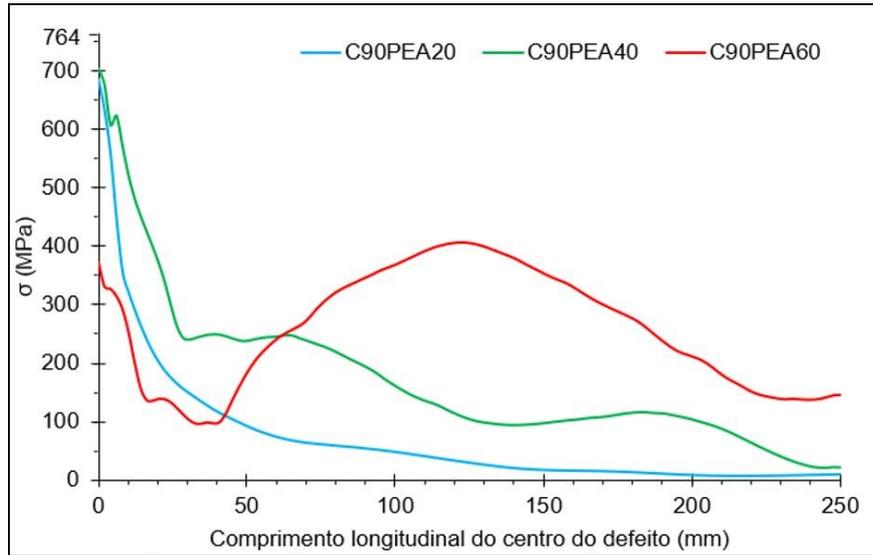
(a) Curvatura de 90° e posição superior do defeito fixas



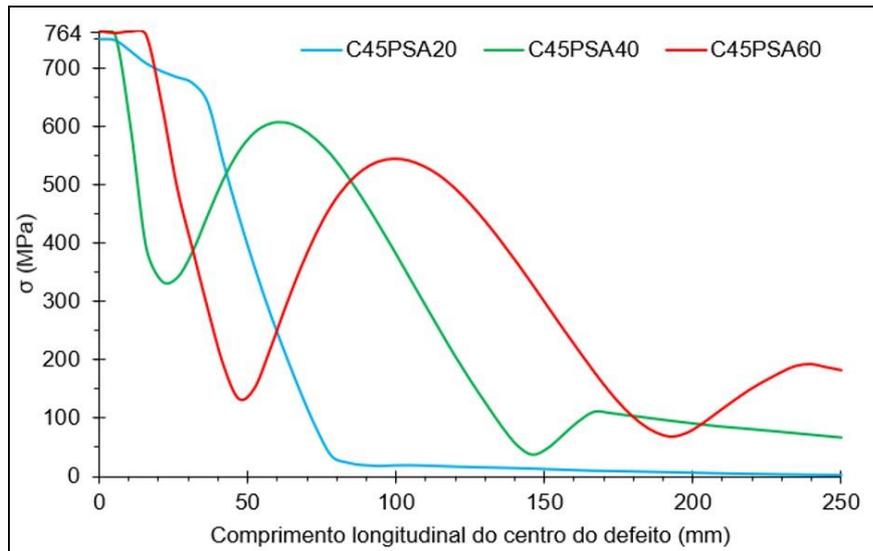
(b) Curvatura de 90° e posição interna do defeito fixas



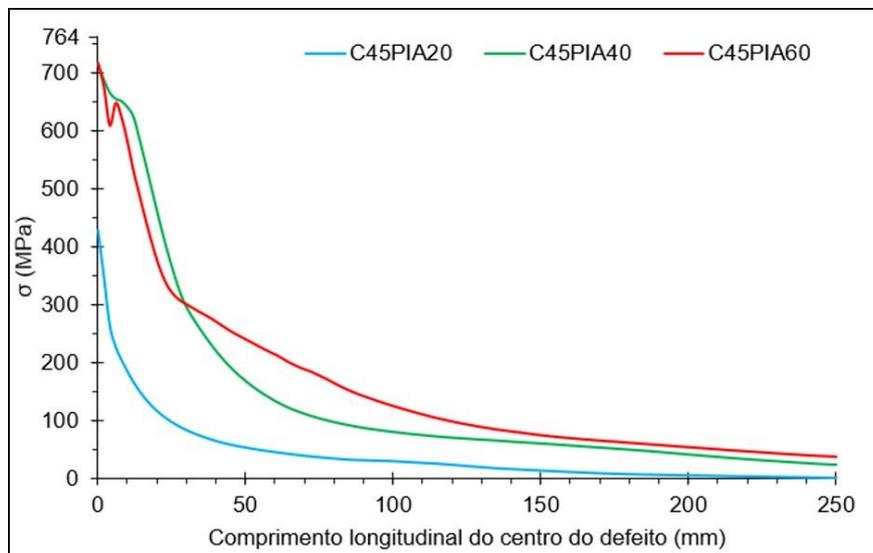
(c) Curvatura de 90° e posição externa do defeito fixas



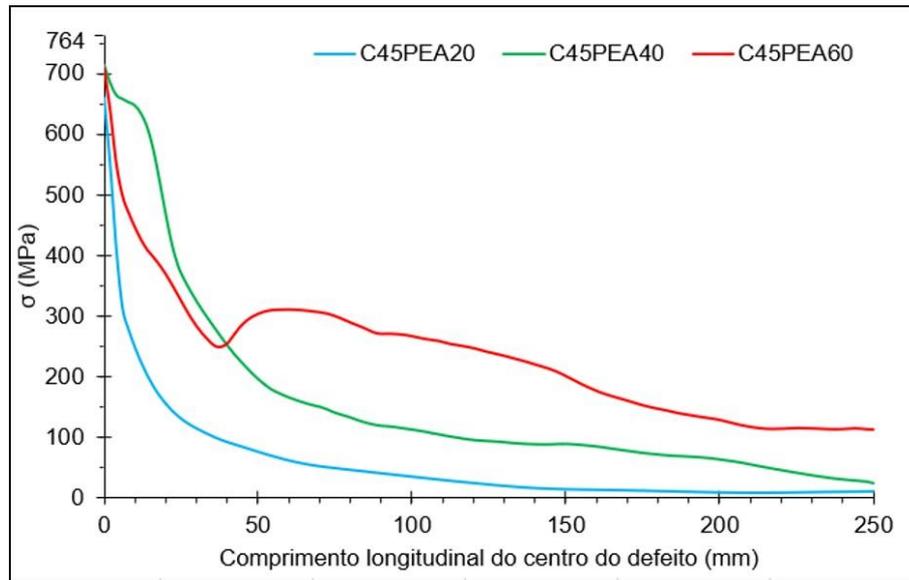
(d) Curvatura de 45° e posição superior do defeito fixas



(e) Curvatura de 45° e posição interna do defeito fixas



(f) Curvatura de 45° e posição externa do defeito fixas



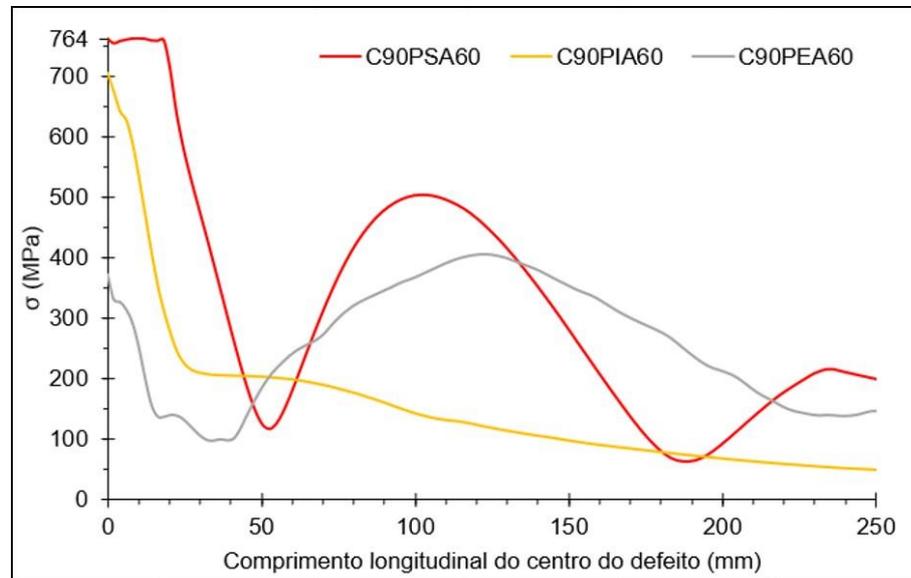
Fonte: O autor (2024)

Analisando os gráficos, torna-se evidente que a profundidade do defeito exerce influência na variação de tensão ao longo da trajetória longitudinal do defeito. Na maioria dos casos, a curva que apresenta a tensão mais elevada e maior variação ao longo do comprimento é a correspondente ao avanço de 60 mm, o qual resulta na maior profundidade do amassamento. Por outro lado, para a menor profundidade, causada pelo avanço de 20 mm, todos os gráficos exibem um comportamento semelhante, apresentando a menor tensão. Em alguns casos, a tensão residual não atinge a tensão de escoamento do material.

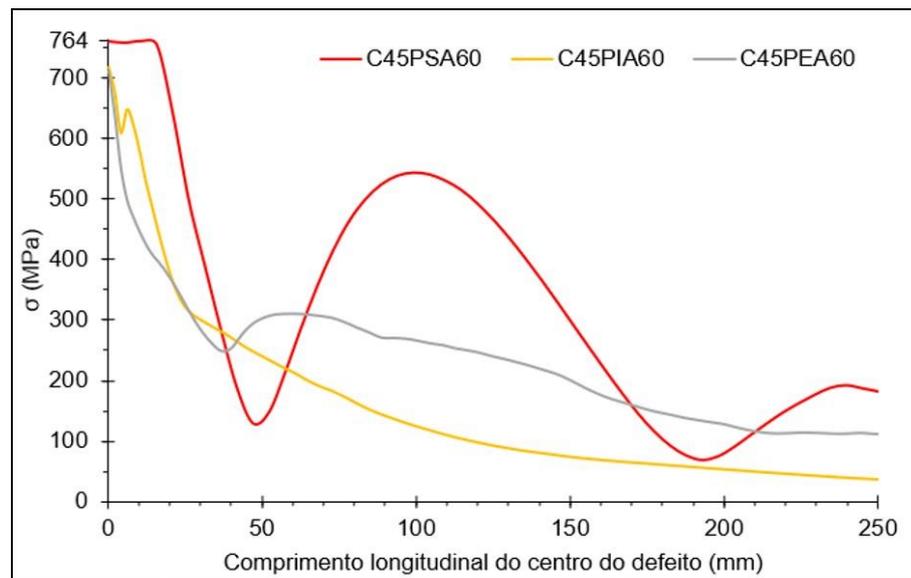
No Gráfico 10 apresentado a seguir, a comparação da tensão equivalente diz respeito à combinação das diferentes posições do defeito. As curvas na posição do defeito superior destacam-se pela maior variação. Já na posição do defeito interno, observa-se a tendência de diminuição da tensão à medida que se afasta do centro do defeito. Por outro lado, na posição do defeito externo, apesar da menor tensão no centro em comparação com as demais posições, a curva torna-se mais acentuada a certa distância do defeito, evidenciando uma perturbação maior de tensão ao longo da trajetória, em comparação com a posição interna.

Gráfico 10 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória longitudinal do duto para diferentes posições do defeito

(a) Curvatura de 90° e avanço de 60 mm fixos



(b) Curvatura de 45° e avanço de 60 mm fixos

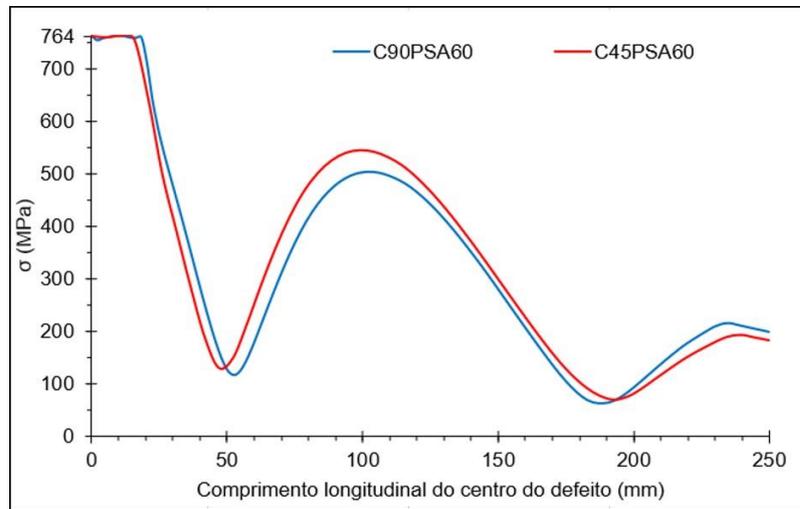


Fonte: O autor (2024)

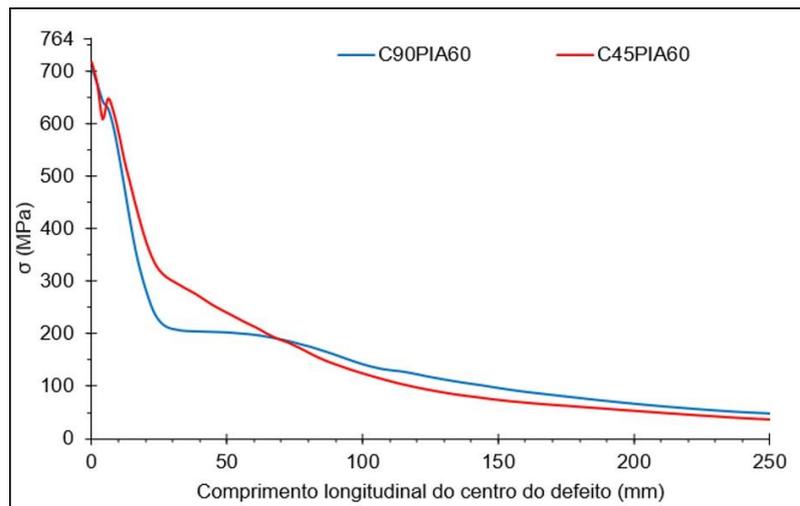
Ainda no contexto da distribuição longitudinal, no Gráfico 11 estão apresentadas as combinações para analisar as diferentes curvaturas.

Gráfico 11 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória longitudinal do duto com diferentes curvaturas

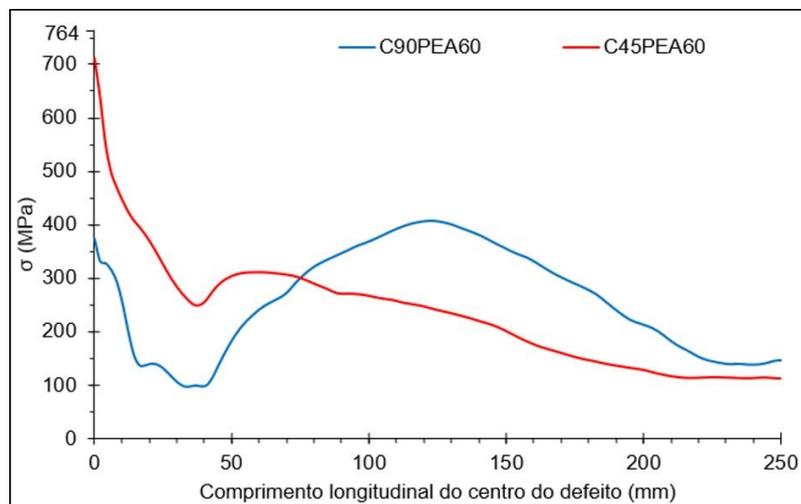
(a) Posição superior do defeito e avanço de 60 mm fixos



(b) Posição interna do defeito e avanço de 60 mm fixos



(c) Posição externa do defeito e avanço de 60 mm fixos



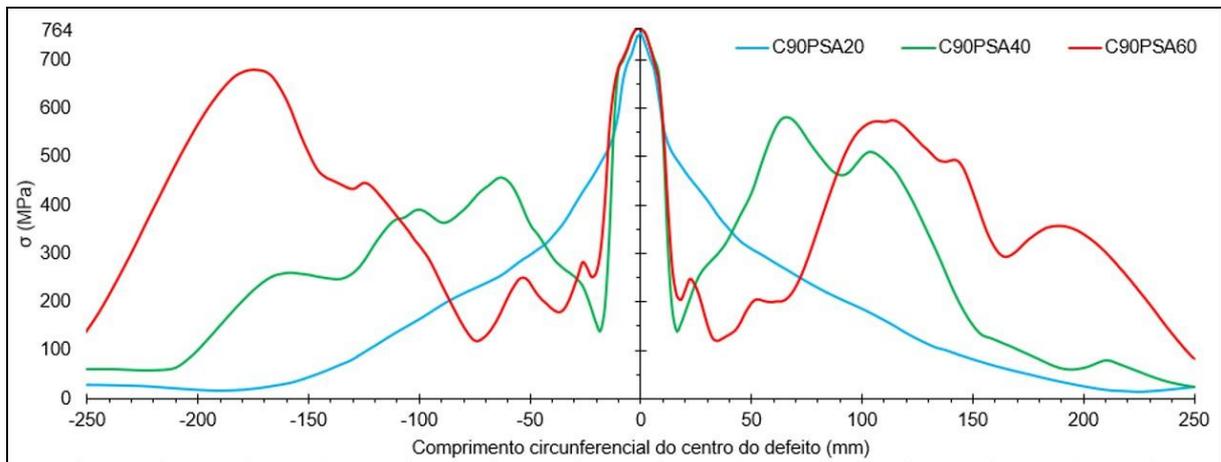
Fonte: O autor (2024)

Observa-se que, em todos os casos em que o duto possui uma curvatura de 45° , as tensões no centro do defeito e a uma distância de 60 mm são mais elevadas em comparação com o duto de 90° . No entanto, o duto de 90° exibe tensões ligeiramente superiores para distâncias maiores do centro do amassamento.

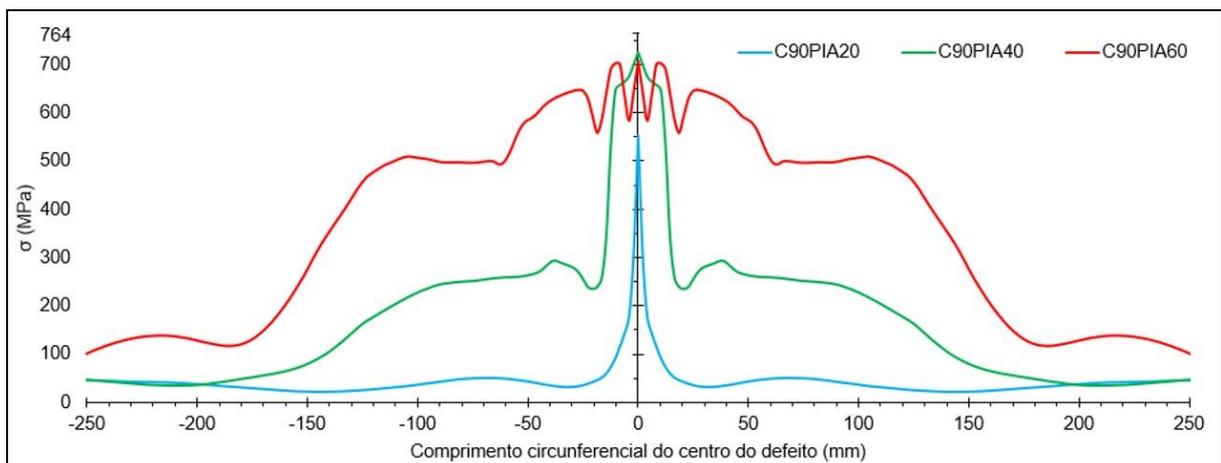
Em seguida, com as combinações de parâmetros, foram plotadas as distribuições de tensão equivalente (von Mises) para a trajetória ao longo do perímetro, considerando o mesmo instante de tempo 2 s. No Gráfico 12, estão apresentadas todas as combinações possíveis para analisar os diferentes avanços do punção.

Gráfico 12 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com defeito causado sob diferentes avanços do punção

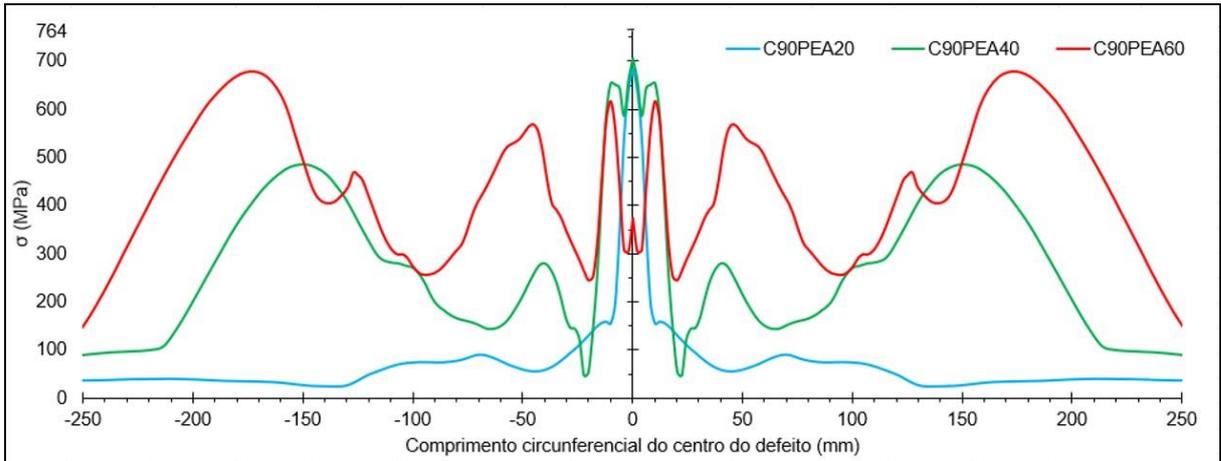
(a) Curvatura de 90° e posição superior do defeito fixas



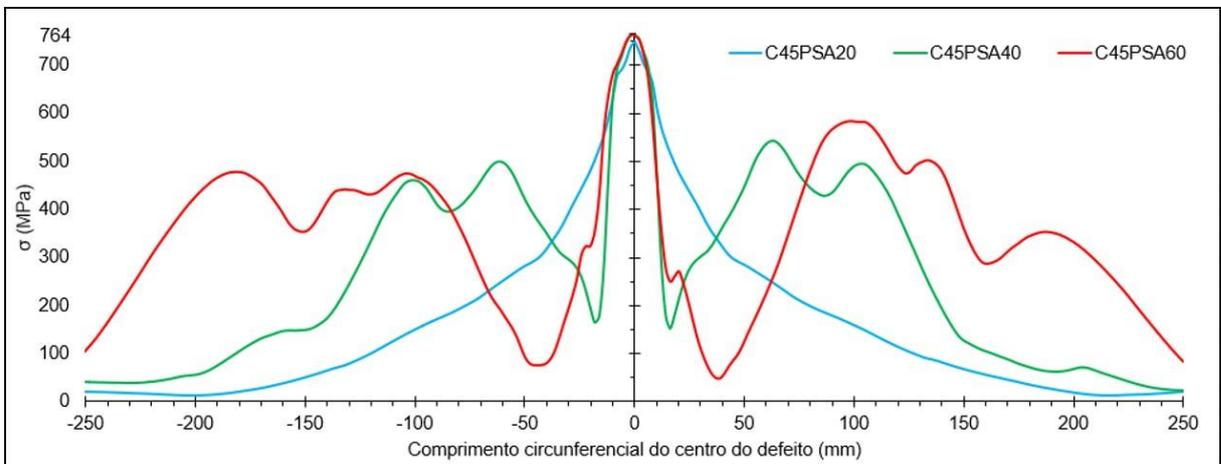
(b) Curvatura de 90° e posição interna do defeito fixas



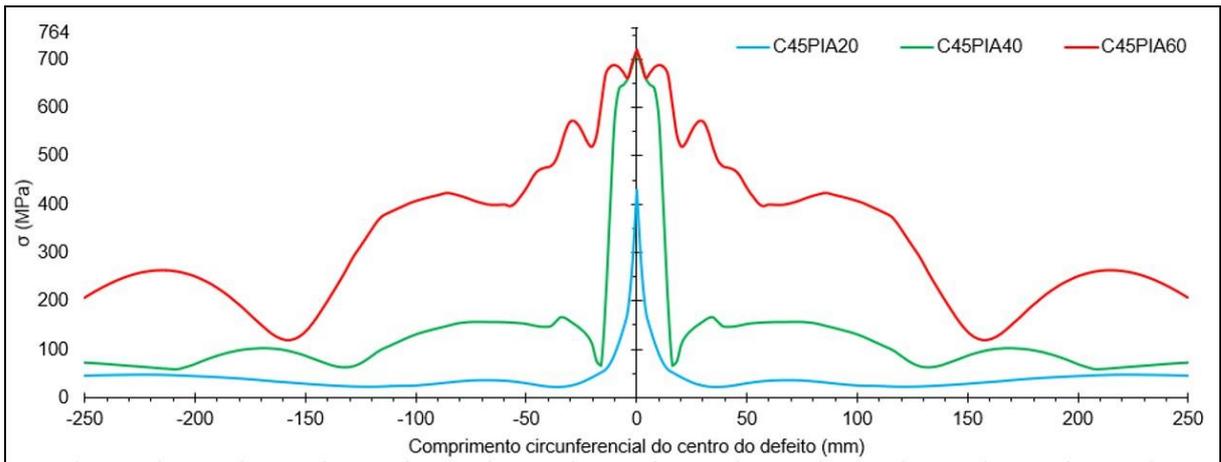
(c) Curvatura de 90° e posição externa do defeito fixas



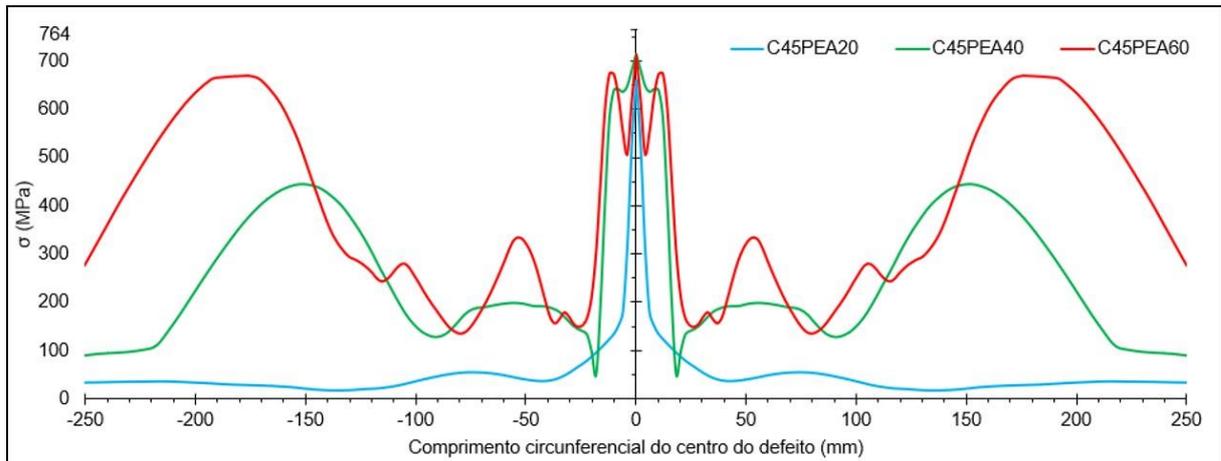
(d) Curvatura de 45° e posição superior do defeito fixas



(e) Curvatura de 45° e posição interna do defeito fixas



(f) Curvatura de 45° e posição externa do defeito fixas



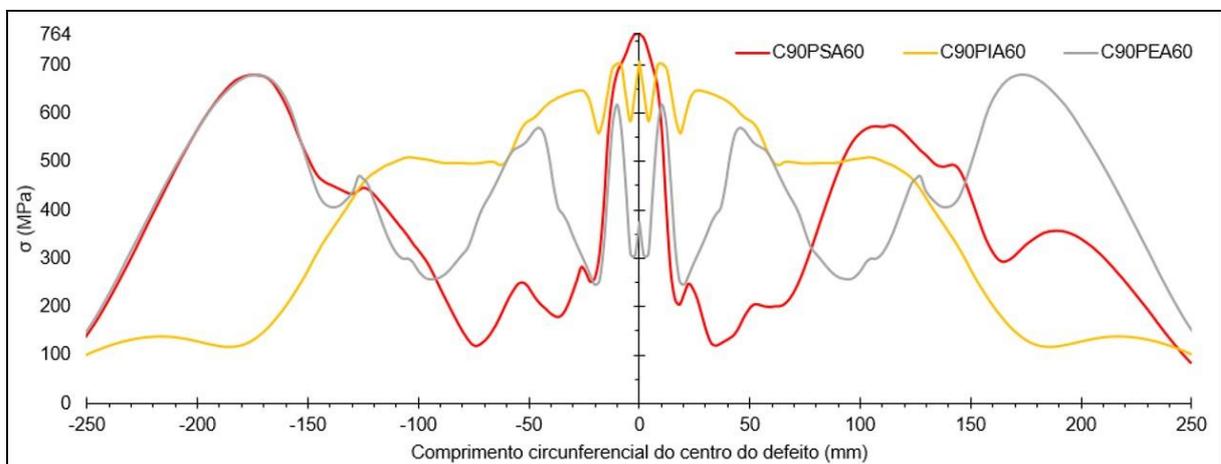
Fonte: O autor (2024)

Observa-se que a profundidade do amassamento também exerce influência na variação de tensão ao longo da trajetória ao longo do perímetro do duto. Em todos os casos, a curva que exibe a tensão mais elevada e maior variação ao longo do comprimento é aquela correspondente à maior profundidade do amassamento, apresentando uma variação significativa. Por outro lado, a menor profundidade é a que apresenta valores menores de tensão na distribuição.

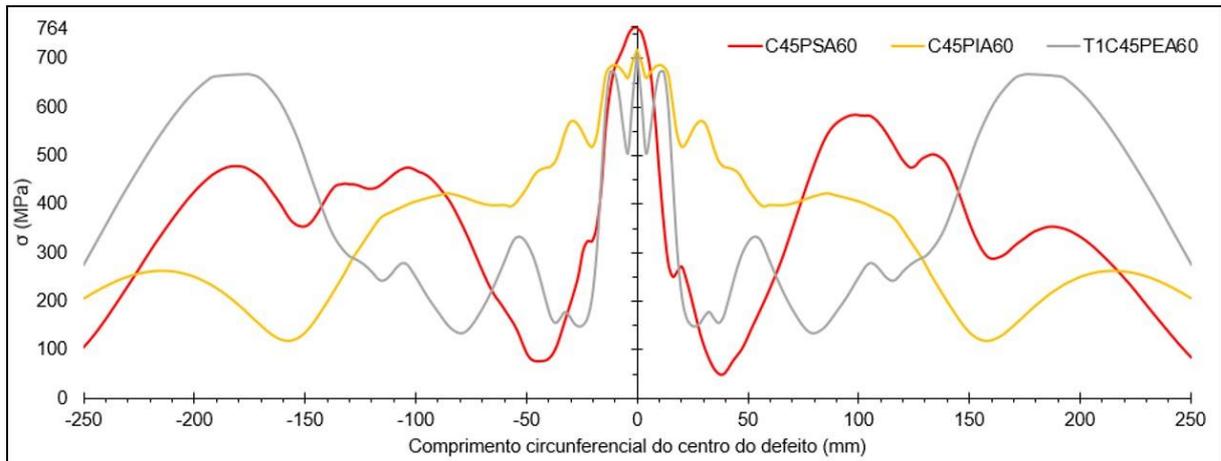
No Gráfico 13, apresentado a seguir, a comparação da tensão equivalente diz respeito à combinação das diferentes posições do defeito considerando a trajetória ao longo do perímetro.

Gráfico 13 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com defeito causado sob diferentes posições do defeito

(a) Curvatura de 90° e avanço de 60 mm fixos



(b) Curvatura de 45° e avanço de 60 mm fixos



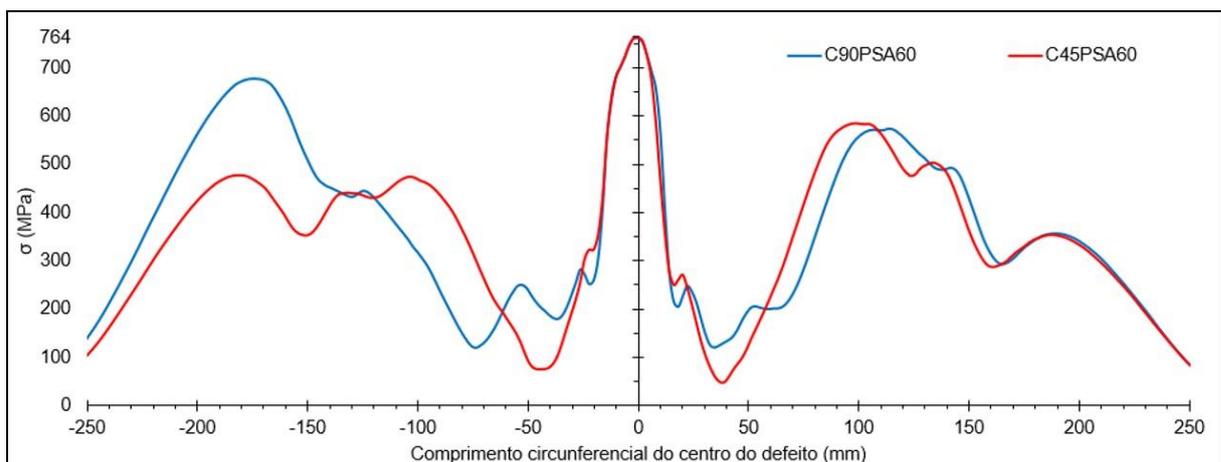
Fonte: O autor (2024)

Todas as curvas exibem variação de tensão, no entanto, a que apresenta os valores mais elevados é referente aos dutos com aos defeitos localizados na posição externa à curvatura. Vale ressaltar que, exclusivamente para a posição superior, as distribuições não são simétricas.

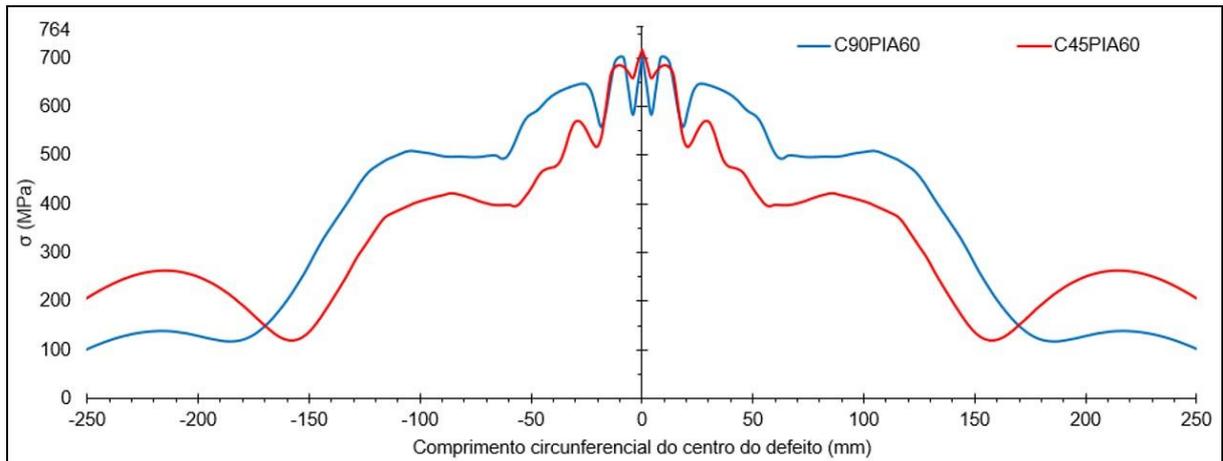
No contexto da distribuição ao longo do perímetro, no Gráfico 14 são contempladas as combinações para analisar as diferentes curvaturas.

Gráfico 14 - Distribuições de tensão equivalente do defeito de amassamento na trajetória ao longo do perímetro do duto com diferentes curvaturas

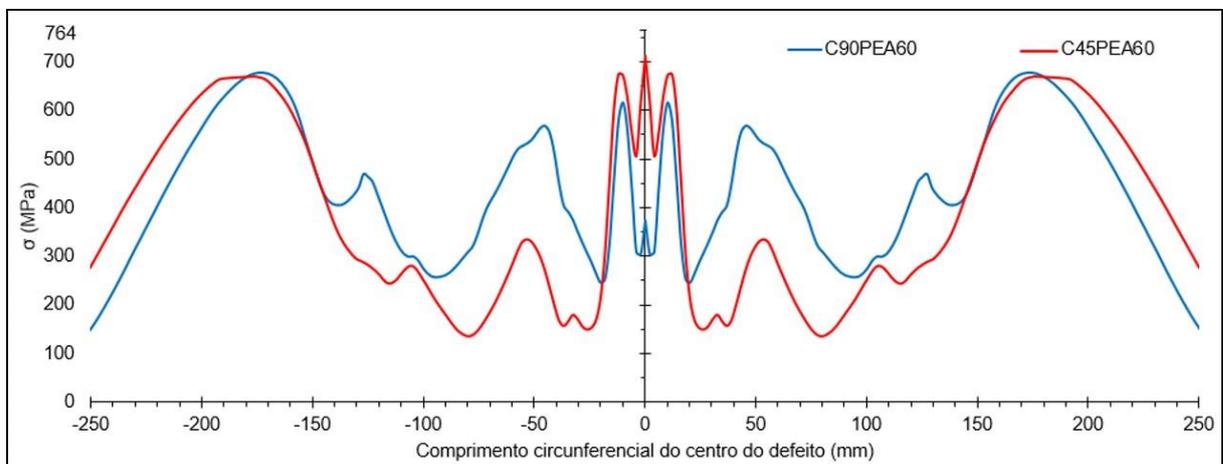
(a) Posição superior do defeito e avanço de 60 mm fixos



(b) Posição interna do defeito e avanço de 60 mm fixos



(c) Posição externa do defeito e avanço de 60 mm fixos



Fonte: O autor (2024)

Conforme mencionado anteriormente, quando se trata da distribuição de tensão ao longo do perímetro, nota-se que a posição do defeito superior a curvatura resulta em distribuições assimétricas de tensão, pois neste caso o defeito não está localizado em um plano de simetria do duto. Analisando os diferentes valores de curvatura no Gráfico 14 (a), observa-se que, para o ângulo de 90° , a tensão é mais elevada no lado negativo, ou seja, no lado externo da curvatura. Já para o ângulo de 45° , o comportamento é inverso, embora não haja uma grande diferença na amplitude entre os lados, sendo que o lado interno à curvatura apresenta uma ligeira maior tensão.

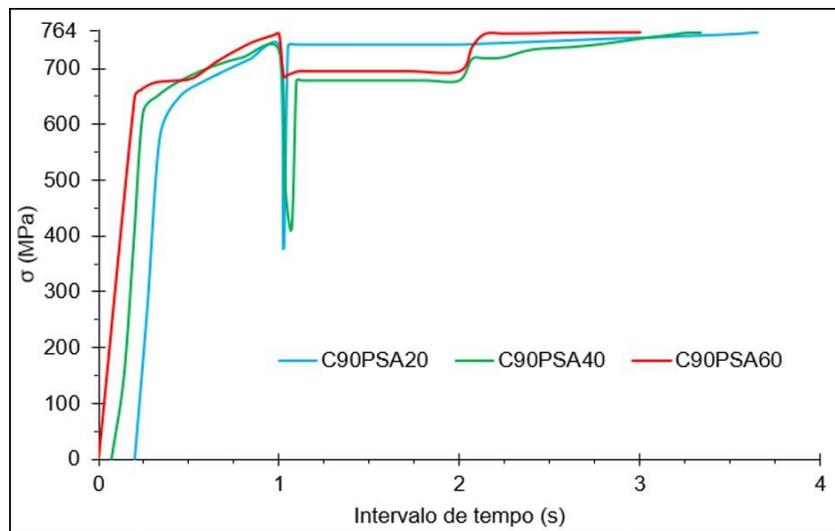
Outra observação relevante é o comportamento oposto ao da distribuição longitudinal. Onde, na posição mais próxima do defeito (≈ 60 mm), o duto com curvatura de 90° exibe tensões mais elevadas, enquanto em posições mais distantes (≈ 250 mm), as tensões mais elevadas correspondem ao duto com curvatura de 45° .

4.3.2 Histórico de tensão equivalente

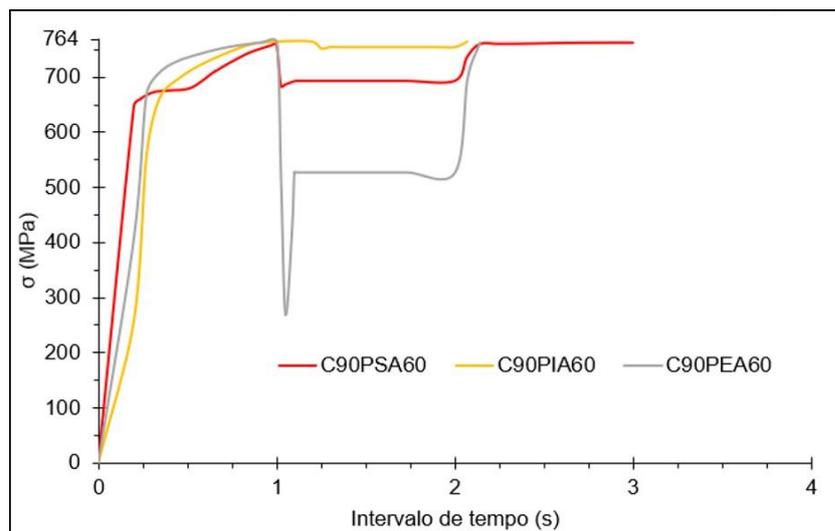
Os resultados apresentados a seguir, no Gráfico 15, dizem respeito ao histórico da tensão equivalente máxima nos nós de falha. Esses nós referem-se ao primeiro ponto da malha que atinge a tensão última do material em cada caso específico. É importante ressaltar que, para cada caso, este nó é em posição diferente. No entanto, todos eles estão posicionados nas proximidades do nó central do amassamento.

Gráfico 15 – Histórico de tensão equivalente ao longo do tempo nos nós de falha

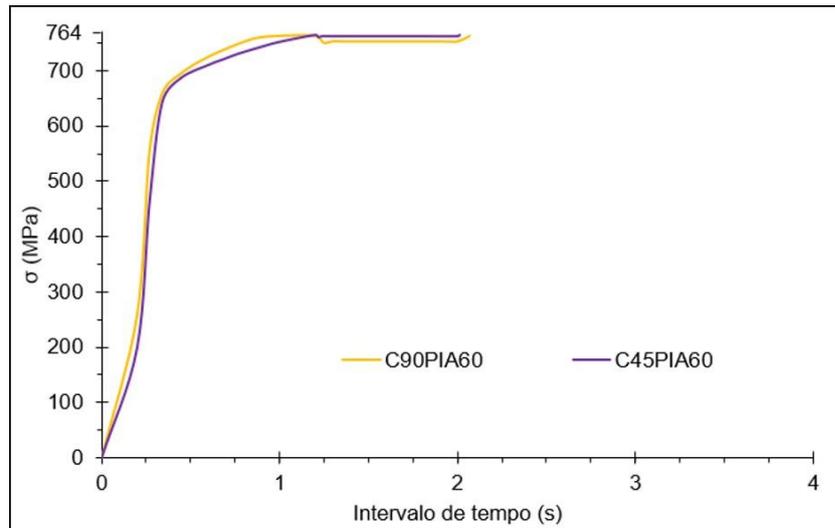
(a) Variação de avanços



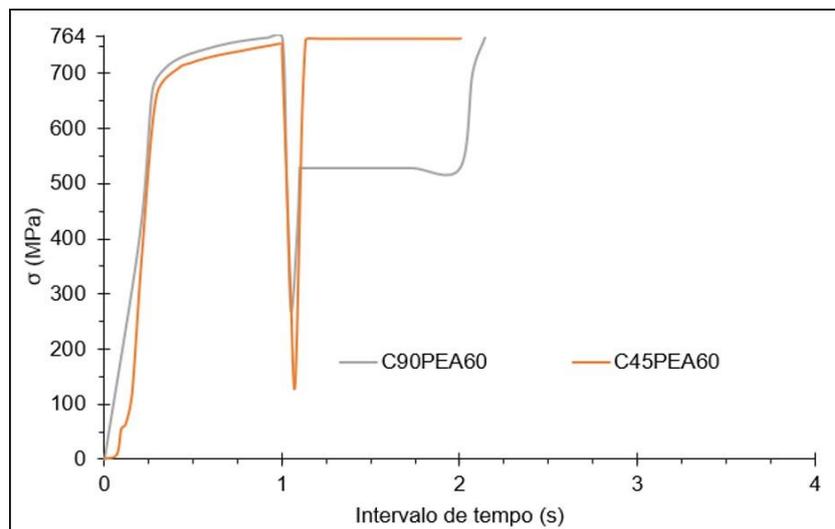
(b) Variação de posições



(c) Variação de curvaturas para a posição interna do defeito



(d) Variação de curvaturas para a posição externa do defeito



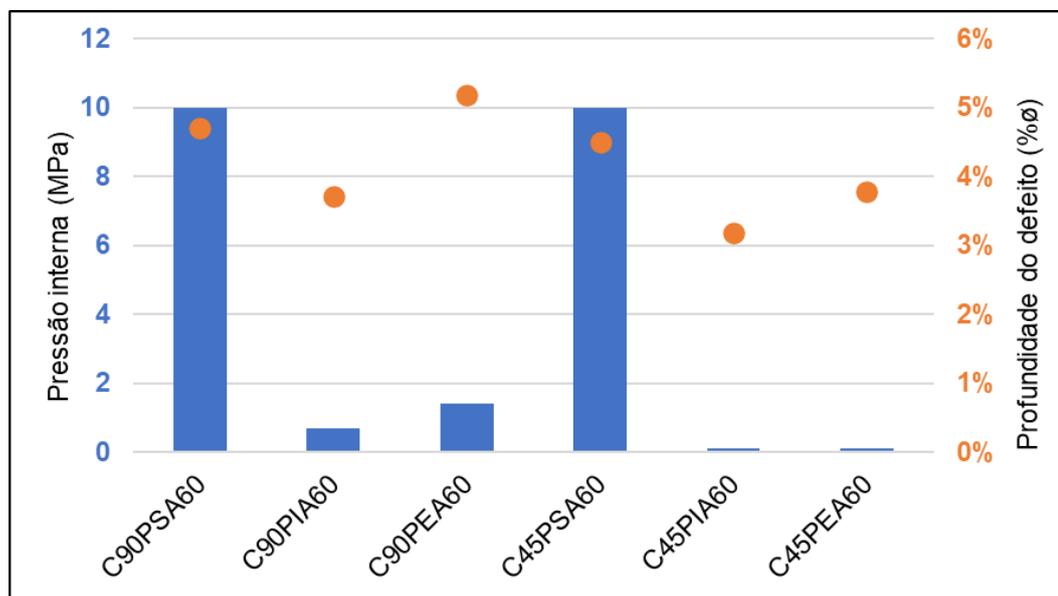
Fonte: O autor (2024)

É perceptível que os históricos de tensão nos nós de falha exibem uma distribuição aproximada durante o intervalo de tempo de 1s a 2s, onde ocorre o retorno do punção, alguns nós demonstram um alívio de tensão significativa. Cada curva encerra quando atinge a falha por pressurização. A partir desses resultados, já é possível ter uma noção de como os dutos com defeitos, tanto internos quanto externos à curvatura, são mais suscetíveis a falhas em comparação com os dutos que possuem defeitos na posição superior à curvatura. Os itens (c) e (d) evidenciam que, apesar das duas curvaturas apresentarem valores próximos, a curvatura de 45° atinge a falha um pouco antes.

4.3.3 Análise da pressão crítica

Considerando que os defeitos com maior profundidade são os mais propensos à falha, foram comparadas as profundidades permanentes após o retorno do punção, expressas como porcentagem do diâmetro nominal do duto do defeito, e as pressões de falha entre os casos que apresentam defeitos causados pelo maior avanço do punção de 60 mm. Este resultado está exposto no Gráfico 16, a seguir.

Gráfico 16 – Pressão crítica e profundidade dos defeitos dos casos da 3ª abordagem



Fonte: O autor (2024)

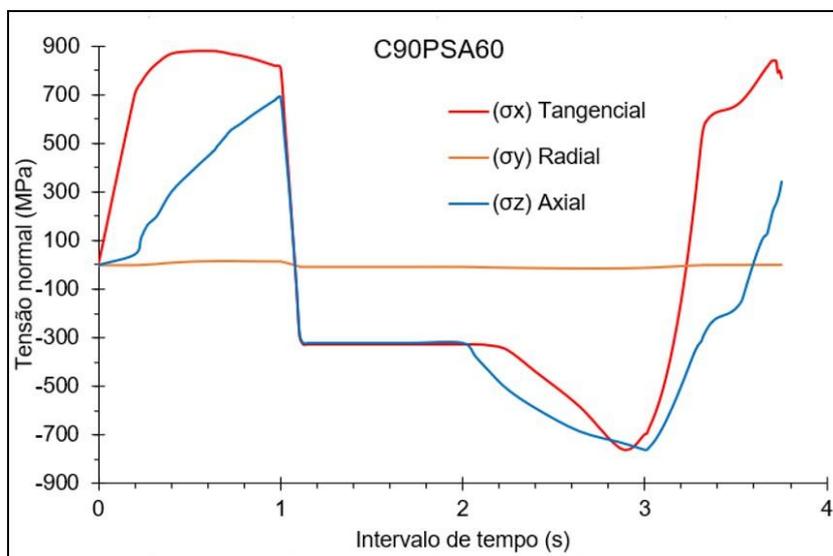
De acordo com o exposto no Gráfico 16, os dutos que exibem maior profundidade dos defeitos encontram-se na faixa abaixo de 6% do diâmetro nominal, conforme especificado pela norma ASME B31.8 (2018), mencionada na segunda seção deste trabalho. No entanto, mesmo apresentando uma profundidade reduzida, observa-se que esses defeitos colocam em risco a integridade do duto em operação, especialmente os dutos curvos com defeitos internos e externos, pois atingem a tensão última do material com uma pequena pressão. Entre os casos comparados, os defeitos na posição interna à curvatura são os mais suscetíveis a falhas, principalmente para dutos com a menor angulação de curvatura.

4.3.4 Histórico de tensões normais

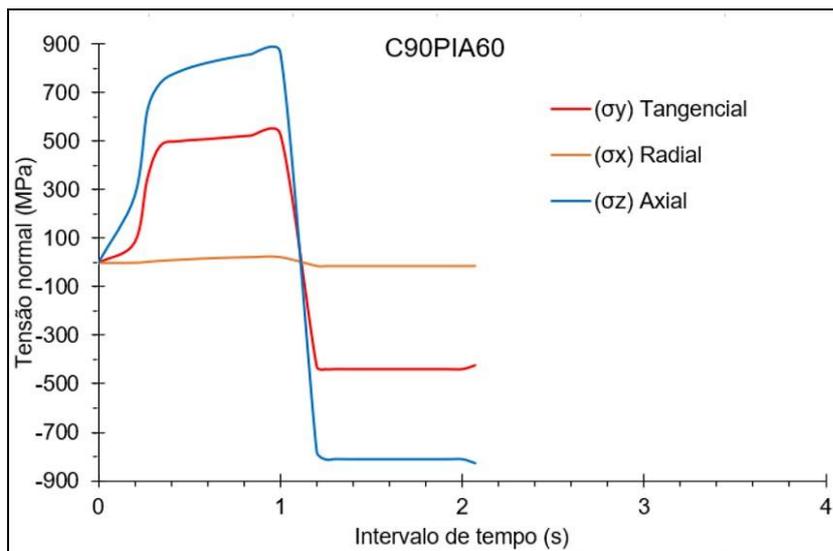
Na sequência, no Gráfico 17, são apresentadas distribuições de tensões normais localizadas no ponto central do amassamento para três casos que se diferenciam quanto à posição do defeito.

Gráfico 17 – Distribuição de tensões normais ao longo de tempo no ponto central dos defeitos para diferentes casos

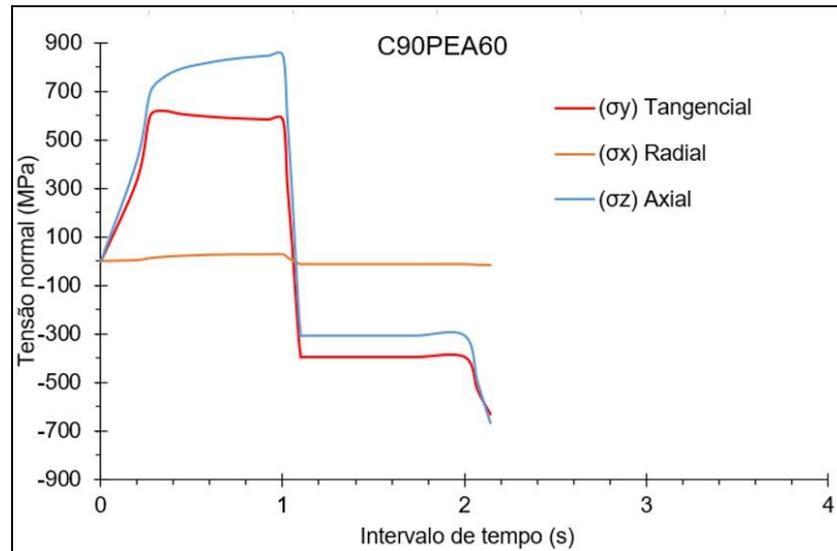
(a) C90PSA60



(b) C90PIA60



(c) C90PE60



Fonte: O autor (2024)

Ao analisar a distribuição de tensões normais, nota-se que, no caso do duto com defeito superior à curvatura, a tensão tangencial é mais elevada no instante inicial, quando o punção avança. Nesse momento inicial, as tensões para todos os casos são de tração. Já no segundo instante, com o recuo do punção, as tensões são "aliviadas" e tornam-se compressivas. No duto com defeito superior, as tensões tangenciais e axiais coincidem nesse instante, já nas posições de defeito interno e externo, isso não ocorre.

É importante observar, devido à curvatura, as tensões axiais nos dutos com amassamentos nas posições interna e externa são mais elevadas, particularmente na posição externa, que é mais suscetível a falhas, como observado anteriormente, a amplitude da tensão axial é a mais elevada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou a análise de tensão em dutos retos e curvos com defeitos de amassamento sujeitos a pressão interna, adotando diferentes abordagens para cumprir todos os objetivos específicos. As principais conclusões extraídas da análise mencionada, são as seguintes:

- Defeitos de amassamento influenciam na integridade dos dutos através da concentração de tensão, o que é mais agravado em dutos curvos, os quais apresentam índices de tensões mais elevados antes mesmo da presença do defeito;
- O tamanho do indentador tem influência, quanto menor a área de contato, gera maiores tensões residuais, mesmo para o mesmo valor de deslocamento prescrito;
- Dutos curvos e retos com amassamentos sob condições de operação possuem tensões equivalentes máximas próximas, no entanto, os dutos curvos apresentam maiores deformações permanentes e se mostram mais vulneráveis a falhas;
- Um duto curvo que possui o amassamento na posição externa à curvatura resiste a uma pressão interna 19,5 % menor que o duto reto com defeito equivalente;
- Modelos utilizando elementos do tipo casca necessitam de uma malha com número menor de elementos para garantir convergência, o que resulta em uma economia do esforço computacional. No entanto, é importante ressaltar a relevância de analisar caso a caso, para verificar a validade das hipóteses envolvidas para desenvolvimento dos elementos de casca;
- Quanto maior a profundidade do amassamento, maior a variação de tensão equivalente ao longo da trajetória circunferencial e ao longo do perímetro;
- Em relação à posição do amassamento, todas as posições apresentam considerável variação no comportamento da distribuição de tensão equivalente na trajetória circunferencial. Na trajetória longitudinal, essa distribuição é mais variável apenas para a posição superior, que também atinge valores mais elevados;
- O ângulo de curvatura exerce influência na distribuição de tensão. Longitudinalmente, o duto com maior angulação (90°) exibe tensão mais elevada próximo ao centro do amassamento, enquanto o duto com menor angulação (45°) apresenta

tensão mais elevada a uma distância maior do centro do amassamento. Já circunferencialmente, o duto com menor angulação (45°) mostra tensão mais elevada próximo ao centro do amassamento, enquanto o duto com maior angulação (90°) apresenta tensão mais elevada a uma distância maior do centro do amassamento;

- Dutos curvos, curvados a quente e enterrados, que sofram dano mecânico de amassamento na curvatura, mesmo quando apresentam uma profundidade do defeito é abaixo dos 6% especificados pela ASME B31.8 (2018), mostram-se bastante suscetíveis a falhas e não podem ser considerados confiáveis para permanecer em operação com segurança.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados e nas limitações identificadas ao longo deste estudo, é visto que há possibilidades para investigações futuras, visando aprofundar o entendimento e expandir as constatações do presente estudo. A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar dutos curvos com defeitos de amassamento considerando a curvatura a frio, com a aplicação de momento nas condições impostas;
- Realizar estudos sobre dutos curvos com defeitos de amassamento restritos, onde não há retorno elástico do material e o indentador permanece em contato com o duto;
- Investigar dutos curvos com defeitos de amassamento sob diferentes condições, incluindo, por exemplo, dutos submarinos;
- Avaliar modelos de dutos já com amassamento pré-definido na geometria, ao invés de gerar o defeito na simulação;
- Analisar defeitos de amassamento gerados por diferentes formatos de indentadores;
- Propor técnicas de reparo específicas para defeitos de amassamento em dutos curvos;
- Analisar como os defeitos de amassamento em dutos afetam o fluxo e a eficiência do transporte de fluidos;
- Conduzir análises de vida em fadiga para dutos, sejam eles retos ou curvos, que apresentem defeitos de amassamento sob ciclos de carregamento variáveis.

REFERÊNCIAS

AD Normas. 2020. Disponível em: <https://www.revistaadnormas.com.br/2020/03/17/o-processo-de-curvamento-por-inducao-de-tubulacoes>. Acesso em: 02 jan. 2024.

ALLOUTI, M.; SCHMITT, C.; PLUVINAGE, G.; GILGERT, j.; HARIRI, S. Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline. *Engineering Failure Analysis*. France, p. 40-51. 2012.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for line pipe – API specification 5L. Forty-sixth edition. Washington: API; 2018

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.8: Gas transmission and distribution piping systems. New York, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2023.

ARAÚJO, Felipe Cardim de. Análise de tensões e integridade de dutos amassados. 2015. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15273: Curvas por indução para sistema de transporte de petróleo, derivados e gás natural por dutos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15280-1: Dutos terrestres – Parte 1: projeto. Rio de Janeiro, 2009.

BATISTA, Gilmar Zacca; SOUZA, Luis Felipe G. de; BOTT, Ivani de Souza; RIOS, Paulo Rangel. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Tubo API 5L X80 Submetido a Curvamento por Indução. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, p. 1-7, 2007.

BINQUAN, Qiu; HU, Jianlin; ZHANG, Jie. Failure Analysis and Mechanical Behavior of Dented Pipeline Dent Caused by Indenter. *Strength, Fracture and Complexity*. Chengdu, p. 337-354. 2018.

CALLADINE, C. Limit analysis of curved tubes. *Journal of Mechanical Engineering Science*, Reino Unido, p. 85-87, 1974.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. Revisão técnica de: José Roberto Moraes d'Almeida.

CIANCIARULLO, Mauro Iwanow. Construção de gasodutos e oleodutos: orçamento e planejamento. Rio de Janeiro: Interciência, 2022. Recurso digital.

- COSHAM, Andrew; HOPKINS, Phil. The effect of dents in pipelines: guidance in the pipeline defect assessment manual. Pressure Vessels And Piping. Austria, p. 1-13. 2003.
- CUNHA, S. B.; PASQUALINO, P. I.; PINHEIRO, B. C. Stress-life fatigue assessment of pipelines with plain dents. Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures. Rio de Janeiro, p. 961-974. 2009.
- D`ALBUQUERQUE, Thiago Martins; FERREIRA, Jorge Luiz de Almeida. Análise numérica via elementos finitos na modelagem de defeitos em dutos. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 14., 2007, Uberlândia. Minas Gerais: Creem, 2007. p. 1-13.
- EGIG. Gas Pipeline Incident: 10th Report of the European. Gas Pipeline Incident Data Group. 10th EGIG Report 1970-2016. 2018.
- GAS Net. 2006. Disponível em: <https://www.gasnet.com.br/conteudo/2657/Qualificacao-de-curvamento-de-tubos-API-5L-X70-PSL-2-%E2%80%93-%C3%98-28%E2%80%9Dx-0-625%E2%80%9D-WT-pelo-processo-de-inducao-por-alta-frequencia>. Acesso em: 02 jan. 2024.
- HAN, Chuanjun; TAN, Sisi; ZHANG, Jie; ZHANG, Chuan. Simulation investigation of dent behavior of steel pipe under external load. Engineering Failure Analysis. China, p. 341-354. 2018.
- HOPKINS, Phil. The application of fitness for purpose methods to defects detected in offshore transmission pipelines. Conference On Welding And Weld Performance In The Process Industry. London, p. 1-15. 1992.
- HUANG, Yunfei; ZHANG, Peng; QIN, G. Investigation by numerical modeling of the mechano-electrochemical interaction at a dent-corrosion defect on pipelines. Ocean Engineering. China, p. 1-14. 2022.
- HUANG, Yunfei; ZHANG, Peng. Strain response analysis of API 5L X80 pipelines with a constrained dent subjected to internal pressure. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021
- HUEI-HUANG, Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021: Theory, Applications, Case Studies. SDC Publications: Misson, KS, USA, 2021.
- ISO, International Organization for Standardization. 2000. ISO 13703:2000 (E) - Petroleum and natural gas industries - Design and installation of piping systems on offshore production platforms. 2000.
- ISO, International Organization for Standardization. 2009. ISO 13623:2017 (E) - Petroleum and natural gas industries - Pipeline transportation systems. 2017.
- JAJO, Jandark Oshana. Dent behaviour of steel pipes under pressure load. 2013. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil And Environmental Engineering, University Of Windsor, Canada, 2013.

JIN, Zhi-Jiang; QIU, Chang; CHEN, Zhan-feng; YAN, Sunting. Integrity Assessment of The Pipelines Containing an Isolated Corrosion Pit. *Engineering Failure Analysis*. p. 1-8. 2020.

LIMA, Marco Aurélio Oliveira *et al.* Análise de Métodos para Avaliar Dutos com Dano Mossa e Sulco. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 298-306, 2010.

MAAS, Steve A.; ELIIS, Benjamin J.; RAWLINS, David S.; WEISS, Jeffrey A. Finite element simulation of articular contact mechanics with quadratic tetrahedral elements. *Journal of Biomechanics*. p. 1-9. 2016.

MANUAL DE INSTRUÇÕES DO USUÁRIO (HELP). ANSYS Mechanical. 2020.

MODAL Dutoviário. 2016. Disponível em: <http://dutosnobrasil.blogspot.com/2016/08/os-dutos-rigidos-sao-caracterizados-por.html>. Acesso em: 11 ago. 2022.

MORAIS, José Mauro de. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da petrobras na exploração e produção offshore*. Brasília: Ipea, 2013.

MOTTA, Renato S.; CABRAL, Hélder L.D.; AFONSO, Silvana M.B.; WILLMERS-DORF, Ramiro B.; BOUCHONNEAU, Nadège; LYRA, Paulo R.M.; ANDRADE, Edmundo Q. de. Comparative Studies for Failure Pressure Prediction of Corroded Pipelines. *Engineering Failure Analysis*, v. 81, p. 178-192. 2017.

NEPOMUCENO, João L. A. Investigação computacional do fator de nepo para previsão de pressão de falha de dutos curvos com defeitos internos de corrosão. 2023. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

NOGUEIRA, Livia Mendonça. Análise limite de dutos amassados ou corroídos. 2014. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NUNES, Cristian Duarte. Estudo de reparo por dupla calha em dutos rígidos com defeito tipo moosa com cava. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

OKODI, Allan; LI, Yong; CHENG, J.J.R.; KAINAT, Muntaseer. Effect of location of crack in dent on burst pressure of pipeline with combined dent and crack defects. *Journal Of Pipeline Science And Engineering*. p. 252-263. 2021.

PEPPER, Darrell W.; HEINRICH, Juan C. *The finite element method: basic concepts and applications*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, p. 312, 2006.

PIMENTEL, Júlio Tenório. Ferramentas automáticas para análise de dutos com perfis de corrosão complexos. 2014. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

PODER 360. 2019. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/economia/ampliar-malha-de-gasodutos-demanda-r-17-bi-em-investimentos-diz-epe/>. Acesso em 30 jan. 2024.

PRADO, Diogo Diederichs. Desmobilização de dutos em sistemas marítimos de produção de petróleo: uma proposta de método de suporte ao planejamento. 2015. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

RAFI, Abu Naim Md. Structural behaviour of dented pipelines. 2011. 307 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil And Environmental Engineering, University Of Windsor, Canada, 2011.

RIAGUSOFF, Ivan I. T.; KENEDI, Paulo P.; SOUZA, Luís F. G. de S.; PACHECO, Pedro M. C. L. P. Modeling pipe cold bending: a finite element approach. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6. Compina Grande, 2010.

ROBERTSON, A.; LI, H.; MACKENZIE, D. Plastic collapse of pipe bends under combined internal pressure and in-plane bending. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Glasgow, v. 82, p. 407-416, 2005.

ROOVERS, Paul; BOOD, R.; GALLI, M.; MAREWSKI, U. EPRG methods for assessing the tolerance and resistance of pipelines to external damage. Researchgate. Amsterdam, p. 1-15. 2000.

SHOU, K.J.; HUANG, C.C. Numerical analysis of straight and curved underground pipeline performance after rehabilitation by cured-in-place method. Underground Space, p. 30-42, 2020.

SHUAI, Yi; SHUAI, Jian; ZHANG, Xiao. Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure. Natural Gas Science and Engineering, China, p. 81-92. 2018.

SILVA, Gabriel Hattori da. Escolha de parâmetros para análise de contato entre corpos elásticos usando elementos finitos e redes neurais. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SOUSA, José Manoel de. Análise da integridade estrutural em dutos de condução de petróleo e gás com incidência de mochas. 2017. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SOUSA, José Renato M. de *et al.* Structural response of a flexible pipe with damaged tensile armor wires under pure tension. Marine Structures. Rio de Janeiro, p. 1-38. 2014.

SOUZA, Antônio Henrique Tenório de. Ferramentas computacionais para análise de dutos com defeitos de corrosão. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SUN, Jialin; CHENG, Y. Frank; WOO, Janine; KAINAT, Muntaseer. Assessment of interaction between a dent and an adjacent corrosion feature on pipelines and the effect on pipeline failure pressure by finite-element modeling. American Society Of Civil Engineers. Canada, p. 1-8. 2021.

TIAN, Xiao; LU, Minxu. Failure mechanism of long-distance pipelines having gouged dents. Engineering Failure Analysis. China, p. 1-13. 2022.

TORRES, Ayrton Silva Guimarães. Soldagem de reparo em dutos de transporte pressurizados e em operação. 2016. 47 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Soldagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

VEIGA, Jordana Luiza Barbosa da Costa. Análise de critérios para aceitação de enrugamento em dutos curvados a frio. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

WANG, Junqiang; SHUAI, Yi; FENG, Can; ZHANG, Ping. Multi-dimensional mechanical response of multiple longitudinally aligned dents on pipelines and its effect on pipe integrity. Thin-Walled Structures. China, p. 1-16. 2021.

ZHANG, Peng; HUANG, Yunfei; WU, Ying; MOHAMED, Hazem S. Investigations on the re-rounding performance of dented-pipelines at the service and shutdown stages. Engineering Failure Analysis. China, p. 1-13. 2020.

ZHAO, Jian; CHENG, Y. Frank. A new criterion based on strain determination for dent assessment of pipelines. Journal Of Pipeline Science And Engineering. Canada, p. 1-11. 2021.

ZIENKIEWICZ, O.C.; TAYLOR, R.L. The Finite Element Method. 5ª ed. 689 f. Barcelona. 2000.