



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

ARMANDO ANTONIO DE SÁ BARRETO CRUZ

**SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA PARA PREVISÃO DA PRESSÃO DE FALHA  
DE DUTOS CORROÍDOS COM REPARO POR MATERIAL COMPÓSITO  
SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA E CARREGAMENTO TÉRMICO**

Recife

2019

ARMANDO ANTONIO DE SÁ BARRETO CRUZ

**SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA PARA PREVISÃO DA PRESSÃO DE FALHA  
DE DUTOS CORROÍDOS COM REPARO POR MATERIAL COMPÓSITO  
SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA E CARREGAMENTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C957s Cruz, Armando Antonio de Sá Barreto.  
Simulação multifísica para previsão da pressão de falha de dutos corroídos com reparo por material compósito submetidos à pressão interna e carregamento térmico / Armando Antonio de Sá Barreto Cruz. – 2019.  
76 folhas, figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Dutos. 3. Materiais compósitos. 4. Reparo.  
5. Método dos elementos finitos. 6. Simulação multifísica. I. Silva, Nadège Sophie Bouchonneau da. (Orientadora). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2019-197

ARMANDO ANTONIO DE SÁ BARRETO CRUZ

**SIMULAÇÃO MULTIFÍSICA PARA PREVISÃO DA PRESSÃO DE FALHA  
DE DUTOS CORROÍDOS COM REPARO POR MATERIAL COMPÓSITO  
SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA E CARREGAMENTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 18/02/2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Nadège Sophie Bouchonneau da Silva (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof.<sup>o</sup>. Dr. José Maria Andrade Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof.<sup>o</sup>. Dr. Jorge Antonio Palma Carrasco (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e me indicaram qual caminho a seguir.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por me acompanhar nessa trajetória, em especial aos meus pais e a minha irmã.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Nadège Bouchonneau, por todos os ensinamentos, paciência e incentivo que permitiu a conclusão deste trabalho. Obrigado pela confiança e oportunidade!

À Érica, pela compreensão e incentivo por toda essa jornada.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, bem como aos professores e ao colega Elder Silva por sua disponibilidade e conhecimento repartido.

À Emypro e aos colegas de trabalho, que acompanharam e permitiram o andamento dessa jornada.

Ao apoio financeiro da CAPES, FACEPE e CNPq.

## RESUMO

Dutos de aço estão sujeitos a intempéries do ambiente, assim, podem sofrer deterioração adversa sob a forma de corrosão, rachaduras, desgaste, ondulações, vazamento e ruptura. Visando diminuir acidentes com a requisição de menor valor financeiro, reparos localizados com luvas de materiais compósitos apresentam um bom potencial de utilização com relativo baixo custo e, se bem dimensionados, boa segurança. Uma característica importante na seleção de materiais para uso em conjunto com dutos é a temperatura, já que óleos em geral apresentam um melhor escoamento em temperaturas mais altas. Neste trabalho é apresentada uma modelagem numérica e simulações computacionais utilizando o *software* comercial COMSOL Multiphysics® baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), em que a validação dos modelos é realizada a partir de dados experimentais disponíveis na literatura para um duto íntegro, um duto com desgaste e um duto desgastado com luva de material compósito, constituído de fibra de vidro e epóxi. Os resultados numéricos apresentaram boa acurácia com erros na pressão de falha de 1,8%, 2,9% e 2,1% respectivamente em comparação com dados experimentais. Após validação dos modelos, três estudos foram elaborados: o primeiro foi um estudo paramétrico buscando verificar o impacto da dimensão do defeito no dimensionamento de um reparo de luva compósita. Verificou-se que existe uma tendência para elevação das tensões no defeito com o aumento da largura e uma diminuição das tensões com o aumento do comprimento em um desgaste com formato retangular. Contudo, as simulações realizadas apresentaram diferença de tensão máxima não superior a 3%, ou seja, não apresentando significância relevante no dimensionamento do reparo. O segundo estudo buscou a influência de colônias de defeito em dutos reparados, o que também não apresentou significância no dimensionamento de reparo. O terceiro estudo ocorreu com uma análise de efeitos térmicos com intuito da aplicação de luvas compósitas em dutos com temperatura acima da temperatura ambiente. As simulações multifísicas indicaram que o carregamento térmico teve um impacto significativo nos resultados e deve ser considerado nos estudos de integridade de reparos compósitos para garantir sua segurança operacional.

Palavras-chave: Dutos. Materiais compósitos. Reparo. Método dos elementos finitos. Simulação multifísica.

## ABSTRACT

Steel pipes are subjected to environmental weathering, thus, they can suffer adverse deterioration in the form of corrosion, cracks, wear, undulations, leakage and rupture. In order to reduce accidents while ensuring lower financial value, localized repairs with sleeves of composite materials present a good potential of use with relatively low cost and, if well dimensioned, are safe. An important feature in the selection of materials to be used with pipelines is the temperature, since oils generally have a better flow at higher temperatures. In this work a numerical modeling and computational simulations were presented using the COMSOL Multiphysics® commercial software, based on Finite Element Method (FEM), where the validation of the models is performed out from experimental data available in literature for a complete pipe, a worn pipe and a worn pipe with a composite material sleeve, consisting of glass fiber and epoxy. Numerical results presented good accuracy, with errors in the failure pressure of 1.8%, 2.9% and 2.1%, respectively, compared with experimental data. After the validation of the models, three studies were performed: the first was a parametric study aiming to verify the impact of the defect size on the design of a composite sleeve repair. It was verified that there stresses tend to increase in the defect region with the increase of the width and stresses tend to decrease with the increase of the length in a rectangular shaped wear. Nevertheless, the numerical simulations presented a maximum stress difference less than 3%, which is not leading to significant effect in the design of the repair. The second study aimed to investigate the influence of defect colonies on repaired pipes, which also was not significant in the repair dimensioning. The third study was carried out with an analysis of thermal effects for the application of composite sleeve in pipes with temperature above room temperature. The multiphysical simulations indicate that the thermal load had a significant impact on results and must be considered in the composite repair integrity studies, in order to guarantee its operational safety.

Keywords: Pipes. Composite materials. Repair. Finite element method. Multiphysics simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frequência histórica de causas de acidentes em dutos transportando produtos frios e quentes .....	17
Figura 2 - Classificação dos compósitos poliméricos .....	23
Figura 3 - Fotomicrografia de carbeto cimentado WC-Co. Áreas claras é a matriz de cobalto e áreas escuras são partículas de carbeto de tungstênio .....	24
Figura 4 - Imagem obtida por microscopia eletrônica da matriz composta de resina polimérica reforçada com fibras de carbono .....	24
Figura 5 - Diagrama esquemático de um painel em sanduíche com recheio em colmeia .....	24
Figura 6 - Esquema de compósito reforçado com fibra unidirecional, bidirecional e multidirecional .....	25
Figura 7 - Nível de observação e abordagem para compósitos .....	26
Figura 8 - O estado de tensão em um ponto .....	28
Figura 9 - Coordenadas de lâminas (A) unidirecional e (B) bidirecional .....	29
Figura 10 - Envelopes de falha para lâmina unidirecional de carbono/epóxi sob carga normal biaxial .....	32
Figura 11 - Envelopes de falha para lâmina unidirecional de carbono/epóxi sob carga transversal normal e cisalhamento .....	32
Figura 12 - Representação das tensões normais atuantes em um vaso de pressão de paredes finas .....	35
Figura 13 - Diagrama de corpo livre para determinar a tensão circunferencial .....	35
Figura 14 - Diagrama de corpo livre para determinar a tensão radial .....	35
Figura 15 - Representação esquemática de algumas formas de corrosão .....	39
Figura 16 - Representação de perda de material em tubulações .....	39
Figura 17 - Sistema de reparo por luva de material compósito .....	42
Figura 18 - Esquematização simplificada da metodologia aplicada .....	49
Figura 19 - Subrotinas da metodologia aplicada .....	50
Figura 20 - Região plástica da curva tensão x deformação verdadeira do aço utilizado para validação do modelo .....	51
Figura 21 - Dimensões do desgaste de superfície .....	52
Figura 22 - Planos de simetria .....	52
Figura 23 - Configuração para alteração de coordenada aplicada no <i>software</i> COMSOL Multiphysics .....	53

Figura 24 - Representação gráfica do sistema de coordenadas do material .....	53
Figura 25 - Malhas gerada em diferentes graus de refinamento.....	54
Figura 26 - Gráfico de convergência de malha.....	55
Figura 27 - Esquema de um reparo com luva de material compósito .....	56
Figura 28 - Foto de defeitos ensaiados por Benjamin <i>et al.</i> (2005).....	57
Figura 29 - Curvas tensão x deformação de engenharia para aço A-106Gr.B em estado novo .....	58
Figura 30 - Comparativos de resultados experimentais analíticos e numéricos.....	61
Figura 31 - Marcação no corpo de prova de dimensões e espessuras medidas em mm.....	62
Figura 32 - Tensão equivalente de von Mises em MPa para pressão interna de falha (a) Caso 1 com pressão de 28,1 MPa (b) Caso 2 com pressão de 14,2 MPa.....	63
Figura 33 - Fator de segurança do caso 4 na pressão de falha do duto (28,5 MPa) .....	63
Figura 34 -Tensão equivalente de von Mises em MPa para pressão interna de falha para caso 2 com pressão de 14,2 MPa em detalhe do defeito .....	64
Figura 35 - Tubo para caso 4 após ensaio experimental.....	64
Figura 36 - Evolução da tensão máxima com as dimensões do reparo compósito .....	65
Figura 37 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) na pressão de falha com a respectiva dimensão de desgaste.....	66
Figura 38 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) na pressão de falha de 28,5 MPa.....	67
Figura 39 - Distribuição de temperatura para temperatura interna de 60°C e 120°C .....	68
Figura 40 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) para a pressão de falha com a respectiva temperatura interna .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade e extensão de dutos em operação em 31/12/2017 .....	34
Tabela 2 - Tipos usuais de reparos temporários .....	40
Tabela 3 - Tipos usuais de reparos permanentes .....	41
Tabela 4 - Limite superior da temperatura de aplicação do laminado de reparo.....	44
Tabela 5 - Propriedades do aço utilizado para validação do modelo .....	51
Tabela 6 - Propriedades do material compósito com fibra de vidro.....	51
Tabela 7 - Propriedades da resina epóxi para material de enchimento .....	51
Tabela 8 - Mudança de coordenadas .....	53
Tabela 9 - Dimensões de desgaste investigadas no estudo paramétrico .....	56
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-106 Gr. B nas temperaturas de 25 °C e 200 °C.....	58
Tabela 11 - Propriedades térmicas do aço ASTM A-106 Gr. B.....	58
Tabela 12 - Propriedades do material epóxi (DGEBA/LY556) + endurecedor amina DDS ...	59
Tabela 13 - Propriedades de fibra de vidro S-2 GLASS® .....	59
Tabela 14 - Propriedades do material compósito com epóxi DGEBA/LY556 e fibra de vidro S-2 GLASS com proporção de 60% de fibra .....	59
Tabela 15 - Propriedades do material epóxi PolyAnchor 4100 HTP .....	59
Tabela 16 - Tensão máxima de von Mises no duto, para pressão de falha, na respectiva dimensão de reparo .....	65
Tabela 17 - Perda percentual de resistência de duto com colônias de defeitos.....	67
Tabela 18 - Tensão máxima de von Mises e pressão de falha obtidos nos dutos.....	67
Tabela 19 - Pressões obtidas em relação a aplicação do carregamento térmico .....	69

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CONCAWE	Conservation of Clean Air and Water in Europe
FPF	First Ply Failure
FRP	Fibre Reinforced Polymer
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GOST	Gosudarstvennyye Standarty
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
NTSB	National Transportation Safety Board
SMYS	Specified Minimum Yield Strength
ULF	Ultimate Laminate Failure
UPGN	Unidade de Processamento de Gás Natural

## LISTA DE SÍMBOLOS

C	Margens erosão
$c_p$	Calor específico [J/(kg·K)]
D	Diâmetro externo [mm]
d	Diâmetro interno [mm]
E	Módulo de elasticidade (Módulo de Young) [Pa]
F	Força [N]
$F_a$	Carga axial aplicada [N]
$F_{sh}$	Carga cisalhante aplicada [N]
G	Módulo de elasticidade transversal [Pa]
$h_{con}$	Coefficiente de transferência por convecção [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
HDT	Temperatura de deflexão ao calor [K]
k	Coefficientes de condutividade térmica [W/(m·K)]
L	Comprimento [mm]
$M_a$	Momento axial aplicado [N·mm]
$M_t$	Momento torcional aplicado [N·mm]
P	Pressão interna [Pa]
$P_{f\ autor}$	Pressão interna de falha obtida pelo autor [Pa]
$P_{f\ Exp}$	Pressão interna de falha obtida por dados experimentais [Pa]
Q	Fluxo térmico [W/m <sup>2</sup> ]
r	Raio interno [m]
S	Tensão cisalhante [Pa]
$S_h$	Tensão admissível do material na temperatura de projeto [Pa]
$S_\varepsilon$	Deformação limite [-]
T	Temperatura [K]
T	Espessura de parede do duto [mm]
Tg	Temperatura de transição vítrea [K]
V	Volume [m <sup>3</sup> ]
$V_f$	Fração volumétrica de fibra [-]

$V_m$	Fração volumétrica de matriz [-]
$X$	Limite de resistência de uma fibra na direção 1 [Pa]
$Y$	Limite de resistência de uma fibra na direção 2 [Pa]
$x$	Coordenadas no eixo x [m]
$y$	Coordenadas no eixo y [m]
$z$	Coordenadas no eixo z [m]

### **Letras gregas**

$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica [1/K]
$\gamma$	Deformação cisalhante [-]
$\varepsilon$	Deformação [-]
$\nu$	Coefficiente de Poisson [-]
$\rho$	Densidade [kg/m]
$\sigma$	Tensões [Pa]
$\sigma_e$	Tensão de escoamento [Pa]
$\sigma_{eq}$	Tensão equivalente de von Mises [Pa]
$\tau$	Tensão de cisalhamento [Pa]

### **Índices subscritos gerais**

$c$	Compressão
$eq$	Equivalente
$f$	Fibra
$m$	Matriz
$R$	Ruptura
$t$	Tração
$1$	Direção 1
$2$	Direção 2

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	18
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>23</b>
3.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	23
3.1.1	Compósitos laminados .....	24
3.1.2	Propriedades mecânicas do laminado para compósitos reforçados com fibras.....	27
3.1.3	Modelagem matemática e teorias de falhas para compósitos laminados .....	28
3.1.3.1	<i>Critério da Máxima Tensão e Deformação Máxima.....</i>	<i>30</i>
3.1.3.2	<i>Critério de Tsai-Hill.....</i>	<i>30</i>
3.1.3.3	<i>Critério de Tsai-Wu.....</i>	<i>31</i>
3.1.3.4	<i>Critério de Hashin.....</i>	<i>31</i>
3.1.3.5	<i>Representação gráfica de teorias de falha aplicadas a laminados.....</i>	<i>32</i>
3.2	DUTOS.....	33
3.2.1	Projeto de tubulações.....	34
3.2.2	Corrosão como falha em dutos.....	37
3.3	REPAROS DE DUTOS .....	40
3.3.1	Métodos de reparos em dutos .....	40
3.3.2	Reparos tipo luva baseados em materiais compósitos.....	41
3.3.3	Normas aplicadas a reparos de dutos com uso de material compósito .....	42
3.4	EFEITOS TÉRMICOS .....	44
3.5	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	45
3.5.1	MEF Fase 1 - Pré-processamento.....	45
3.5.2	MEF Fase 2 - Processamento .....	47
3.5.3	MEF Fase 3 – Pós-processamento.....	47
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>48</b>
4.1	ETAPAS DO TRABALHO .....	48
4.2	MODELO PARA VALIDAÇÃO NUMÉRICA .....	50
4.2.1	Propriedades de materiais e geometria.....	51
4.2.2	Implementação do modelo no software COMSOL Multiphysics .....	52

4.2.2.1	<i>Geometria e propriedades dos materiais</i> .....	52
4.2.2.2	<i>Condições de contorno</i> .....	54
4.2.2.3	<i>Malha</i> .....	54
4.2.2.4	<i>Condições de falha</i> .....	55
4.3	MODELO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA E DO COMPRIMENTO DO REPARO COMPÓSITO .....	56
4.4	MODELO PARA ESTUDO SOBRE INFLUÊNCIA DE COLÔNIAS .....	56
4.5	MODELO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA .....	57
4.5.1	Propriedades dos materiais .....	57
4.5.2	Adaptação no modelo validado e condições de contorno .....	60
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
5.1	VALIDAÇÃO NUMÉRICA .....	61
5.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA E DO COMPRIMENTO DO REPARO COMPÓSITO .....	64
5.3	ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE COLÔNIAS .....	67
5.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA .....	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Dutos é uma designação genérica de instalação constituída por tubos ligados entre si, incluindo os componentes, destinada ao transporte ou transferência de fluidos (ABNT, 2017). São amplamente empregados no transporte de gás, petróleo e seus derivados, sendo de fundamental importância no setor petroquímico e energético, principalmente devido às suas características de custo e segurança.

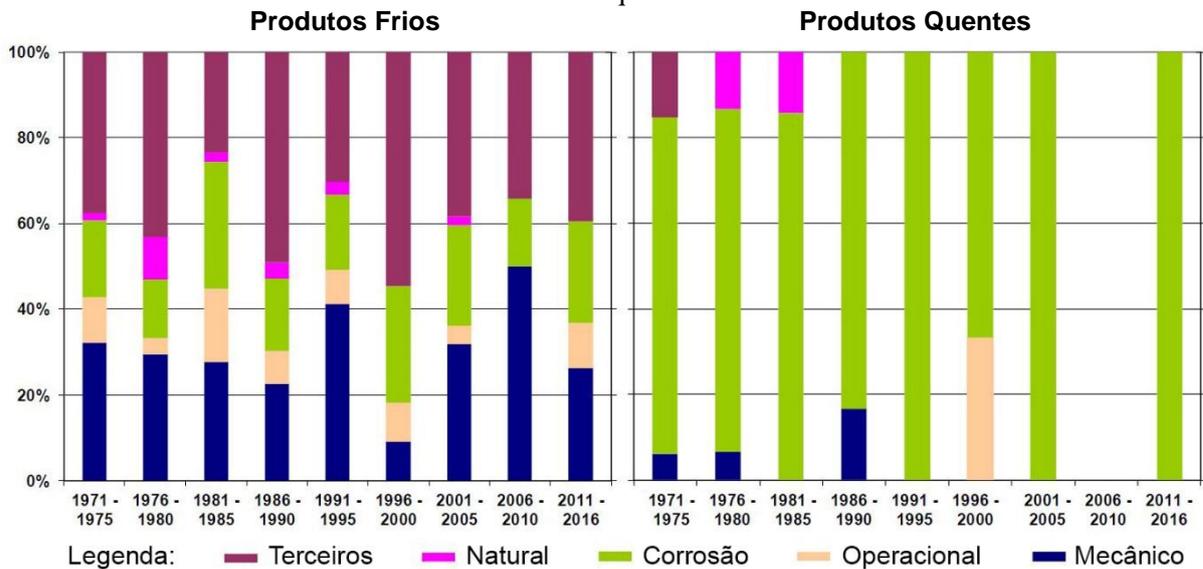
Apesar do elevado investimento inicial, é possível observar que o transporte de grandes quantidades de combustíveis fósseis por meio de malhas de dutos é significativamente mais barato do que o transporte por meio rodoviário, ferroviário ou mesmo marítimo. Em comparação com os outros meios de transporte, dutos se apresentam como o meio mais seguro, confiável e de maior regularidade para o transporte através de vastas extensões territoriais, segundo dados do Gabinete para a Segurança de Dutos do órgão norte-americano *National Transportation Safety Board* (NTSB, 2002).

No entanto, os dutos de aço estão sujeitos a intempéries do ambiente, podendo ser montados aéreos, subaquáticos e subterrâneos. Assim estão sujeitos a deterioração adversa sob a forma de corrosão, rachaduras, abas, desgaste, ondulações, goivadura, fissuras, vazamento e ruptura.

O Grupo de Gerenciamento de Oleodutos da *Conservation of Clean Air and Water in Europe* (CONCAWE), organização europeia que congrega diversas companhias petrolíferas, elabora periodicamente relatórios com dados estatísticos sobre acidentes em linhas de oleodutos ocorridos a partir de 1971. Distinguindo-se dutos com transporte de produtos à temperatura ambiente (produtos frios) com produtos em temperaturas superiores a temperatura ambiente (produtos quentes) é obtido o gráfico reproduzido na Figura 1 (CONCAWE, 2018). É possível observar que historicamente para produtos quentes, existe uma predominância da corrosão como causa de falhas. Para produtos frios, outros fatores apresentam maior incidência, mas ainda assim a corrosão é um fator relevante.

Visando diminuir acidentes com a requisição de menor valor financeiro, reparos localizados são muito mais vantajosos que uma troca completa de um trecho de tubo, dessa forma, diversas técnicas com utilização de materiais distintos são utilizadas atualmente, apresentando materiais compósitos um bom potencial de utilização.

Figura 1 - Frequência histórica de causas de acidentes em dutos transportando produtos frios e quentes



Fonte: adaptado de CONCAWE (2018).

O uso de compósitos em estruturas, principalmente os FRPs (*Fibre reinforced polymer composites*) que são matrizes poliméricas como epóxis, poliésteres insaturados e ésteres de vinil, reforçados com fibras como carbono, vidro e aramida, tem permitido uma significativa redução no peso destas. Contribui também para melhorar as resistências à corrosão e à fadiga de uma infinidade de componentes de aeronaves, plataformas marítimas, satélites, submarinos, foguetes, veículos automotores, trens de alta velocidade e até mesmo de implantes ortopédicos, dentre outras aplicações.

A reabilitação de oleodutos e gasodutos é uma dessas aplicações recentes de FRPs, em que a utilização destes materiais para o reparo de tubulações defeituosas oferece vantagens únicas em relação às técnicas convencionais de reparação. A eliminação do risco de explosão atribuído à soldagem, o não desligamento da tubulação durante o reparo e a facilidade de manuseio são apenas algumas das vantagens associadas ao reparo com FRP. Códigos de projeto estão em constante adequação de acordo com práticas de mercado e boas práticas de engenharia. Atualmente existem dois códigos de projeto disponíveis para o reparo com FRP de tubulações, que ainda apresentam muitas questões, problemas e melhorias a serem superados para projetos com maior confiabilidade, visto que ambos os códigos são vagos em termos das propriedades mecânicas dos materiais utilizados e outros fenômenos envolvidos.

Uma característica importante na seleção de materiais para uso em conjunto com dutos é a temperatura. Óleos em geral apresentam um melhor escoamento em temperaturas mais altas devido a diminuição da viscosidade. Em baixas temperaturas, como no fundo do oceano, pode

deixar o fluxo com maior resistência a movimentação, havendo inclusive a possibilidade de acúmulo de material nas paredes da tubulação. Assim, o material da tubulação, nem sempre deve ser pensado apenas em uma temperatura fixa. Como exemplo, tem-se a norma NBR 15280-1 (ABNT, 2017) que em seu escopo aplica-se a projeto de dutos com temperaturas compreendidas entre -30 e 120 °C.

De uma forma geral, a resolução de problemas de engenharia pode ser realizada segundo três abordagens gerais: Métodos Analíticos, Métodos Experimentais e Métodos Numéricos. Cada abordagem apresenta suas características, vantagens e desvantagens sendo complementares e não substituindo um ao outro. Os métodos numéricos são os mais recentes, apresentando aplicações práticas apenas por volta da década de 50. Hoje, esta é uma ferramenta fundamental para diversas áreas, com utilização em projetos como ferramenta de previsão/predição de falha.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Considerando que o custo de implantação de dutos é alto, muitas tubulações montadas a mais 50 anos ainda continuam em operação devido aos avanços em inspeção, permitindo que reparos localizados garantam a confiabilidade operacional da estrutura e adaptação a eventuais mudanças nas solicitações originais.

A aplicação de FRPs em tubulações, ainda apresenta muitas questões em aberto em relação a sua aplicação e dimensionamento. Como uma prospecção tecnológica, realizando uma pesquisa na plataforma de revistas científicas *ScienceDirect*, pelos termos "*composite repair*" e "*pipeline*" são retornados 52 resultados no período de 1997 a 2018, caso esses termos sejam restringidos apenas no título, resumo e palavras-chave são retornados apenas 17 resultados.

Com poucos trabalhos desenvolvidos na área, este estudo pretende contribuir para um projeto de reparos mais confiáveis sem o desperdício de recursos, desde a redução de uso de experimentos com a utilização de métodos numéricos até a diminuição do material de reparo sem comprometer a confiabilidade.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Como objetivo geral desta pesquisa, tem-se a realização de simulações numéricas multifísicas e análises de resistência de dutos, com defeitos de perda de material, reparados com emprego de luvas constituídas de materiais compósitos, sob a ação de carregamentos combinados: pressão interna e carregamento térmico.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Realizar um estudo bibliográfico extenso na área de dutos com reparo compósito;
- Gerar modelos de dutos corroídos sem e com reparo utilizando o *software* comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, coerente com os encontrados na literatura;
- Comparar as pressões de falha obtidas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com resultados obtidos por métodos experimentais e métodos analíticos semi-empíricos disponíveis na literatura, com o intuito de validar os modelos;
- Alterar parâmetros dos modelos buscando avaliar a influência de colônias de corrosão e parâmetros de dimensão do dano, submetidos a pressão interna;
- Implementar os fenômenos térmicos nos modelos numéricos para estudar o comportamento estrutural de dutos corroídos com reparos de material compósito, submetidos a carregamentos combinados de pressão interna e temperatura.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em sete capítulos. Este primeiro capítulo traz uma introdução à dissertação, apresentando motivações e descreve como ela está organizada.

O Capítulo 2 (Estado da arte) busca apresentar os principais trabalhos até o presente momento de dissertações de mestrado, teses de doutorado e publicações em periódicos sobre o reparo de dutos com matérias compósitos.

O Capítulo 3 (Fundamentação teórica) apresenta uma breve descrição bibliográfica sobre os diversos aspectos teóricos necessários para o bom entendimento da pesquisa realizada, sendo inicialmente feita uma apresentação sobre dutos, sua aplicação na indústria, dimensionamento e a ocorrência de corrosão. Na sequência são expostos os materiais compósitos e teorias de falhas comumente utilizadas em projetos. São apresentadas também técnicas de reparos de dutos com maior detalhe para a utilização de materiais compósitos e uma descrição de fenômenos térmicos. Por fim, o Método de Elementos Finitos é apresentado com seus conceitos e fundamentos básicos.

No Capítulo 4 (Metodologia) é descrita a metodologia aplicada neste trabalho e apresenta a implementação de modelo computacional utilizando o *software* COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> buscando coerência com resultados experimentais (validação numérica). Também são apresentados três estudos numéricos com focos distintos. O primeiro se refere à influência das dimensões de largura e comprimento de um desgaste retangular com um reparo compósito, o segundo estudo apresenta simulações com agrupamento de defeitos (colônias) e o terceiro estudo apresenta reparo de dutos simulado com a adição de um carregamento térmico.

O Capítulo 5 (Resultados e Discussão) apresenta resultados das simulações numéricas utilizando as ferramentas apresentadas neste trabalho. São comparados com resultados analíticos, numéricos e experimentais disponíveis na literatura.

Por fim, o Capítulo 6 (Conclusões e Recomendações) traz as principais conclusões e considerações deste trabalho, assim como as possíveis contribuições do mesmo e, por fim, o Capítulo 7 (sugestões de trabalhos futuros) apresenta possíveis melhorias e extensões da presente dissertação.

## 2 ESTADO DA ARTE

O uso de materiais compósitos constituídos de polímero reforçado com fibras no reparo de dutos começou no final dos anos 80 (LIM *et al.*, 2016). Desde então, esforços contínuos têm sido feitos por numerosas instituições e empresas para desenvolver seus próprios produtos de reparo compósito, com pesquisa e desenvolvimento. A seguir, são apresentados alguns trabalhos recentes na área.

Em seu estudo utilizando MEF (Método dos Elementos Finitos), Duell, Wilson e Kessler (2008), simularam reforço de dutos de aço danificados usando materiais de polímero reforçado com fibra verificando que a largura do defeito em torno da circunferência teve pouco impacto sobre a pressão de ruptura final do vaso reparado, mas influenciou o estado de tensão do duto.

Alguns trabalhos mostram que o material de preenchimento do dano é muito significativo para assegurar desempenhos de reparo satisfatórios como pode ser visto em Farrag (2013) e Shamsuddoha *et al.* (2013). Se o módulo de compressão do material de enchimento é relativamente baixo, grandes deformações da tubulação podem ocorrer antes que a carga seja transferida para o compósito, no entanto, a atenção detalhada aos materiais de preenchimento é frequentemente omitida.

Uma análise em 3D em escala real foi realizada por Shamsuddoha (2014), para determinar a eficácia do sistema de reparo para tubulações de aço com uma perda localizada de metal. O sistema de reparo usando argamassa com maior resistência forneceu uma maior capacidade de duto, e determinou-se que o sistema de reparo de mangas compostas considerado pode efetivamente restabelecer a capacidade dos dutos com um defeito localizado de até 70% de perda de metal.

Saeed (2015) em sua tese descreve os fundamentos teóricos, os procedimentos experimentais e analíticos para desenvolver uma estrutura de projeto baseado em confiabilidade do reforço de FRP de dutos existentes. Uma de suas conclusões é que o reparo calculado de acordo com o padrão ISO é conservador para a maioria dos casos de projeto. No entanto, proporciona uma espessura de reparo inadequada para situações em que o reparo é aplicado com o duto sob pressão interna, concluindo que essa pressão não apresenta influência.

Ensaio e simulações foram realizados em um duto reparado com carga de flexão por Chan *et al.* (2015). Tanto a simulação como os resultados experimentais demonstraram que o efeito de fortalecimento aumenta à medida que a fibra é alinhada mais próximo do eixo do duto (direção axial). Verificou também que a ligação entre o compósito e a superfície do duto de aço

deve ser estudada, pois pode ser um dos principais fatores causadores das discrepâncias entre a simulação e os resultados experimentais.

O estudo apresentado por Mccready, Knofczynski e Keller (2017) descreve ensaios de flexão destrutiva com pressão interna em doze espécimes de dutos sendo consideradas duas geometrias de dano, uma com perda de material axissimétrica e a outra com uma perda localizada. O duto danificado foi reparado com um compósito instalado e curado no local. Amostras com perdas axissimétricas falharam por fratura e delaminação do compósito, seguidas de ruptura do duto. Os espécimes com perda localizada falharam por fratura do compósito e, em seguida, colapso local do duto nos pontos de aplicação de carga.

Uma avaliação numérica e experimental da pressão de ruptura do duto de aço laminado a quente é apresentada por Mazurkiewicz *et al.* (2017). Os autores usaram um código explícito não linear com modelos constitutivos que permitem a modelagem de falhas de estruturas de aço e compósitos obtendo boa correlação com resultados experimentais em que o duto reparado por uma manga de fibra de vidro com resina epóxi com 6 mm de espessura resultou mais resistente do que um duto de aço original, considerando pressão de ruptura.

Ao fim da revisão bibliográfica, é constatado que foram desenvolvidos alguns trabalhos sobre a avaliação de dutos corroídos com carregamento exclusivo de pressão interna e um único defeito. Em contrapartida, foram desenvolvidos poucos estudos acerca da avaliação de resistência remanescente de dutos sob carregamento combinado de pressão interna em conjunto com outros tipos de carregamento.

Devido a importância desse tipo de estudo, esse trabalho se propõe a estudar o reparo de dutos corroídos com defeitos em colônias com carregamento de pressão interna e também a analisar o efeito sob carregamento combinado de pressão interna e cargas térmicas através do MEF, mostrando a importância da consideração das tensões geradas pela dilatação térmica em ensaios experimentais e avaliando a influência do aumento das temperaturas relativas na diminuição da capacidade de carga dos dutos corroídos.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O reparo de dutos com a utilização de materiais compósitos envolve diversas áreas da engenharia, dessa maneira, nas seções subsequentes é apresentada conceitos necessários para compreensão dos fenômenos físicos envolvidos.

#### 3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Mendonça (2005) o conceito de material compósito é descrito da seguinte maneira:

Um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta (MENDONÇA, 2005, p. 3).

Callister (2007) classifica os compósitos em três grandes grupos como pode ser visto na Figura 2, sendo descritos a seguir:

- Reforçado por partículas: apresentam partículas macroscópicas imersas em uma matriz. Um exemplo que pode ser citado os materiais classificados como cermetos (metais cerâmicos) (Figura 3), outro bastante conhecido é o concreto.
- Reforçado com fibras: formados por fibras longas imersas em uma matriz que atua como transmissora de tensões e protetora das fibras. Sendo bastante comum o uso de fibras de carbono e vidro, imersas em matrizes poliméricas. (Figura 4)
- Compósitos estruturais: combinações de compósitos e materiais homogêneos, inclusive podendo ser de compósitos fibrosos ou particulados. Um bom exemplo são painéis sanduíches. (Figura 5)

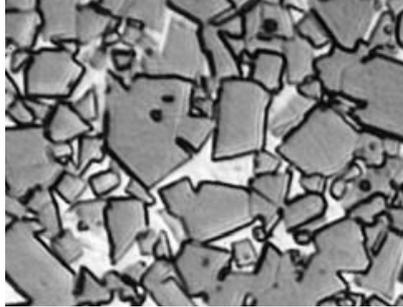
Devido à infinidade de combinações possíveis existentes, neste trabalho serão aprofundados apenas os compósitos estruturais laminados, que são utilizados para reparo de dutos.

Figura 2 - Classificação dos compósitos poliméricos



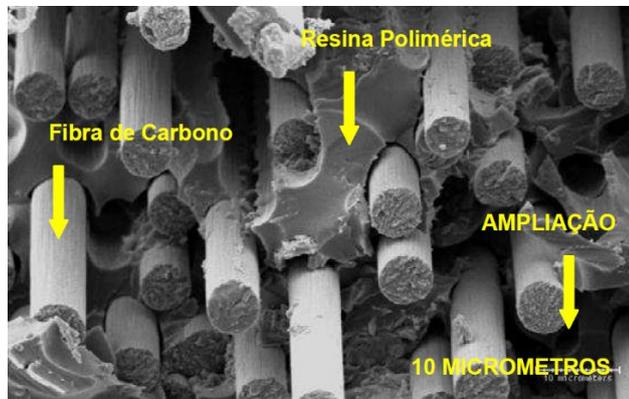
Fonte: Callister (2007).

Figura 3 - Fotomicrografia de carbeto cimentado WC-Co. Áreas claras é a matriz de cobalto e áreas escuras são partículas de carbeto de tungstênio



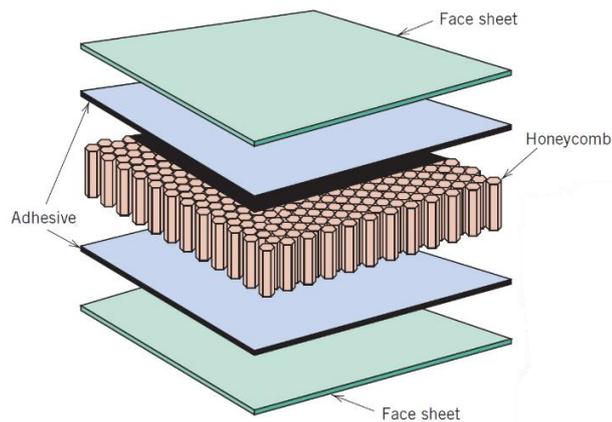
Fonte: Callister (2007).

Figura 4 - Imagem obtida por microscopia eletrônica da matriz composta de resina polimérica reforçada com fibras de carbono



Fonte: Curty (2009).

Figura 5 - Diagrama esquemático de um painel em sanduíche com recheio em colmeia

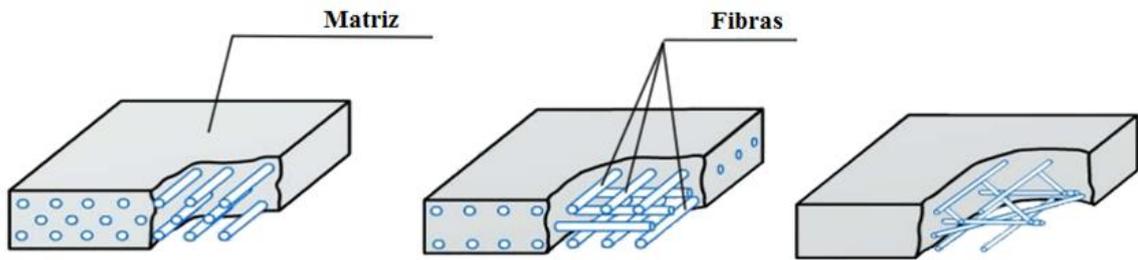


Fonte: Callister (2007).

### 3.1.1 Compósitos laminados

Essa classe de materiais é formada por uma ou pela superposição de várias lâminas, onde cada lâmina é formada por um conjunto de fibras unidirecionais ou multidirecionais embutidas em uma matriz polimérica (Figura 6).

Figura 6 - Esquema de compósito reforçado com fibra unidirecional, bidirecional e multidirecional



Fonte: Biscainho (2017).

Como características podem ser citadas:

- Resistência à corrosão: não enferrujam ou apodrecem e resistem ao ataque da maioria dos produtos químicos industriais, ficando razoavelmente intactos em ambientes hostis;
- Alta resistência e peso leve: fornecem altas razões de força/massa que excedem as de alumínio ou aço;
- Estabilidade dimensional: laminados de alta resistência possuem alta estabilidade dimensional sob diferentes estresses físicos, ambientais e térmicos;
- Flexibilidade de projeto: as aplicações atuais são diversas, variando de cascos de embarcações, para-lamas de carros esportivos, elementos estruturais e até em uso aeroespacial;
- Sensibilidade à radiação: alguns tipos de matrizes poliméricas se degradam por mecanismo de fotodegradação;
- Absorção da umidade ambiente: matrizes também podem apresentar uma absorção considerável da umidade ambiente ocasionando uma perda em propriedades mecânicas do compósito.

Os compósitos laminados podem ser analisados sob óticas diferentes (Figura 7). A ótica micromecânica é aquela em que a análise dos estados de deformações e tensões é realizada considerando a interação entre as fases (fibra e matriz), de forma isolada, observando as interações entre eles, permitindo prever o comportamento de uma lâmina ortotrópica em função das propriedades de seus constituintes. Sob ótica macromecânica é considerado anisótropo quase-homogêneo, sob este ponto de vista o estado de deformações e tensões é associado a lâmina, não mais focalizando em seus constituintes sendo a peça considerada um material homogêneo.

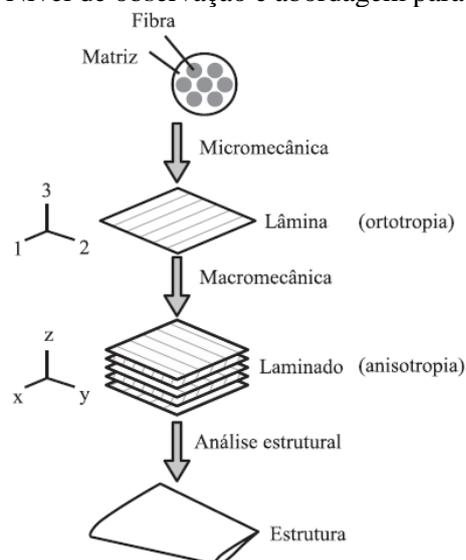
Os três tipos de fibras mais utilizados para reforçar materiais poliméricos são: fibras de vidro, aramida (ou poliamida aromática) e carbono. As fibras de vidro são o reforço mais usado principalmente devido ao seu relativo baixo custo. Elas apresentam alta resistência em relação a sua massa, boa estabilidade dimensional, boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão, boas propriedades de isolamento elétrico e facilidade de fabricação. As fibras de aramida e de carbono apresentam resistência mecânica elevada, densidade baixa e apesar do seu preço mais elevado, são utilizadas em muitas aplicações, especialmente na indústria aeroespacial.

As duas principais classes de resinas são termofixos e termoplásticos. Os termofixos apresentam cadeias poliméricas reticuladas que se tornam sólidas durante uma reação química ou “cura” com a aplicação de um catalisador e calor, sendo a reação essencialmente irreversível. As resinas termofixas mais utilizadas para aplicações em compósitos em geral são poliésteres insaturados, ésteres de vinil, epóxis e a família de poliuretanos.

Os polímeros termoplásticos caracterizam-se por amolecerem e tornarem-se líquidos viscosos quando aquecidos e tornarem-se sólidos quando arrefecidos consistindo em um processo reversível. As resinas termoplásticas permitem tempos de ciclo de moldagem mais rápidos visto que não há reação química no processo de cura. Polipropileno e polietileno são as resinas termoplásticas mais comumente usadas em compósitos. O nylon e o acetil podem também ser usados onde propriedades mecânicas elevadas são exigidas.

Os polímeros costumam apresentar uma significativa relação entre temperatura e propriedades mecânicas, apresentando resistência mecânicas bem inferior em temperaturas como 100 °C ou 200 °C, assim, dois parâmetros importantes como caracterização são a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e a temperatura de deflexão ao calor (HDT).

Figura 7 - Nível de observação e abordagem para compósitos



Fonte: Daniel e Ishai (2006).

De maneira geral, entende-se como temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) a temperatura abaixo da qual um polímero amorfo se torna duro e frágil (estado vítreo), e acima da qual o mesmo polímero é macio (estado “borrachoso”), podendo ser determinada por normativas como a norma ASTM E1142-15. Já a temperatura de deflexão ao calor (HDT) é aquela na qual se observa um decréscimo pronunciado da resistência mecânica, esta temperatura pode ser determinada pela norma ASTM D648.

### 3.1.2 Propriedades mecânicas do laminado para compósitos reforçados com fibras

As propriedades macroscópicas de um laminado dependem das propriedades das lâminas individuais (e seus componentes), além da ordem e orientação das lâminas. Durante as etapas de desenvolvimento de projeto, ensaios de peças acabadas são inviáveis, sendo importantes formas de estimar tais parâmetros a partir do conhecimento das propriedades dos seus constituintes (matriz e fibra), da proporção em que são agregados e a direção dada ao reforço, sendo esse o propósito básico da micromecânica da lâmina.

A seguir, são apresentadas algumas equações da micromecânica mais conhecidas e tradicionais na literatura para a estimativa das principais propriedades elásticas, térmicas e de resistência de uma lâmina conforme Mendonça (2005).

Um método matemático bastante comum é a chamada regra de mistura cuja formulação é dada pela equação (1), onde  $V_f$  e  $V_m$  são a fração volumétrica da fibra e da matriz respectivamente.

$$(\text{propriedade } A)_c = (\text{propriedade } A)_f V_f + (\text{propriedade } A)_m V_m \quad (1)$$

Conforme Mendonça (2005), essa regra é admissível para as propriedades cujas equações são apresentadas de (2) a (5), com alguma manipulação.

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2)$$

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

$$X_t = \sigma_{fR} \left[ V_f \left( 1 - \frac{E_m}{E_f} \right) + \frac{E_m}{E_f} \right] \quad (4)$$

$$v_{12} = v_f V_f + v_m V_m \quad (5)$$

Essa metodologia não é muito adequada para obtenção de outras propriedades, sendo mais coerente a utilização das equações apresentadas de (6) a (11) que são utilizadas neste trabalho e apresentadas em mais detalhes em Mendonça (2005).

$$E_2 = E_m \left[ (1 - \sqrt{V_f}) + \frac{\sqrt{V_f}}{1 - \sqrt{V_f} (1 - E_m/E_f)} \right] \quad (6)$$

$$Y_t = \sigma_{mR} \left( \frac{E_2}{E_m} \right) (1 - V_f^{1/3}) \quad (7)$$

$$v_{21} = \frac{E_2}{E_1} v_{12} \quad (8)$$

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad \text{com:} \quad \eta = \frac{G_f/G_m - 1}{G_f/G_m + \zeta} \quad e \quad \zeta = 1 + 40V_f^{10} \quad (9)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{E_1} (\alpha_f E_f V_f + \alpha_m E_m V_m) \quad (10)$$

$$\alpha_2 = (1 + v_f) \alpha_f V_f + (1 + v_m) \alpha_m V_m - \alpha_1 v_{12} \quad (11)$$

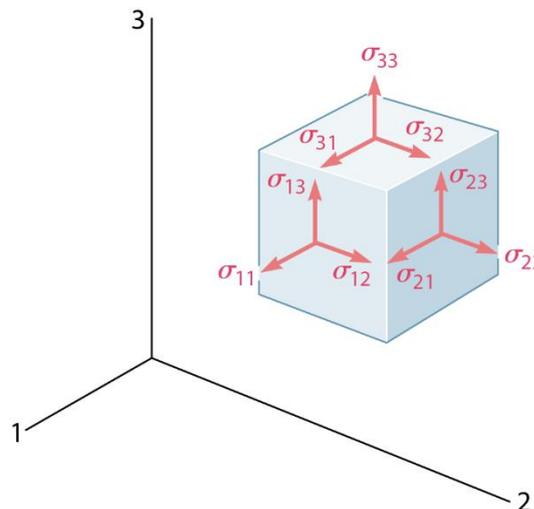
### 3.1.3 Modelagem matemática e teorias de falhas para compósitos laminados

Para fins deste trabalho são consideradas as notações e referências descritas a seguir.

O estado de tensão em um ponto em um meio contínuo pode ser definido por um sistema de coordenação cartesiana apresentado por  $\sigma_{ij}$ , em que  $i, j$  são iguais a 1, 2, 3 em que o primeiro subíndice ( $i$ ) mostra o plano em que a tensão está atuando e o segundo ( $j$ ) mostra a direção da tensão. A Figura 8 mostra o estado de tensão em um ponto.

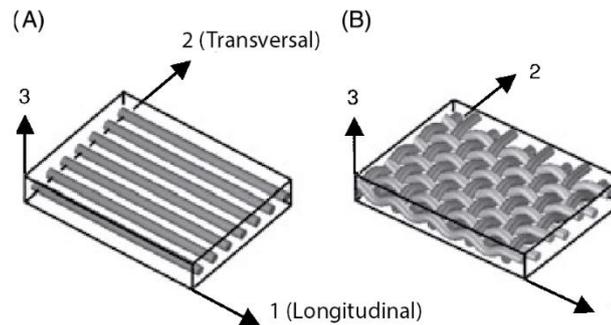
Materiais compósitos fibrosos geralmente são fabricados em lâminas, sendo então frequentemente tratadas como uma camada ortotrópica quase homogênea no plano. Os eixos 1, 2 e 3 são o eixo principal como mostrado na Figura 9.

Figura 8 - O estado de tensão em um ponto



Fonte: Adaptado de Beer *et al.* (2012).

Figura 9 - Coordenadas de lâminas (A) unidirecional e (B) bidirecional



Fonte: Daniel (2007).

Com esses conceitos definidos, a análise de falha de um laminado pode guiar-se por dois conceitos: falha da primeira camada (FPF - “*first ply failure*”) ou falha última do laminado (ULF - “*ultimate laminate failure*”). Em uma abordagem FPF, considera-se que a falha do laminado ocorre quando a primeira camada (ou grupo de camadas) falha. Por outro lado, a abordagem ULF considera que a falha do laminado ocorrerá quando todas as camadas apresentarem falha. A abordagem FPF, mais conservadora, requer somente a aplicação de um critério de falha. Verificando-se a ocorrência de algum tipo de falha, considera-se a falha total do componente. Em um conceito ULF, além dos critérios de falha, são necessárias leis de degradação das propriedades mecânicas em decorrência do processo de falha, uma vez que o processo é progressivo, iterativo, com redistribuição dos esforços pelas camadas (ANGÉLICO, 2009).

De acordo com Daniel e Ishai (2006), as teorias de falha podem ser classificadas em três grupos:

- Não-iterativos: modos de falha determinados comparando-se componentes individuais de tensão ou deformação das lâminas com os valores de resistência.  
Exemplo: Critérios da Máxima Tensão e Máxima Deformação.
- Interativos: todos os componentes de tensão ou deformação estão incluídos numa única expressão. Em geral, não se tem uma identificação do modo de falha.  
Exemplo: Critério de Tsai-Hill e Critério da Tsai-Wu.
- Baseados em modos de falha: nestes critérios separam-se modos de falha de fibra e de matriz.  
Exemplo: Critério de Hashin.

Existe uma grande variedade de critérios na literatura. Os mais utilizados são apresentados adiante. É importante ressaltar que os critérios apresentados são colocados sob a hipótese de estado plano de tensões.

É considerada a seguinte notação para resistência do material:

$X_T$  e  $Y_T$ : limite de resistência à tração nas direções 1 e 2, respectivamente;

$X_C$  e  $Y_C$ : limite de resistência à compressão nas direções 1 e 2, respectivamente;

$S$ : limite de resistência ao cisalhamento.

### 3.1.3.1 Critério da Máxima Tensão e Deformação Máxima

No critério da máxima tensão, a falha ocorre quando qualquer das componentes de tensão exceder os valores de resistência correspondente aos eixos do material. De acordo com este critério, têm-se as condições de falha no sistema de inequações (12). Nesse critério pode-se identificar o modo de falha, porém, as componentes de tensão não interagem.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_1 < X_t & \rightarrow \text{modo de falha 1} \\ \sigma_2 < Y_t & \rightarrow \text{modo de falha 2} \\ \sigma_1 < -X_c & \rightarrow \text{modo de falha 3} \\ \sigma_2 < -Y_c & \rightarrow \text{modo de falha 4} \\ |\tau_{12}| < S & \rightarrow \text{modo de falha 5} \end{array} \right. \quad (12)$$

O critério de deformação máxima é análogo à teoria de tensão máxima para compósitos e impõe limites nas deformações das direções principais do material e não das tensões, sendo que a falha ocorre de acordo com o sistema de inequações (13).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \varepsilon_1 < X_{\varepsilon t} & \rightarrow \text{modo de falha 1} \\ \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon t} & \rightarrow \text{modo de falha 2} \\ \varepsilon_1 < -X_{\varepsilon c} & \rightarrow \text{modo de falha 3} \\ \varepsilon_2 < -Y_{\varepsilon c} & \rightarrow \text{modo de falha 4} \\ |\gamma_{12}| < S_{\varepsilon} & \rightarrow \text{modo de falha 5} \end{array} \right. \quad (13)$$

### 3.1.3.2 Critério de Tsai-Hill

Dentre os diversos critérios de falha para materiais dúcteis isotrópicos baseados na energia de distorção, tem-se o critério de von Mises que foi modificado por Hill com a introdução da anisotropia (MENDONÇA, 2005), em que adaptando para uma lâmina ortotrópica de um material compósito, obtém-se o critério descrito na equação (14).

Neste critério, não se identifica o modo de falha ocorrido, contudo o índice de falha é calculado a partir de única expressão que reúne as componentes, desta forma é considerado um critério interativo.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (14)$$

### 3.1.3.3 Critério da Tsai-Wu

O Critério de Tsai-Wu é um critério interativo amplamente difundido e utilizado, em que foi proposto aumentar o número de termos na equação do critério de falha de Hill, resultando na equação (15). Assim como o critério anterior, este reúne as componentes do estado de tensão em uma única expressão, o que impossibilita a identificação do modo de falha ocorrido.

$$\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} = 1 \quad (15)$$

### 3.1.3.4 Critério de Hashin

Em 1980 Hashin apresentou um critério para materiais transversalmente isotrópicos. Essa teoria pode ser usada como um conjunto de critérios (equações (16) a (19)), da mesma maneira que o critério de máxima tensão ou como indicador de modo de falha para algum outro método interativo.

1 – Falha de tração nas fibras

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad \text{para} \quad \sigma_1 > 0 \quad (16)$$

2 – Falha de compressão nas fibras

$$\sigma_1 = -X_c \quad \text{para} \quad \sigma_1 < 0 \quad (17)$$

3 – Falha de tração na matriz

$$\frac{\sigma_2^2}{Y_t^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad \text{para} \quad \sigma_2 + \sigma_3 > 0 \quad (18)$$

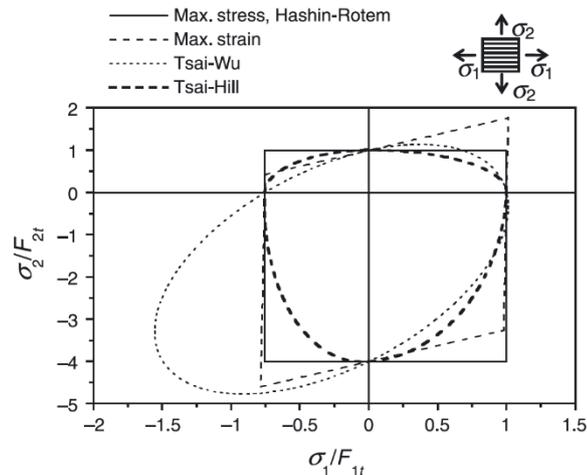
4 – Falha de compressão na matriz

$$\frac{\sigma_2^2}{Y_t^2} \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_2} \right)^2 - 1 \right] + \frac{\sigma_2^2}{4S_2^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad \text{para} \quad \sigma_2 + \sigma_3 < 0 \quad (19)$$

### 3.1.3.5 Representação gráfica de teorias de falha aplicadas a laminados

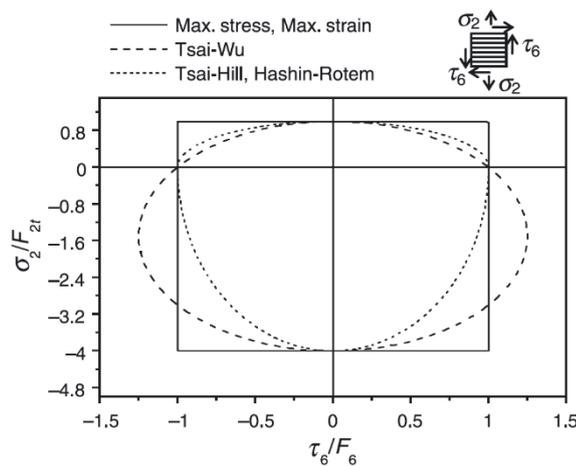
A comparação das teorias apresentadas até o momento pode ser ilustrada graficamente por meio de envelopes de falha para diferentes materiais e diferentes estados. No trabalho de Daniel (2007), foram elaborados os envelopes de falha obtidos por cinco teorias de falha em dois estados biaxiais de tensão ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ) e ( $\sigma_2$  e  $\tau_6$ ), para um compósito carbono/epóxi unidirecional, estando apresentados na Figura 10 e Figura 11 respectivamente.

Figura 10 - Envelopes de falha para lâmina unidirecional de carbono/epóxi sob carga normal biaxial



Fonte: Daniel (2007).

Figura 11 - Envelopes de falha para lâmina unidirecional de carbono/epóxi sob carga transversal normal e cisalhamento



Fonte: Daniel (2007).

### 3.2 DUTOS

Dutos (ou tubos) são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos. A grande maioria dos dutos funciona como condutos forçados, isto é, com o fluido ocupando toda a área da seção transversal (TELLES, 2012).

Esses dutos junto com seus acessórios são denominados como tubulação industrial. São inúmeras as aplicações em indústrias de processamento, químicas, petroquímicas, refinarias de petróleo, alimentícias e farmacêuticas para transportar fluídos (gases, óleos, vapores, lubrificantes e demais líquidos industriais) de uma entrada (bomba), para uma saída (reservatório). Trata-se do meio mais eficiente de transporte de fluidos e gás em diversas aplicações, chegando a representar 70% do custo dos equipamentos, ou 25% do custo total da instalação.

Informações do Anuário Estatístico 2018 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2018), em 2017, apresenta que o parque de refino brasileiro contava com 17 refinarias, com capacidade para processar 2,4 milhões de barris/dia, sendo o gás natural processado em 14 polos produtores, que juntos somavam o volume total de 24,4 bilhões de m<sup>3</sup>. A produção brasileira de derivados de petróleo foi de 110,2 milhões de m<sup>3</sup>. Desse volume, 105,8 milhões de m<sup>3</sup>, 96,1% do total, foram produzidos em refinarias, sendo o restante dividido entre centrais petroquímicas, UPGNs e outros produtores. Para viabilizar a movimentação de petróleo, derivados e etanol no território nacional, o Brasil dispunha de 107 terminais autorizados, totalizando 1.922 tanques. A capacidade nominal de armazenamento foi de cerca de 13,2 milhões de m<sup>3</sup>, dos quais 4,9 milhões de m<sup>3</sup> (37,6% do total) destinados ao petróleo, 7,7 milhões de m<sup>3</sup> (58,8% do total) aos derivados e ao etanol, e 476,7 mil m<sup>3</sup> (3,6% do total) ao GLP.

Diante dessa grande quantidade de produtos, é necessário um meio de movimentação eficaz, seguro e financeiramente viável, sendo os dutos um dos principais meios utilizados para interligação entre terminais, píer, modais ferroviários, pontos de distribuição, etc. Ainda segundo o Anuário Estatístico em 2017, o Brasil contava com 618 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados e outros produtos, perfazendo 19,7 mil km, como descrito e destrinchado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade e extensão de dutos em operação em 31/12/2017

Produtos movimentados	Dutos em operação	
	Quantidade	Extensão (km)
<b>Total</b>	<b>618</b>	<b>19.768</b>
Derivados	435	2.360
Gás natural	110	11.732
Petróleo	32	1.985
Outros <sup>1</sup>	41	77

Fonte: Adaptado de ANP (2018)

<sup>1</sup>Inclui dutos para movimentação de etanol anidro, etanol hidratado, aguarrás e metanol, etano e propano de insumo para petroquímica, gasolina de pirólise e propileno de insumo para indústria petroquímica.

### 3.2.1 Projeto de tubulações

Um duto com parede de espessura ( $t$ ), raio interno ( $r$ ), diâmetro externo ( $D$ ) e pressão interna ( $p$ ) apresentado na Figura 12, poderá ser considerado como um vaso de pressão de paredes finas caso satisfaça a relação  $r/t > 10$ . Quando esses tipos de equipamentos estão apenas sobre esforços da pressão interna, as tensões normais circunferenciais ( $\sigma_1$ ) e axiais ( $\sigma_2$ ) são obtidas por equilíbrio de forças apresentadas nas equações (20) e (21) respectivamente. Os diagramas de corpo livre estão apresentados na Figura 13 e Figura 14, respectivamente. Essas tensões são as tensões principais para o caso de pressão interna.

$$\sum F_z = \sigma_1(2 t \Delta x) - p(2 r \Delta x) = 0 \quad (20)$$

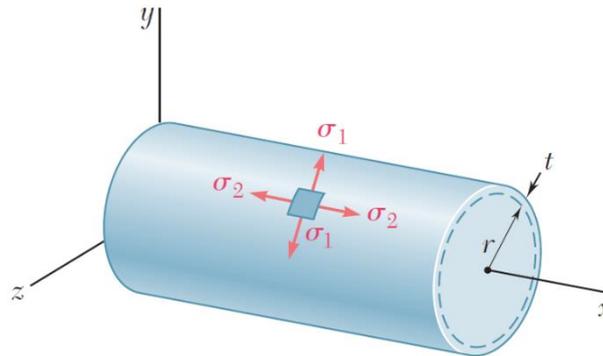
$$\sum F_x = \sigma_2(2 \pi r t) - p(\pi r^2) = 0 \quad (21)$$

Manipulando essas equações e isolando os termos de tensões, obtém-se as equações (22) e (23). Observa-se que a maior tensão para essa condição é na direção circunferencial, sendo duas vezes da tensão axial.

$$\sigma_1 = p r / t \quad (22)$$

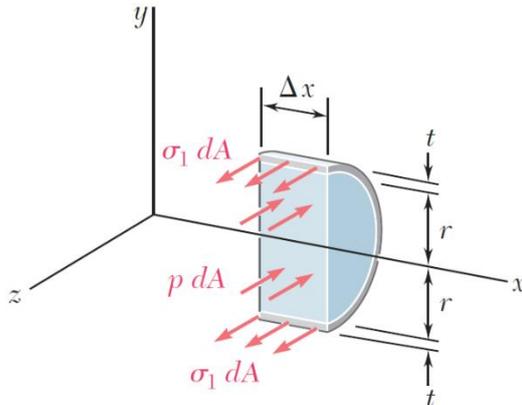
$$\sigma_2 = p r / 2 t \quad (23)$$

Figura 12 - Representação das tensões normais atuantes em um vaso de pressão de paredes finas



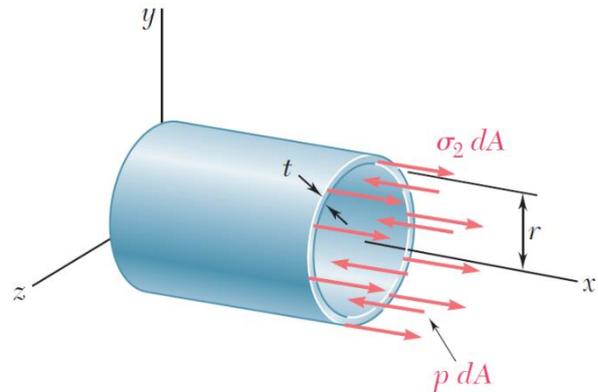
Fonte: Beer *et al.* (2012).

Figura 13 - Diagrama de corpo livre para determinar a tensão circunferencial



Fonte: Beer *et al.* (2012).

Figura 14 - Diagrama de corpo livre para determinar a tensão radial



Fonte: Beer *et al.* (2012).

Além da pressão interna, diversas outras cargas podem ser aplicadas em linhas em operação, sendo algumas delas listadas adiante.

- Pressão externa (tubulações em ambientes sob pressão ou operando com vácuo);
- Peso próprio da tubulação mais o peso do fluido contido, das conexões, válvulas etc.;
- Sobrecargas diversas agindo sobre a tubulação, tais como peso de outros dutos, plataformas e estruturas apoiadas nos dutos, gelo e neve sobre os dutos, peso da terra, pavimentação e veículos (no caso de dutos enterrados), peso de pessoas sobre a tubulação, etc.;
- Dilatações térmicas (ou contrações) da própria tubulação ou de outras tubulações ligadas à tubulação em questão, devido a variações de temperatura;
- Reação dos pontos de suporte;

- Ações dinâmicas provenientes do movimento do fluido na tubulação, tais como golpes de aríete, acelerações, impactos etc.;
- Tensões decorrentes da montagem, tais como alinhamentos forçados, tensões residuais de soldagem, etc.;
- Desnívelamento de suportes, vasos ou equipamentos ligados à tubulação, consequentes de recalque de fundações.

Visto a grande variedade de cargas, são utilizadas normas de projeto que estabelecem exigências e recomendações de boa prática, que devem ser obedecidas nos projetos de tubulações.

Segundo Telles (2006) essas normas foram feitas com a finalidade não só de padronizar e simplificar os projetos e os cálculos como principalmente de garantir condições mínimas de segurança para a operação de tubulações. Por essa razão, embora as normas nem sempre sejam de uso legal obrigatório, conforme ABNT (2019), “tipicamente, as normas são de uso voluntário, isto é, não são obrigatórias por lei, e então é possível fornecer um produto ou serviço que não siga a norma aplicável no mercado determinado”, contudo, em geral são exigidas como requisito mínimo de segurança por quase todos os projetistas e usuários de tubulações industriais. Importante ressaltar que no Brasil, caso alguma norma seja citada expressamente em lei ou resoluções, esta passará a ser de uso obrigatório.

A extensão de assuntos abrangidos pelas normas de projeto é muito variável, abrangendo geralmente as seguintes:

- Materiais para as diferentes classes de tubulações.
- Tensões admissíveis dos materiais, para as diferentes classes de tubulações, em diversas temperaturas.
- Critérios e fórmulas de cálculo, para o cálculo de espessura de parede e do efeito das dilatações e movimentos (cálculo de flexibilidade).
- Detalhes de derivações, reforços, curvas em gomos e outros detalhes de tubulação.
- Procedimento de teste hidrostático, inclusive pressão de teste, e de outros ensaios e testes de tubulação.

No Brasil, uma das normas mais utilizadas é a norma americana ASME B 31 do *American Standard Code for Pressure Piping*, que estabelece, para o cálculo da espessura mínima de dutos sujeitos à pressão interna, as equações (24) e (25), equivalentes entre si, e derivadas da fórmula teórica vista no início desta seção.

$$t = \frac{PD}{2(S_h J + PR)} + C \quad (24)$$

$$t = \frac{Pd}{2(S_h J + PR - P)} + C \quad (25)$$

Em que:

t = espessura da parede [mm];

P = pressão interna de projeto [MPa];

D = diâmetro externo [mm];

d = diâmetro interno [mm];

$S_h$  = tensão admissível do material na temperatura de projeto [MPa];

J = coeficiente de eficiência de solda, válido para o caso dos tubos com costura; para os tubos sem costura, E= 1,0;

R = coeficiente de redução de acordo com o material e a temperatura do tubo. Os valores desse coeficiente estão também tabelados na norma ASME B 31;

C = soma das margens para corrosão, erosão e abertura de roscas e de chanfros [mm].

### 3.2.2 Corrosão como falha em dutos

Mesmo que a construção desses equipamentos siga normas internacionais e inspeções frequentes, os dutos podem sofrer diversos tipos de danos em serviço, como erosão, deslizamentos de terra, corrosão, atos de vandalismo, ação de terceiros, podendo ocasionar os vazamentos. Devido às características dos fluidos conduzidos que justifiquem sua construção, os danos ambientais e socioeconômicos raramente são pequenos.

Dentre as falhas citadas, a corrosão é algo crítico. Mesmo com diversas medidas protetivas como pintura e proteção catódica, é algo que eventualmente surge. Geralmente, a taxa de corrosão é utilizada como parâmetro para definição de vida útil. Assim, inspeções e reparos periódicos são muito importantes para garantir a segurança de utilização desses equipamentos e até mesmo prolongamento da sua vida.

Os defeitos por corrosão que ocorrem no interior dos dutos acontecem devido às características do fluido transportado, temperatura, concentrações de ácidos, sólidos em suspensão e velocidade do fluido. A corrosão também pode ocorrer na superfície externa dos dutos de aço de transporte. Os defeitos podem ser detectados e localizados por diferentes técnicas, podendo ser citadas:

- Inspeção visual;

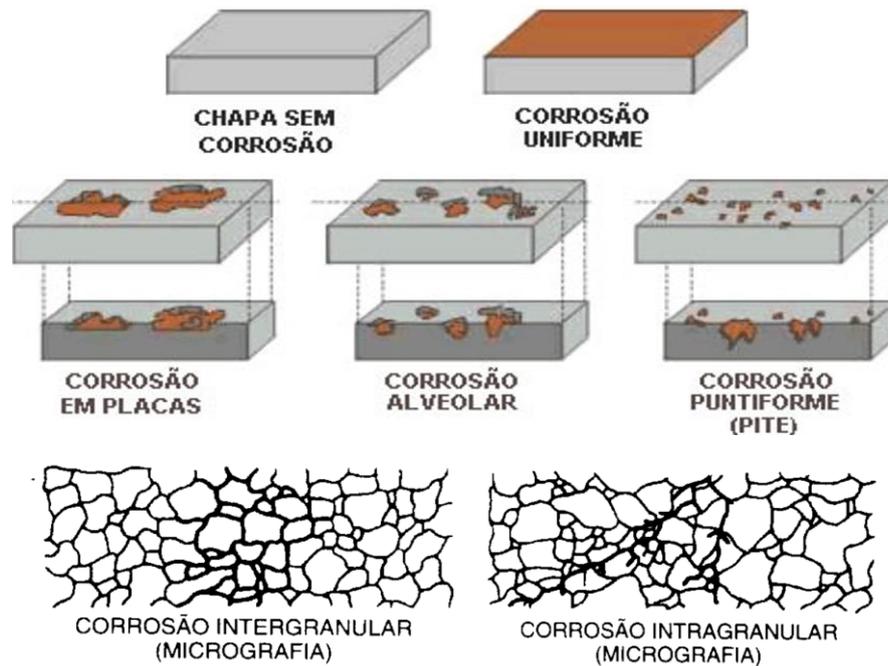
- Partículas magnéticas, para identificação de trincas;
- Correntes parasitas (*Eddy currents*);
- Ultrassom;
- Inspeção com “*pigs*” instrumentados.

Os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na interface do metal com o meio corrosivo, manifestando-se através de reações químicas irreversíveis, acompanhada da dissolução de um elemento químico do material para o meio corrosivo ou da dissolução de uma espécie química do meio no material (GENTIL, 2003).

Segundo Dutra e Nunes (2006) as formas de corrosão são definidas principalmente pela aparência ou morfologia da superfície corroída em que as principais são descritas a seguir e esquematizadas na Figura 15.

- **CORROSÃO UNIFORME:** ocorre em toda a extensão da superfície, causando uma perda de espessura considerada uniforme. É mais comumente encontrada em metais que não formam películas protetoras.
- **CORROSÃO POR PLACAS:** forma placas com escavações. É comum em metais formadores de películas inicialmente protetoras, que ao passar do tempo se tornam espessas, fraturam e perdem aderência, ocasionando um novo ataque ao metal.
- **CORROSÃO ALVEOLAR:** gera sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos na superfície metálica. Apresenta fundo arredondado e profundidade geralmente menor do que seu diâmetro. Ocorre frequentemente em metais formadores de películas semi-protetoras ou quando se tem corrosão sob depósito.
- **CORROSÃO PUNTIFORME OU POR PITES:** manifesta-se em certos pontos da superfície formando pequenas cavidades (denominadas de pites). Essas cavidades apresentam fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro. Origina-se frequentemente em metais formadores de películas protetoras, sob a ação de determinados agentes agressivos, em pontos localizados.
- **INTERGRANULAR (OU INTERCRISTALINA):** o ataque se manifesta no contorno dos grãos da rede cristalina do material metálico, e faz com que o metal atingido perca suas propriedades mecânicas de resistência a esforços.
- **INTRAGRANULAR:** ocorre nos grãos da rede cristalina do material metálico, se propaga pelo interior dos grãos do material, ocasionando a perda de suas propriedades mecânicas.

Figura 15 - Representação esquemática de algumas formas de corrosão

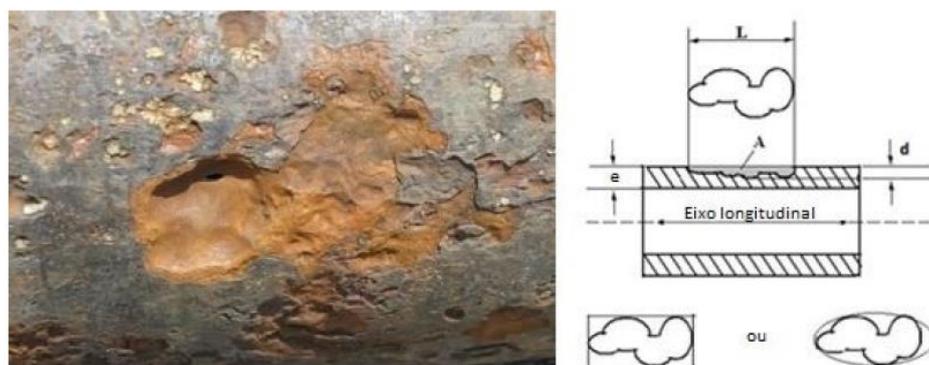


Fonte: Adaptado de GENTIL (2003).

Os defeitos de corrosão podem ocorrer isoladamente ou em colônias em que cada defeito introduz distúrbios nos campos de tensão. Quando as áreas de influência dos defeitos estão sobrepostas no caso de dutos, podem resultar em uma pressão de falha com um grupo de defeitos menor se comparado com as pressões de falha de um duto onde os defeitos fossem isolados. Essa característica é bem apresentada no estudo experimental apresentado por Benjamin *et al.* (2005).

Como metodologia de avaliação de integridade, normas de tubulações tentam aproximar a região corroída através de um retângulo ou elipse com uma profundidade correspondente à corrosão de maior profundidade, medida ao longo do eixo do duto como ilustrado na Figura 16, resultando em uma metodologia conservativa no sentido da segurança.

Figura 16 - Representação de perda de material em tubulações



Fonte: Lopes Junior (2015).

### 3.3 REPAROS DE DUTOS

A recuperação de uma tubulação por defeito de perda de metal pode ser realizada basicamente de duas maneiras: remoção e substituição da parte corroída por uma nova ou reparação da área danificada.

Vários métodos estão disponíveis atualmente para reparo, como sobreposição de solda, luva de cerco completo, remendo por solda de filete, etc. Como em qualquer área da engenharia, nenhum dos métodos sempre será eficaz ou o mais adequado, existindo vantagens e problemas associados, como o alto peso das braçadeiras, a alta despesa de instalação, o trabalho a quente de dutos operacionais, problemas de segurança, etc. Uma das operações visando a segurança é o desligamento e limpeza da linha, o que pode gerar uma enorme perda financeira. Essas desvantagens são razões e incentivos para que os pesquisadores encontrem novas soluções para o reparo de dutos.

#### 3.3.1 Métodos de reparos em dutos

Segundo Rohem (2010) os tipos de reparo podem ser resumidos em reparos de contingência, reparos temporários e reparos permanentes. Os reparos de contingência são emergenciais com objetivo reduzir os impactos ao meio ambiente e às pessoas. Servem para conter vazamentos e permitir a intervenção no duto com o objetivo de viabilizar a execução de reparos temporários ou permanentes. Como exemplos de reparos de contingência têm-se braçadeiras.

Os reparos temporários garantem a segurança e a continuidade operacional do duto, quando a execução do reparo definitivo for inviável. O reparo temporário deve ser substituído por um reparo permanente num prazo analisado caso a caso em que é avaliada a progressão do dano. A Tabela 2 apresenta alguns dos principais tipos de reparos temporários.

Os reparos permanentes recompõem integralmente a resistência mecânica exigida do duto, sendo apresentado na Tabela 3 os tipos usuais de reparos permanentes. Para fins desse trabalho, os reparos do tipo luva com material compósito são descritos mais detalhadamente na seção 3.3.2.

Tabela 2 - Tipos usuais de reparos temporários

<b>Tipos de reparos</b>	<b>Aplicações</b>
Braçadeira mecânica aparafusada sem solda	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas
Depósito com solda	Áreas com corrosão interna e em geometrias complexas
Luva de material compósito	Área com corrosão interna ou com mossas

Fonte: Rohem (2010)

Tabela 3 - Tipos usuais de reparos permanentes

<b>Tipos de Reparos</b>	<b>Aplicação</b>
Esmerilhamento	Sulcos, cavas e trincas superficiais
Depósito com solda	Áreas corroídas externamente ou esmerilhadas
Braçadeira com pino centralizador e soldada	Furos
Braçadeira mecânica aparafusada e soldada	Sulcos, cavas, mossas e áreas corroídas ou esmerilhadas
Luva inteira e soldada	Interligação de “ <i>tie-in</i> ”
Luva de material compósito	Áreas corroídas
Dupla-calha	Todos os defeitos
Trepanação do defeito	Pequenos defeitos com extensão enquadrada na capacidade da máquina de trepanar, limitada a 1 diâmetro nominal do duto
Troca de trecho (niple)	Todos os defeitos
Escavação de seção do duto	Duto com tensão longitudinal superior a 54% do SMYS ( <i>Specified Minimum Yield Strength</i> )

Fonte: Adaptado de Rohem (2010)

### 3.3.2 Reparos tipo luva baseados em materiais compósitos

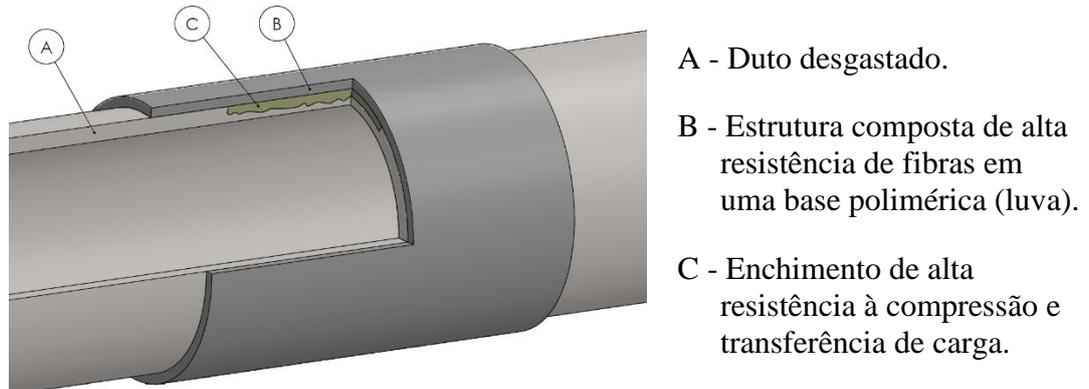
Esta classe de reparos consiste em materiais compósitos reforçados com fibras que são depositados em torno da circunferência do duto, sendo aplicados até mesmo em dutos em operação com produtos perigosos. Devido à sua flexibilidade de aplicação pode ser facilmente utilizada em geometrias complexas, tais como curvas, derivações, etc. Dependendo de diversos fatores, esses reparos podem ser instalados rapidamente e podendo ter menor custo do que reparos soldados tradicionais.

De modo geral, são utilizados três componentes para este tipo de reparo, conforme esquema apresentado na Figura 17. O elemento que mais impacta na eficácia são as fibras com a função de resistir aos esforços mecânicos. As fibras de reforço mais utilizadas são as fibras de vidro, carbono e aramida. Como segundo elemento tem-se a utilização de resina que atua como matriz para as fibras, apresentando a função de ligação entre os materiais em uma unidade estrutural coesa. Também protege as fibras de reforço de ambientes adversos e fornece toda a força de cisalhamento interlaminar e resistência contra propagação de trincas e danos. Termofixos como as resinas epóxi, éster vinílico, poliéster e fenol formaldeído, são comumente utilizados.

O terceiro elemento é um material que será utilizado como um enchimento, devendo preencher a região desgastada para resgatar a geometria externa do duto, dessa forma,

garantindo a geometria cilíndrica para aplicação do material compósito. Outra função é garantir uma uniforme transferência de carga do duto para a luva de compósito, requerendo uma alta resistência à compressão.

Figura 17 - Sistema de reparo por luva de material compósito



Fonte: O Autor (2019).

### 3.3.3 Normas aplicadas a reparos de dutos com uso de material compósito

A técnica de reparos de dutos com luvas de material compósito é relativamente nova, com o primeiro padrão de reparação americano introduzido em 2006 (ASME PCC-2). Neste trabalho são descritas duas normatizações:

ISO 24817 - Esta Especificação Técnica fornece requisitos e recomendações para a qualificação, projeto, instalação, teste e inspeção na aplicação externa de reparos compósitos de tubulações corroídas ou danificadas utilizadas nas indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural (ISO, 2017).

ASME PCC-2 - Esta Norma fornece métodos para reparação de equipamentos e tubulações dentro do escopo dos Códigos e Padrões de Tecnologia de Pressão da ASME após terem sido colocados em serviço. Esses métodos de reparo incluem projeto, fabricação, exames e práticas de teste relevantes e podem ser temporários ou permanentes, dependendo das circunstâncias (ASME, 2018).

Na direção axial, os dois códigos projetam para uma força equivalente que deveria induzir uma tensão axial semelhante ao sistema com todas as outras cargas e momentos combinados. A ASME não propõe uma equação particular para calcular a força axial equivalente, deixando ao julgamento do projetista estimar este valor, indicando apenas que a carga de tração axial gerada por um momento de flexão é de  $4Mb/D$ . Já a ISO apresenta essa força como a equação (26).

$$F_{eq} = \frac{\pi}{4} P D^2 + \sqrt{F_a^2 + 4 F_{sh}^2} + \frac{4}{D_p} \sqrt{M_a^2 + M_t^2} \quad (26)$$

A equação de projeto na direção circunferencial da ASME baseia-se apenas na pressão interna, ignorando a contribuição de outras cargas, como a força de cisalhamento e o momento de torção. Já a ISO propõe a equação (27) para calcular uma pressão equivalente.

$$P_{eq} = P \left[ 1 + \frac{16}{(\pi D^2 P)^2} \left( F_{sh} + \frac{2}{D} M_t \right)^2 \right] \quad (27)$$

Além disso, existe uma pressão chamada "P<sub>live</sub>" que é usada em ambos os códigos e se refere à pressão de operação no momento da aplicação do reparo. Esse parâmetro de projeto hoje é discutível, visto que em trabalhos como o de Saeed, Ronagh e Virk (2014) mostram que a pressão de falha é independente da pressão em que o duto apresenta no momento do reparo.

Os códigos de projeto têm a mesma abordagem para considerar a extensão do dano por corrosão, identificando dois tipos de defeitos potenciais A e B:

Tipo A: O defeito provoca apenas uma diminuição de espessura e não se espera que se torne um defeito passante pela parede do duto, durante a vida útil do duto reparado. O defeito pode ocorrer na superfície interna ou na superfície externa. A profundidade do defeito é o único parâmetro de projeto, que em ambos os códigos é considerado totalmente circunferencial com uma espessura constante da parede do duto.

Tipo B: O defeito é passante pela parede do duto, causando vazamento do fluido transportado, esse tipo de defeito requer tanto o fortalecimento estrutural quanto a vedação da falha na parede. É englobado por esse tipo os casos em que a espessura de parede restante for menor que 1 mm no final da vida útil do duto. A forma do defeito tem um efeito significativo no projeto de reparo no Tipo B, podendo ser consideradas formas circunferenciais, circulares/quase-circulares e não-circulares. Os defeitos são caracterizados como não-circulares quando a relação de aspecto do defeito for igual ou maior que cinco.

De acordo com ISO 24817, após uma avaliação de risco os reparos são classificados em três classes. O reparo de classe 1 é apropriado para a maioria dos sistemas de serviço de utilidade, esta classe destina-se a sistemas que não são sensíveis à segurança de pessoal ou crítico de sistema. As reparações de classe 2 é adequada para sistemas que possuem funções específicas relacionadas à segurança, excluindo-se hidrocarbonetos. Os reparos para a classe 3

são para aplicações em que as condições do serviço são mais onerosas ou não incluídas nas classes anteriores. Uma das aplicações dessa classificação é que junto com o tempo de vida do reparo são estimadas as deformações admissíveis no material compósito.

Outro parâmetro importante explicitado em ambas as normas, é a limitação de temperatura ao qual o compósito estará sobre exposição, sendo apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Limite superior da temperatura de aplicação do laminado de reparo

Propriedade mensurada	Defeito tipo A	Defeito tipo B
Tg	Tg – 20 °C	Tg – 30 °C
HDT	HDT – 15 °C	HDT – 20 °C (ISO) HDT – 25 °C (ASME)

Fonte: Adaptado de ISO 24817 e ASME PCC-2

### 3.4 EFEITOS TÉRMICOS

Sabe-se que as propriedades mecânicas, em especial dos metais, são de grande dependência em relação à temperatura em que o mesmo está submetido, assim, sempre que os elementos mecânicos estão submetidos a uma grande variação de temperatura ou temperaturas significativamente diferentes da temperatura ambiente, um estudo mais detalhado deve ser realizado.

Além da dependência das propriedades físicas com a temperatura, a maioria dos materiais sólidos se expandem quando submetidos a um aquecimento e se contraem quando submetidos a um resfriamento. Dessa forma, uma variação no coeficiente de dilatação ou mesmo um gradiente térmico provoca expansão (ou contração) de forma não homogênea em um meio contínuo, resultando no aparecimento de tensões puramente por carregamento térmico.

De forma geral, a expansão térmica é definida como qualquer variação dimensional que ocorre com a mudança de temperatura à pressão constante. Esta propriedade pode ser medida em termos de expansão térmica linear (definida na equação (28)) ou volumétrica ( $\alpha_v$ ). Para materiais em que a expansão térmica é isotrópica, o valor de  $\alpha_v$  é aproximadamente  $3\alpha$ .

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (28)$$

O comportamento fundamental da condução de calor, conhecido como lei de Fourier, está baseado em um fluxo de energia e devido ao fato das propriedades termofísicas dos materiais serem dependentes da temperatura, a equação se apresenta de maneira não-linear. Sendo assim,

o balanço de energia para o fluxo de calor conduz à relação apresentada na equação (29), onde  $\rho$  é a densidade,  $c_p$  é o calor específico,  $Q$  é a entrada de calor,  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções,  $T$  é a temperatura e  $t$  é o tempo (RODEIRO, 2002).

$$\rho_{(T)} c_{p(T)} \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{(T)x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_{(T)y} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_{(T)z} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (29)$$

Outras condições de contorno de fundamental importância para condução de calor são a radiação e a convecção nas superfícies das chapas. A radiação segue a lei de Stefan-Boltzmann apresentada na equação (30), onde  $Q_{rad}''$  é o fluxo de calor por área ( $W/m^2$ ),  $\epsilon$  é a emissividade,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T_{amb}$  a temperatura do meio externo. Já a convecção é dada pela equação (31), em que  $h_{con}$  é o coeficiente de transferência por convecção.

$$Q_{rad}'' = \sigma_{rad} \epsilon (T^4 - T_{amb}^4) \quad (30)$$

$$Q_{con}'' = h_{con} (T - T_{amb}) \quad (31)$$

### 3.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dentre os métodos numéricos um dos mais utilizados para avaliar efeitos termomecânicos é o método dos elementos finitos (MEF) que pode ser definido como um método numérico, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados. A aplicação do MEF comumente é dividida em três fases que são apresentadas nas seções 3.5.1, 3.5.2 e 3.5.3, como apresentado em Alves Filho (2000).

#### 3.5.1 MEF Fase 1 - Pré-processamento

Na primeira etapa, denominada pré-processamento, ocorre a chamada modelagem do problema, envolvendo a definição da geometria, nós, elementos, condições de contorno, materiais e carregamentos. Esta etapa ainda pode-se ser subdividida nos cinco itens apresentados a seguir.

##### A) Discretização

O espaço contínuo (seja unidimensional, bidimensional ou tridimensional), é discretizado em segmentos, áreas ou volumes menores, em uma quantidade estipulada e resultando em uma quantidade de elementos enumeráveis, ou seja, são determinados elementos finitos, os quais

são ligados uns aos outros por nós. Cada nó possui um número de graus de liberdade. A quantidade de elementos deve ser suficiente para a obtenção de uma solução aproximada da estrutura do modelo contínuo.

#### B) Determinação das funções de interpolação

As funções de interpolação vão representar as variáveis de campo no interior de cada elemento da malha de elementos finitos. A forma mais utilizada de função de interpolação é a polinomial.

#### C) Construção das matrizes dos elementos

Os elementos discretizado são representados por equações com significado físico de forma a se obter expressão em relações matriciais, podendo ser feita por formulação direta ou por formulação variacional.

A formulação direta é baseada no Método da Rigidez em que o vetor dos deslocamentos nodais do elemento ( $\{u_e\}$ ) é relacionado com o vetor das forças nodais ( $\{F_e\}$ ) através da matriz de rigidez do elemento ( $[K_e]$ ), pelas relações de equilíbrio de forças e compatibilidade de deslocamentos, assumindo a forma apresentada na equação (32).

$$\{F_e\} = [K_e] \cdot \{u_e\} \quad (32)$$

Já a formulação variacional é baseada em buscar pontos de mínimo, de uma função do problema. O método variacional mais comum é o Teorema da Energia Potencial Mínima, sendo aplicado para materiais de comportamento elástico, onde a energia potencial total é dada pela soma da energia de deformação do material e do potencial de trabalho associado a ele.

#### D) Obtenção da matriz global a partir das matrizes dos elementos

Nesta etapa, as equações que representam os elementos são combinadas e compatibilizadas para se obter a equação de equilíbrio de forças e deslocamentos equivalente para todo o corpo simulado (equação (33)). A ordem das matrizes globais acaba resultando em um número igual ao número total de incógnitas nodais (deslocamentos nodais), que é o número de graus de liberdade do sistema.

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \quad (33)$$

#### E) Condições de Contorno e Carregamentos Externos Aplicados

Com as equações matriciais globais definidas, são acrescentadas as condições de contorno sendo substituídos nas equações matriciais por valores definidos ou relações matemáticas. Com

isso, o sistema de equações tem seu número total de incógnitas nodais reduzido, o qual define o número de graus de liberdade efetivo do sistema.

### 3.5.2 MEF Fase 2 - Processamento

Nessa fase ocorre a resolução do sistema de equações, exigindo um maior consumo processamento de dados para poder se resolver a equação (34), em que a necessidade computacional aumenta cada vez que a malha do domínio é refinada devido ao aumento das equações envolvidas. As equações que compõem a equação matricial global são resolvidas numericamente para determinar os deslocamentos nodais por vários métodos

$$\{u\} = [K]^{-1} \cdot \{F\} \quad (34)$$

### 3.5.3 MEF Fase 3 – Pós-processamento

Por fim, o pós-processamento aparece para que ocorra a observação e a avaliação dos resultados obtidos na fase anterior. Os resultados podem ser expressos por: deslocamentos, forças, tensões, deformações, temperaturas, pressões, etc. A representação desses resultados pode ser na forma de tabelas, gráficos, histórico de evolução de variáveis em função do tempo, animações, etc. O esquema a seguir mostra o que é feito em cada uma dessas fases.

## 4 METODOLOGIA

Esta pesquisa seguiu dividida em 3 etapas, descritas a seguir e esquematizadas conforme Figura 18.

### 4.1 ETAPAS DO TRABALHO

A primeira etapa foi realizada buscando validar um modelo numérico com dados experimentais. Todo o modelo, desde a criação (geometria), implementação das condições de contorno, física do problema, definição da malha, análise estrutural e termomecânica até a obtenção de resultados (pós-processamento) utilizou o *software* comercial COMSOL Multiphysics®. Esse é um *software* de análise de elementos finitos, que permite a realização de simulações multifísicas multiplataformas, através do acoplamento de diversos tipos de física. Para o presente trabalho foram utilizados os módulos “*Structural Mechanics*” e “*Heat Transfer in Solids*” do COMSOL Multiphysics®.

Esta primeira etapa foi subdividida em 6 passos (Figura 19):

Passo 1.1 – Obtenção de dados experimentais por meio de fontes bibliográficas;

Passo 1.2 – Modelagem computacional atendendo os resultados experimentais (geometria e propriedades mecânicas do material);

Passo 1.3 – Implementação das condições de contorno no modelo;

Passo 1.4 – Geração de malha;

Passo 1.5 – Verificação da convergência das soluções pelo refinamento de malha. Caso a convergência não seja atingida, volta-se ao passo 1.4.

Passo 1.6 – Com a convergência atingida, verifica-se os resultados com dados experimentais obtidos na seção 1.1, caso o erro numérico seja superior ao aceitável, volta-se ao passo 1.2 e são feitas correções e adequações ao modelo criado. Caso o erro seja aceitável, o modelo é considerado validado.

Como segunda etapa, foram realizadas alterações neste modelo validado, sendo realizadas simulações buscando investigar a influência de parâmetros para o dimensionamento de luvas de materiais compósitos. Desta maneira, foram realizados três estudos, o primeiro buscou investigar a influência de parâmetros de largura comprimento da perda de material (seção 4.3), para o segundo estudo foram realizadas simulações com colônias de defeitos (seção 4.4), para o último estudo foi aplicado um gradiente de temperatura ao modelo, sendo descrito as

condições e os parâmetros apresentados na seção 4.5. Esta segunda etapa foi também subdividida de maneira similar a terceira etapa (Figura 19):

Passo 2.1 – Obtenção de dados dos materiais;

Passo 2.2 – Adequação do modelo validado para as condições de análise;

Passo 2.3 – Adequação das condições de contorno no modelo;

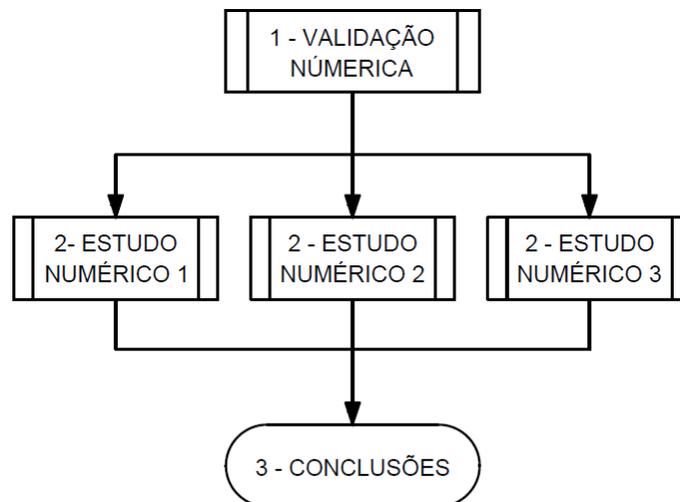
Passo 2.4 – Geração de malha;

Passo 2.5 – Verificação da convergência dos resultados pelo refinamento de malha. Caso a convergência não seja atingida, volta-se ao passo 2.4.

Passo 2.6 – Com a convergência atingida, os resultados são armazenados e discutidos na quarta etapa.

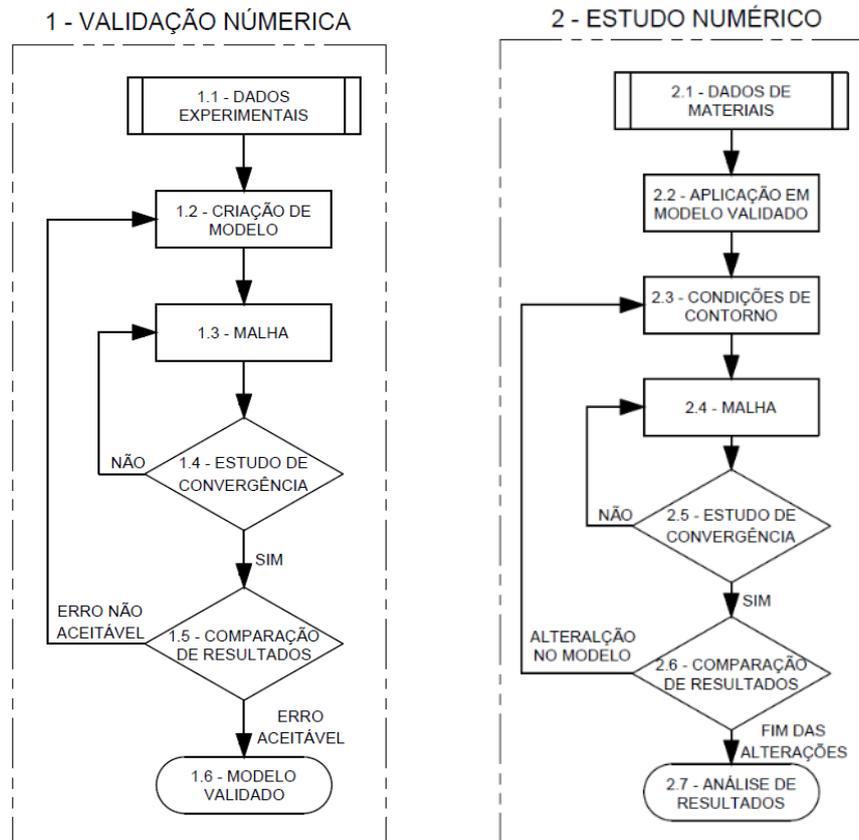
A última etapa agrupa todos os resultados, sendo discutidas as consequências e possibilidades para aplicações em reparos de dutos.

Figura 18 - Esquematização simplificada da metodologia aplicada



Fonte: O Autor (2019).

Figura 19 - Subrotinas da metodologia aplicada



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2 MODELO PARA VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Para validar o modelo, foram utilizados dados experimentais encontrados na literatura. Desta maneira, escolheu-se o trabalho de Mazurkiewicz *et al.* (2017) que apresentou dados experimentais da pressão de ruptura de duto de aço em 4 casos:

- Duto sem defeito (Caso 1);
- Duto com desgaste na superfície (Caso 2);
- Duto não danificado envolto com compósito de fibra de vidro (Caso 3);
- Duto com desgaste na superfície reparado com invólucro compósito de fibra de vidro (Caso 4).

Para fins deste trabalho são considerados os casos 1, 2 e 4. O caso 3 foi desconsiderado por apresentar um tipo de geometria bem diferente ao que foi utilizado nas simulações adiante.

#### 4.2.1 Propriedades de materiais e geometria

No trabalho de Mazurkiewicz *et al.* (2017) foi utilizado duto com 1 m de comprimento, diâmetro externo de 219 mm e a espessura da parede de 6 mm, laminado a quente, fabricado de acordo com os requisitos técnicos do padrão GOST 8731-74, grau 20. Além disso, o reparo utilizado foi composto por fibras de vidro e resina epóxi. As propriedades dos materiais utilizados neste trabalho são apresentadas da Tabela 5 a Tabela 7 e na Figura 20. Onde  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\sigma_e$  é a tensão de escoamento,  $\epsilon_{falha+}$  é a deformação de falha sob tração,  $\epsilon_{vol+}$  é a deformação volumétrica de falha sob compressão e  $G$  é o Módulo de elasticidade transversal.

Para os casos 2 e 4, o duto apresentava um desgaste na superfície conforme ilustrado na Figura 21. As espessuras de paredes integras e desbastadas admitidas foram as mínimas medidas nos corpos de probas ensaiados.

Tabela 5 - Propriedades do aço utilizado para validação do modelo

$\rho$	$E$	$\nu$	$\sigma_e$	$\epsilon_{falha+}$
7.830 kg/m <sup>3</sup>	200 GPa	0,3	305 MPa	0,33

Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

Tabela 6 - Propriedades do material compósito com fibra de vidro

$\rho$	$E_a$	$E_b = E_c$	$G_{ab} = G_{ca}$	$G_{cb}$	$\nu_{ba} = \nu_{ca}$	$\nu_{cb}$	$\epsilon_{fs}$
1.800 kg/m <sup>3</sup>	48,47 GPa	6,77 GPa	3,2 MPa	1,67 MPa	0,099	0,40	0,2
$X_c$	$X_t$	$Y_c$	$Y_t$	$S_c$	$Y_c$ falha	$\epsilon_{max+}$	$\epsilon_{max-}$
320 MPa	678,5 MPa	110 MPa	34,4 MPa	45,8 MPa	2	0,1	-0,1

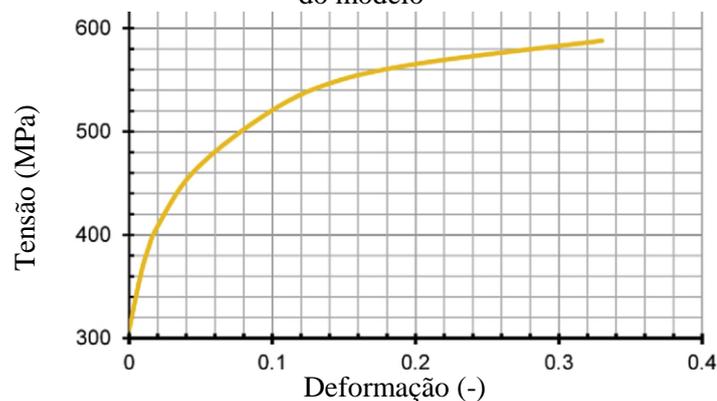
Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

Tabela 7 - Propriedades da resina epóxi para material de enchimento

$\rho$	$E$	$\nu$	$\epsilon_{falha+}$	$\epsilon_{vol+}$
1.200 kg/m <sup>3</sup>	3,3 GPa	0,37	0,04	-0,7

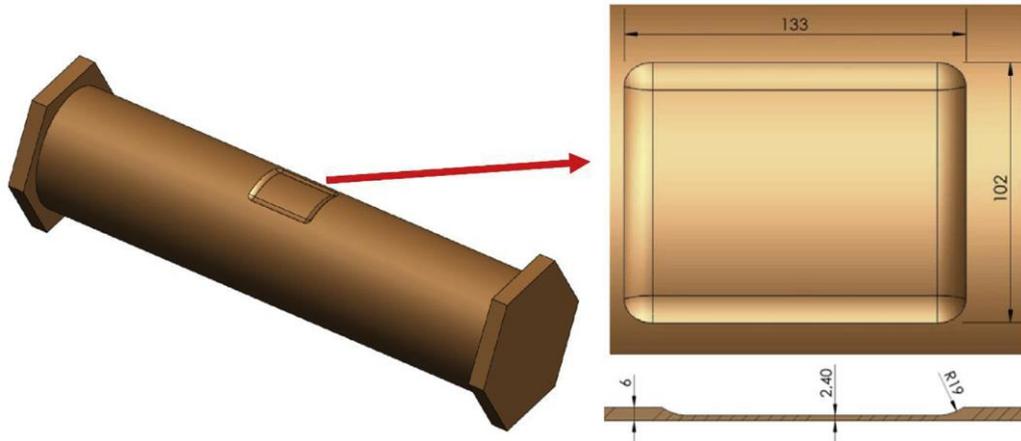
Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

Figura 20 – Região plástica da curva tensão x deformação verdadeira do aço utilizado para validação do modelo



Fonte: Adaptado de Mazurkiewicz *et al.* (2017).

Figura 21 - Dimensões do desgaste de superfície



Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

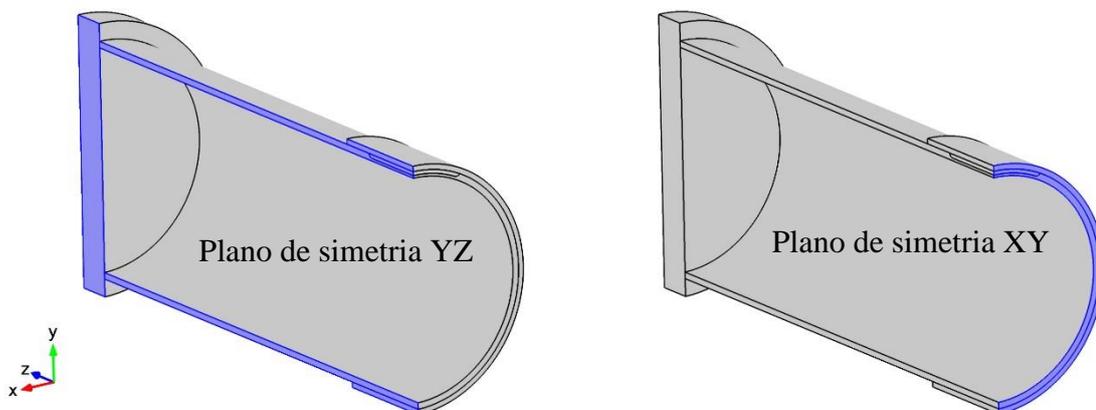
#### 4.2.2 Implementação do modelo no software COMSOL Multiphysics

Por se tratar de uma problemática puramente mecânica até a falha de um material dúctil isotrópico ou de um compósito em uma geometria fora de um plano, foi utilizado o módulo físico *Nonlinear Structural Materials* em um espaço 3D, sendo consideradas as dimensões da peça, propriedades do material e condições de contorno apresentados por Mazurkiewicz *et al.* (2017).

##### 4.2.2.1 Geometria e propriedades dos materiais

Para reduzir o recurso computacional necessário, se fez o uso do recurso de simetria, fazendo com que se reduzissem significativamente os graus de liberdade do modelo, permitindo que as soluções fossem obtidas em menor tempo (Figura 22).

Figura 22 - Planos de simetria



Fonte: O Autor (2019).

As propriedades do material compósito utilizado não são isotrópicas, sendo caracterizado como material ortotrópico. Além dessa característica, o compósito é aplicado sobre uma superfície cilíndrica (duto), sendo então necessário aplicar coordenadas cilíndricas para definir as propriedades nas diferentes direções.

Para a mudança do sistema de coordenada, conforme a Tabela 8 utilizou-se o recurso de *Base Vector System* do *software*, fazendo a configuração apresentada na Figura 23, em que são utilizadas coordenadas (X, Y, Z) ao invés de (x, y, z) devido ao fato da primeira ser utilizada como coordenadas do material (para o *software* em questão), sendo importante esta nota quando se espera que o material se deforme significativamente e exiba não-linearidade geométrica. Dessa maneira, resultando no sistema de coordenadas apresentado na Figura 24.

Tabela 8 - Mudança de coordenadas

Eixos globais	Coordenadas cilíndricas	Equacionamento
x	$\phi$ (Azimutal)	$\hat{e}_\phi = -\sin \phi \hat{X} + \cos \phi \hat{Y} + 0\hat{Z}$
y	r (Radial)	$\hat{e}_r = \cos \phi \hat{X} + \sin \phi \hat{Y} + 0\hat{Z}$
z	z (Axial)	$\hat{e}_z = 0\hat{X} + 0\hat{Y} + 1\hat{Z}$

Fonte: O Autor (2019).

Figura 23 - Configuração para alteração de coordenada aplicada no *software* COMSOL Multiphysics

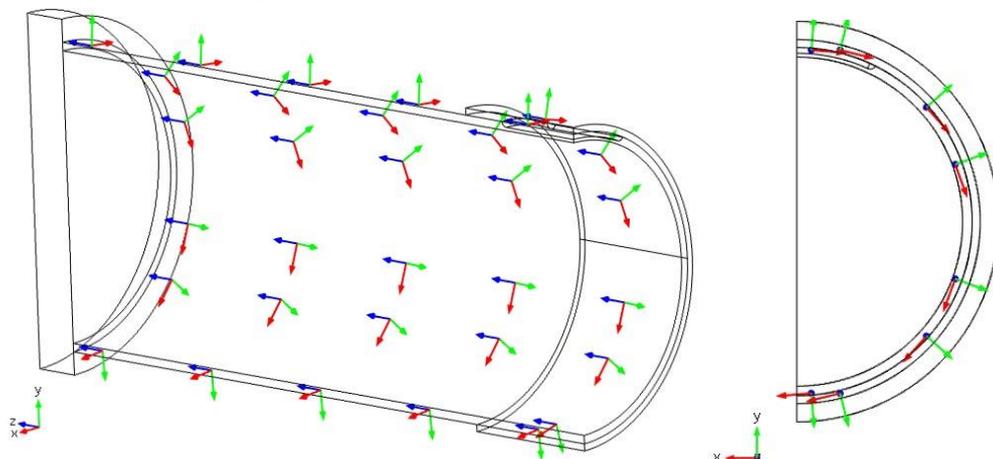
Base vectors			
	x	y	z
x1	$-\sin(\text{atan2}(Y,X))$	$\cos(\text{atan2}(Y,X))$	0
x2	$\cos(\text{atan2}(Y,X))$	$\sin(\text{atan2}(Y,X))$	0
x3	0	0	1

Simplifications

Assume orthonormal

Fonte: O Autor (2019).

Figura 24 – Representação gráfica do sistema de coordenadas do material



Fonte: O Autor (2019).

#### 4.2.2.2 Condições de contorno

O experimento tomado como referência submeteu o duto a pressão interna com injeção de água por uma bomba hidráulica até a identificação de falha na estanqueidade do duto. Desta forma foi acrescentada uma pressão nas paredes internas gradualmente até que alguma condição de falha (tópico a seguir) seja satisfeita.

Como descrito anteriormente (seção 4.2.2.1), um quarto do duto foi simulado sendo utilizado o recurso de simetria visando economizar recursos computacionais, deixando as simulações mais rápidas. Também foi considerada a ligação entre o duto e o laminado de reparação como perfeitamente conectada, sendo essa consideração bastante utilizada nos trabalhos atuais, mas sendo necessários estudos futuros em relação a adesão, principalmente quando o duto estiver sob esforços além da pressão interna.

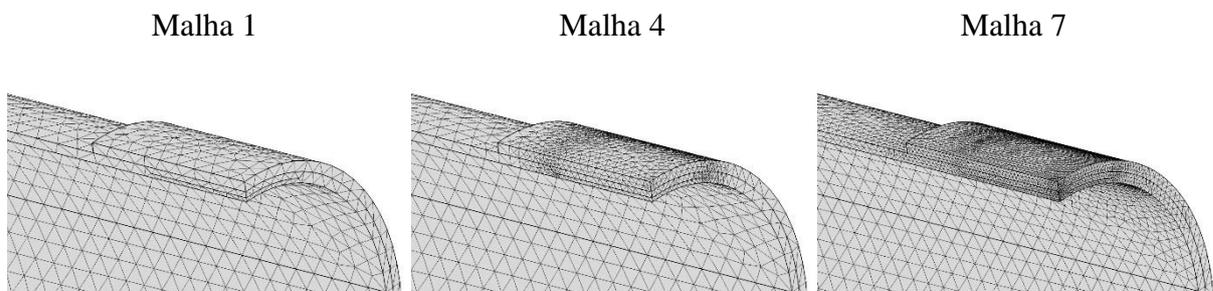
#### 4.2.2.3 Malha

Devido à geometria do problema e recomendações da própria desenvolvedora do *software* COMSOL Multiphysics®, foi utilizada uma malha tetraédrica refinada nos pontos mais críticos para cada caso simulado.

A escolha do tamanho da malha foi determinada após um estudo de convergência, onde se refinou a malha até um ponto onde os valores dos resultados se estabilizaram, desta maneira se obtiveram resultados precisos sem um grande aumento de tempo computacional devido ao excesso de elementos.

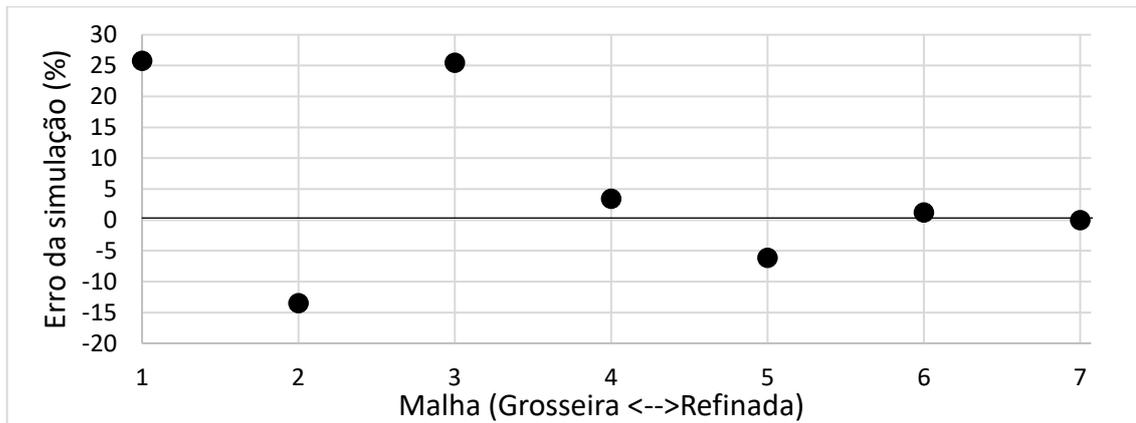
O refino de malha ocorreu principalmente nas regiões de maior gradiente de tensão, dessa forma, somente se aumentava a necessidade computacional para a área mais crítica (Figura 25). Como resultado de convergência os parâmetros das malhas utilizadas são apresentados na Figura 26.

Figura 25 - Malhas gerada em diferentes graus de refinamento



Fonte: O Autor (2019).

Figura 26 - Gráfico de convergência de malha



Fonte: O Autor (2019).

Foi definido que a malha escolhida seria a que apresentaria erro igual ou inferior a 1%. Para o caso apresentado na Figura 26 a malha selecionada foi a de número 6. Sendo utilizado um computador com processador Intel® Core i3-4170 de 3.7 GHz, com 12 GB de memória RAM em um sistema de 64 bits, os tempos de simulação para o caso 4 variaram entre 2 e 16 horas, utilizando-se este computador.

#### 4.2.2.4 Condições de falha

As simulações ocorreram de forma a ir aumentando a pressão interna do duto com acréscimo de condições de parada. Essas condições de parada foram determinadas a partir dos critérios de falhas adequados para cada material, ocorrendo assim o fim da simulação com a determinação da pressão de falha.

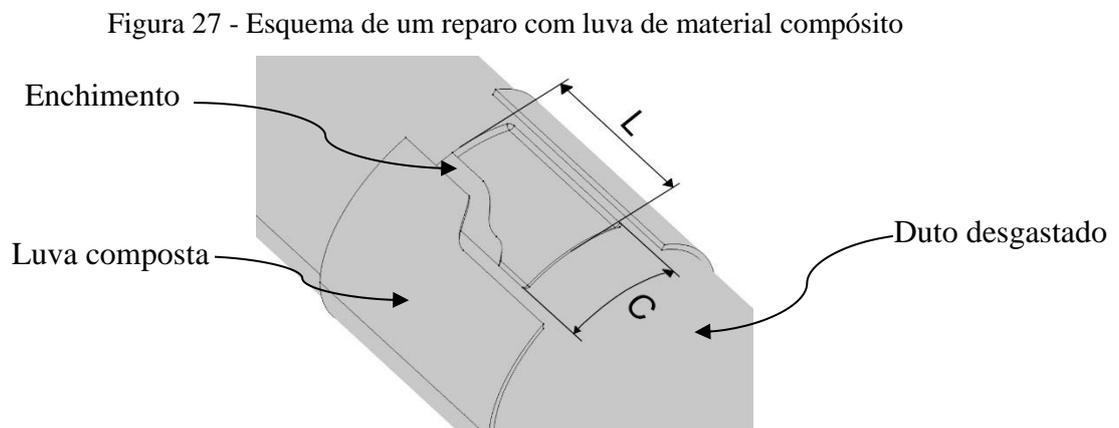
Devido ao duto reparado apresentar materiais com propriedades distintas, para cada material foi utilizado o critério de falha mais adequado em cada componente.

Para o duto (aço carbono) dois critérios de falhas foram considerados, ocorrendo a falha no que acontecer primeiro, o critério de falha número 1 foi o apresentado por Chouchaoui (1993 apud CRONIN, 2000), que estabeleceu que a falha ocorre no momento em que a tensão de von Mises ao longo de toda a espessura da parede excede o limite de resistência do material, 476 MPa, o critério de falha número 2 ocorre quando qualquer ponto do modelo surgir uma tensão acima do limite de ruptura verdadeiro, 588 MPa. Foram comparados os diversos critérios de falhas apresentados na seção 3.1.3 para os compósitos, o que apresentou melhores resultados foi o Critério de Hashin.

#### 4.3 MODELO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA E DO COMPRIMENTO DO REPARO COMPÓSITO

De acordo com as equações de reparo de dutos das normas ISO e ASME (seção 3.3.3), o dimensionamento está ligado com a geometria do dano apenas com a espessura restante da região que sofreu perda de metal.

Visando verificar essa suposta limitação, iniciou-se com alterações de dimensões geométricas do reparo do modelo validado na seção 4.2, sendo realizadas simulações variando-se as dimensões de comprimento (C) e largura (L) conforme Figura 27. As dimensões utilizadas neste primeiro estudo paramétrico são apresentadas na Tabela 9.



Fonte: O Autor (2019)

Tabela 9 - Dimensões de desgaste investigadas no estudo paramétrico

Variação da dimensão L (Axial)	Variação da dimensão C (Circunferencial)
L(mm) x C(mm)	L(mm) x C(mm)
53 x 102	133 x 52
93 x 102	133 x 102
133 x 102	133 x 202
163 x 102	133 x 302

Fonte: O Autor (2019).

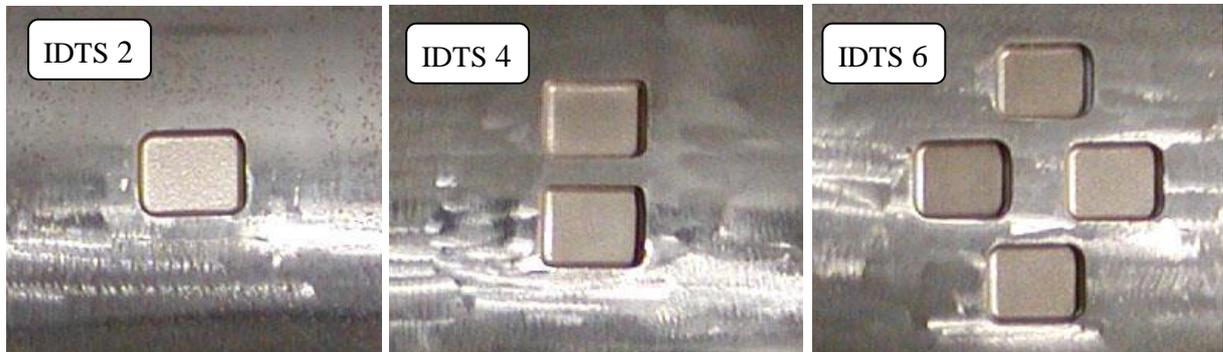
#### 4.4 MODELO PARA ESTUDO SOBRE INFLUÊNCIA DE COLÔNIAS

Em trabalhos como o de Benjamin *et al.* (2005), é notável que em colônias de defeitos de corrosão existe a sobreposição de campos de tensão, resultando em distúrbios que causam uma diminuição na resistência do duto em comparação com defeitos que ocorrem isolados.

Dessa forma, decidiu-se verificar o impacto de grupamentos de defeitos em luvas de materiais compósitos. Como referencial, o trabalho de Benjamin *et al.* (2005) ensaiou sete dutos, o primeiro denominado como IDTS 1 em que representava um duto íntegro, o segundo

como IDTS 2 (Figura 28), o que se equivale a um defeito como apresentado no modelo de validação. Para agrupamento de defeitos simulados, foram utilizados os espécimes IDTS 4 e IDTS 6 que também estão representados na Figura 28.

Figura 28 - Foto de defeitos ensaiados por Benjamin *et al.* (2005)



Fonte: Benjamin *et al.* (2005).

Utilizando a metodologia apresentada anteriormente, o modelo validado foi alterado com deslocamento e acréscimo de defeitos similar aos da Figura 28. Simulações sem reparo e com reparo foram realizadas para estudar o efeito das colônias de defeitos na pressão de falha dos dutos.

#### 4.5 MODELO PARA ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Como já citado anteriormente, algumas aplicações de dutos necessitam trabalhar em temperaturas superiores à temperatura ambiente. Alguns materiais compósitos apresentam limitação de sua aplicação devido a mudanças consideráveis de resistência mecânica em uma dada temperatura.

Com essa limitação, a aplicação de compósitos em dutos com temperaturas superiores à temperatura ambiente necessita de um estudo mais cauteloso. Dessa forma, foi escolhido o limite térmico desse estudo como a faixa de temperatura trabalhado na norma NBR 15280-1, esta, trabalhando em seu escopo com dutos em temperatura de até 120 °C.

##### 4.5.1 Propriedades dos materiais

Foi necessário utilizar fontes bibliográficas complementares para obtenção das respectivas propriedades físicas dependentes da temperatura de todos os materiais envolvidos nas simulações apresentadas a seguir.

Para o material do duto, escolheu-se o aço ASTM A-106 Gr.B devido a sua grande utilização em aplicações de tubulações industriais. Este aço apresenta um pico no seu limite de resistência na temperatura de aproximadamente 200 °C, o que pode ser observado no trabalho

experimental de Khazraji, Amin e Warmizyari (2016). Foram utilizadas as propriedades apresentadas nas Tabela 10, Tabela 11 e Figura 29.

Para todos os casos onde se apresentaram mudança de propriedade com a temperatura, utilizou-se uma interpolação linear entre os pontos intermediários.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-106 Gr. B nas temperaturas de 25 °C e 200 °C

T (°C)	$\sigma_e$ (Mpa)	$\epsilon_{falha+}$
25	283	0,33
200	261	0,19

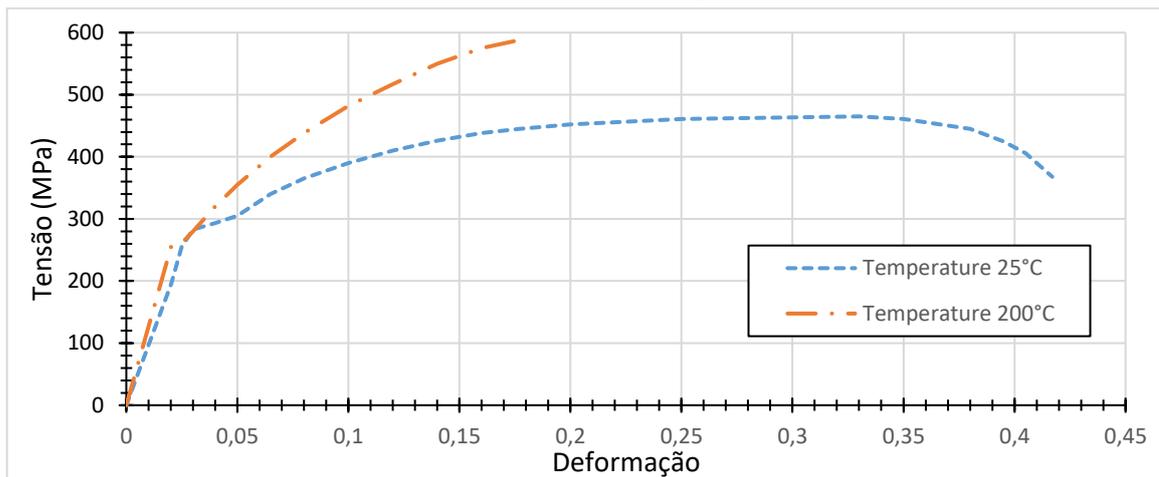
Fonte: Khazraji, Amin e Warmizyari (2016).

Tabela 11 - Propriedades térmicas do aço ASTM A-106 Gr. B

k	$c_p$	$\alpha$ (entre 20°C e 100°C)	$\alpha$ (entre 20°C e 200°C)
51 W/m K	461 J/kg K	$12,510^{-6} K^{-1}$	$13 10^{-6} K^{-1}$

Fonte: Thyssenkrupp Materials International (2011)

Figura 29 - Curvas tensão x deformação de engenharia para aço A-106Gr.B em estado novo



Fonte: adaptado de Khazraji, Amin e Warmizyari (2016).

Já como material da luva compósita, foi mantido uma mistura de fibra de vidro e epóxi, sendo utilizado Epóxi (DGEBA/LY556)+endurecedor amina DDS apresentado em Bouchonneau (2007) e fibra S-2 GLASS® apresentado em AGY (2006).

A obtenção das propriedades mecânicas e térmicas aplicadas à simulação seguiu de acordo com os equacionamentos apresentados na seção 3.1.2, resultando na Tabela 14 para uma proporção de 60% de volume de fibra de vidro. As propriedades aplicadas no equacionamento, partiram dos trabalhos de Bouchonneau (2007), Trotignon *et al.* (1996) e AGY (2006), estando resumidas na Tabela 12 para o epóxi e Tabela 13 para as fibras de vidro.

Como material de enchimento, utilizou-se uma resina epóxi PolyAnchor 4100 HTP, com as propriedades mecânicas obtidas de ensaios em Amorim (2015) e as propriedades térmicas estimadas por Sirk *et al.* (2015), sendo as informações resumidas na Tabela 15.

É importante ressaltar que a matriz e o material de enchimento apresentam Tg de 220 °C e 158 °C respectivamente, ou seja, estando dentro dos limites de temperaturas especificados pela ISO e ASME. Esse fato pode ser constatado com aplicação do equacionamento apresentado na Tabela 4, onde a temperatura limite de operação é dada pela subtração de 20 °C, o que resultaria em um limite de 200 °C para a matriz e 138 °C para o material de enchimento.

Tabela 12 - Propriedades do material epóxi (DGEBA/LY556) + endurecedor amina DDS

$\rho^{(a)}$	E <sup>(b)</sup>	$\nu^{(b)}$	Cp <sup>(c)</sup>	k <sup>(c)</sup>	Tg <sup>(a)</sup>	$\alpha$ (entre 20 °C e 60°C) <sup>(a)</sup>	$\alpha$ (entre 60 °C e 100°C) <sup>(a)</sup>
1230 kg/m <sup>3</sup>	3 GPa	0,4	2000 J/kg K	0,3 W/m K	220 °C	5,3 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	6,0 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>

Fontes: (a) Bouchonneau (2007); (b) Trotignon *et al.* (1996); (c) SOCO-RIL-Socotherm Group e Thermotite disponível em Bouchonneau (2007).

Tabela 13 - Propriedades de fibra de vidro S-2 GLASS®

$\rho$	E (23°C)	E (538°C)	G	$\nu$	Cp	$\sigma_{fR}$ (23°C)	$\sigma_{fR}$ (371°C)	$\alpha$ (entre -30 °C e 250°C)
2460 kg/m <sup>3</sup>	86,9 GPa	88,9 GPa	38,1 MPa	0,23	737 J/kg K	4890 MPa	4445 MPa	16 10 <sup>-7</sup> K <sup>-1</sup>

Fontes: AGY (2006).

Tabela 14 - Propriedades do material compósito com epóxi DGEBA/LY556 e fibra de vidro S-2 GLASS com proporção de 60% de fibra

$\rho$	E <sub>1</sub> (23°C)	E <sub>1</sub> (538°C)	X <sub>t</sub> (23°C)	X <sub>t</sub> (371°C)	G <sub>ab</sub> = G <sub>ca</sub>	$\alpha_1$ (entre 20 °C e 60°C)	$\alpha_1$ (entre 60 °C e 200°C)
1.968 kg/m <sup>3</sup>	53,3 GPa	56,3 GPa	3,0 GPa	2,7 GPa	5,28 MPa	2,8 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	2,9 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
$\nu_{cb}$	E <sub>2</sub> (23°C)	E <sub>2</sub> (538°C)	Y <sub>t</sub> (23°C)	Y <sub>t</sub> (371°C)	G <sub>cb</sub>	$\alpha_2$ (entre 20 °C e 60°C)	$\alpha_2$ (entre 60 °C e 200°C)
0,30	9,89 GPa	9,91 GPa	15,5 MPa	15,5 MPa	1,4 MPa	3,0 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	3,4 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Fonte: O Autor (2019).

Tabela 15 - Propriedades do material epóxi PolyAnchor 4100 HTP

Tg <sup>(a)</sup>	$\rho^{(b)}$	E <sup>(a)</sup> (25°C)	E <sup>(a)</sup> (130°C)	$\alpha^{(b)}$ (25°C)	$\alpha^{(a)}$ (130°C)	Cp <sup>(b)</sup>	k <sup>(b)</sup>
158 °C	1.075 kg/m <sup>3</sup>	4,1 GPa	2,0 GPa	2,5 10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	4,5 10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	4.300 J/kg K	0,34 W/m K

Fonte: (a) Amorim (2015); (b) Sirk *et al.* (2015).

#### 4.5.2 Adaptação no modelo validado e condições de contorno

O modelo validado foi alterado com acréscimo do módulo “*Heat Transfer in Solids*” do COMSOL Multiphysics®, dessa forma sendo possível acrescentar efeitos térmicos e ocorrendo o acoplamento térmico com o mecânico pelos efeitos de dilatação térmica.

O carregamento térmico é feito considerando a temperatura das superfícies internas do duto igual a temperatura do fluido e considerado o fenômeno de convecção na superfície externa pelo ar ambiente. Devido a simetria do problema, as superfícies utilizadas como simetria na Figura 22, são determinadas como região de fluxo térmico igual a zero.

Para a temperatura interna foram simulados em 4 temperaturas: 25 °C, 60 °C, 90 °C e 120 °C. A velocidade do ar ao redor do duto foi considerada em torno de 0,1 m/s, o coeficiente de convecção externa (convecção natural) pode ser admitido igual a 10 W/m<sup>2</sup> K.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados e discussão dos modelos criados na seção 4.

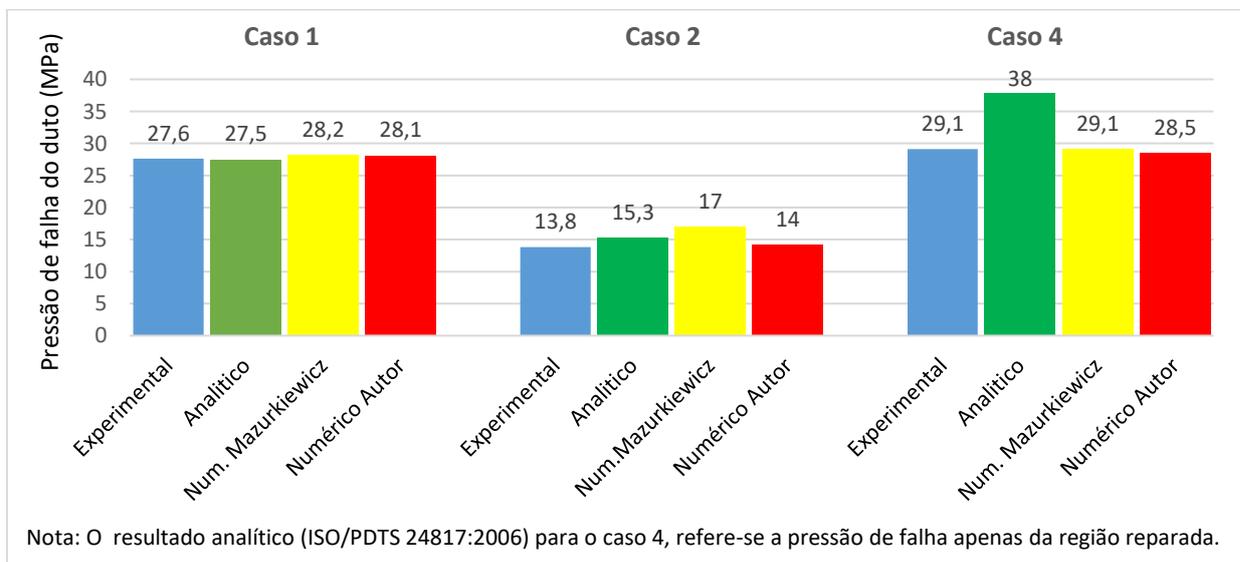
### 5.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Como resultado dos testes experimentais apresentados por Mazurkiewicz *et al.* (2017), tem-se que o primeiro caso (duto sem defeito) apresentou falha ao atingir a pressão interna de 27,59 MPa. O segundo caso (duto com defeito) apresentou uma redução significativa da pressão de ruptura, acontecendo a falha ao se atingir a pressão interna de 13,8 MPa. O quarto caso foi realizado em um duto com defeito reparado com enchimento de epóxi e invólucro compósito de reforço de fibra de vidro que consiste em 16 camadas atingindo uma espessura de aproximadamente 6,2 mm, ocorrendo a falha do duto sob uma pressão 29,06 MPa.

Pôde-se notar que existe uma diferença de pressão de ruptura entre o primeiro e o quarto caso, isso ocorreu pela proximidade entre o reparo e o tampo, que restringe a deformação do duto resultando em um aumento da pressão de falha. Caso a distância do tampo fosse grande o suficiente para não impactar no estado de tensão, espera-se que a pressão fosse equivalente a pressão do primeiro caso.

Na Figura 30 foi apresentado um comparativo entre os resultados dos três casos, onde foram exibidos primeiramente resultados de experimento com a pressão em que o duto ensaiado apresentou falha (vazamento de fluido), em seguida foram apresentados resultados analíticos. Por fim foram apresentados os resultados numéricos do Mazurkiewicz e do autor.

Figura 30 - Comparativos de resultados experimentais analíticos e numéricos.



Fonte: O Autor (2019).

Para o cálculo analítico com revestimento em material compósito (seguindo a ISO 24817), teve-se um valor elevado, contudo isso se justifica por ser apresentada no gráfico a resistência da região reparada, onde foram utilizadas 16 camadas de fibras. Para que a resistência fosse apenas reestabelecida para o nível do duto original (29,1 MPa), seriam necessárias apenas 11 camadas de fibras.

Comparando com resultados numéricos obtidos por Mazurkiewicz *et al.* (2017) verificou-se que os resultados são similares para o caso 1 e 4, havendo uma maior discrepância para o caso 3, em que o modelo gerado pelo autor ficou muito mais próximo a pressão de falha do experimento.

Pôde-se observar que os resultados são bastante próximos aos resultados experimentais, para os casos 1, 2 e 4 os erros percentuais  $((P_{f\ autor} - P_{f\ Exp})/P_{f\ Exp})$  respectivamente foram 1,8%, 2,9% e -2,1%, sendo mais conservador para os caso 4. Desta forma considerou-se o modelo válido para os casos apresentados.

As diferenças com resultados dos experimentos são bem justificadas devido aos dutos apresentarem uma tolerância dimensional inerente ao processo de fabricação, causando variação da espessura e circularidade, possibilidade de descontinuidades de material e para o entalhe dos defeitos, erros de usinagem com variação de espessura (Figura 31) e criação de concentradores de tensão.

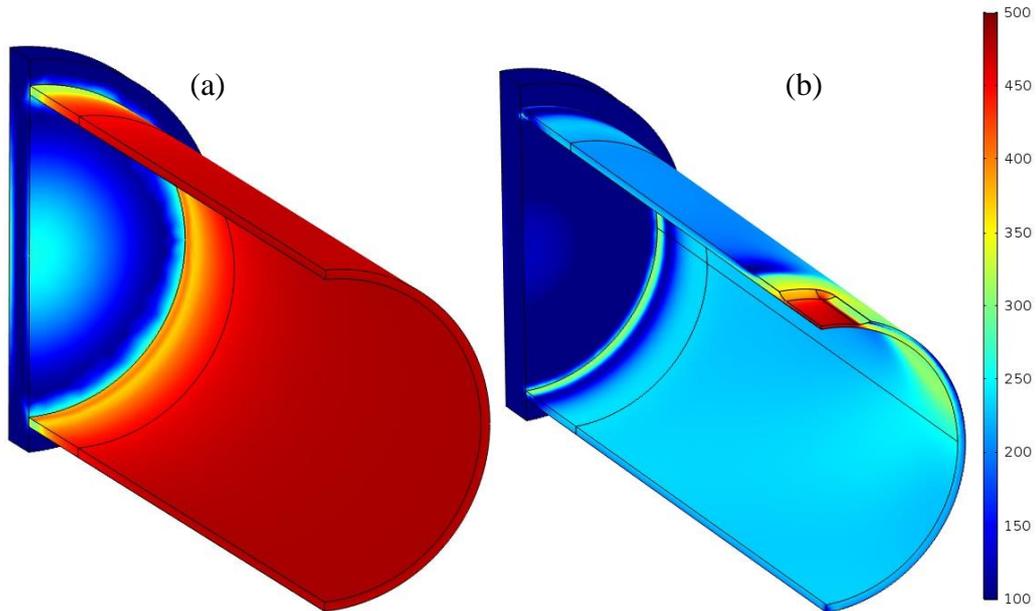
A Figura 32 apresenta as simulações para o caso 1 e 2 em suas respectivas pressões de falha, com escala de cores para a tensão equivalente de von Mises, visto que o material é um aço. Já para o caso 4, a simulação apresentou não só o duto, como também o reparo compósito, assim, optou-se por apresentar uma imagem da simulação (Figura 33) com escala de cores em função do fator de segurança para cada critério de falha adequado em seus respectivos domínios já descrito na seção 4.2.2.4.

Figura 31 - Marcação no corpo de prova de dimensões e espessuras medidas em mm.



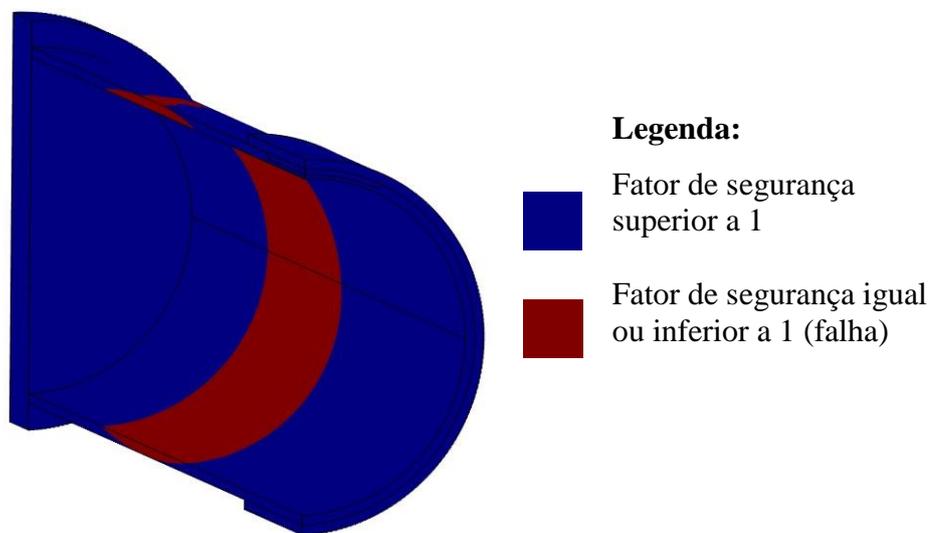
Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

Figura 32 - Tensão equivalente de von Mises em MPa para pressão interna de falha  
 (a) Caso 1 com pressão de 28,1 MPa (b) Caso 2 com pressão de 14,2 MPa



Fonte: O Autor (2019).

Figura 33 - Fator de segurança do caso 4 na pressão de falha do duto (28,5 MPa)



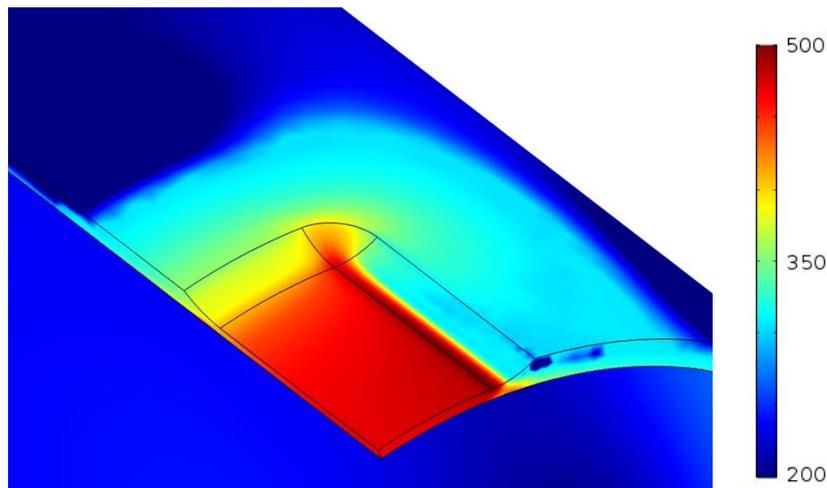
Fonte: O Autor (2019).

Analisando a simulação apresentada para o caso 1 na Figura 32 (a), observou-se que a região sem influência do tempo, quase que uniformemente apresentou a mesma tensão equivalente de von Mises, ficando claro que o duto pode ser tratado como de paredes finas.

Para o caso 2 na Figura 32 (b) ficou claro o impacto do defeito e indicando que a falha ocorreu a partir da borda interna do defeito, apresentando a necessidade de uma modelagem 3D e não permitindo uma simulação com elemento de casca, por exemplo, a Figura 34 apresenta a região do defeito em maior detalhe.

A simulação para o caso 4 (Figura 33) mostra que a falha ocorreu entre o reparo e a face do duto, corroborando com o resultado experimental apresentado na Figura 35. Importante ressaltar que o valor da pressão de falha foi superior ao caso 1 devido ao local de falha estar sofrendo influência da tampa de aço e do reparo compósito, caso o tampo estivesse longe o suficiente, a pressão de falha deveria equivaler ao caso 1.

Figura 34 - Tensão equivalente de von Mises em MPa para pressão interna de falha para caso 2 com pressão de 14,2 MPa em detalhe do defeito



Fonte: O Autor (2019).

Figura 35 - Tubo para caso 4 após ensaio experimental



Fonte: Mazurkiewicz *et al.* (2017).

## 5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LARGURA E DO COMPRIMENTO DO REPARO COMPÓSITO

Com as simulações realizadas, foi possível analisar que houve pequenas variações de tensões no duto e nos componentes de reparo, apresentando alguma significância apenas no duto. A tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) para os dutos na pressão falha estão apresentados na Figura 37, em que é possível observar a variação de tensão de acordo com a geometria, apresentando elevação da tensão na região desgastada e fora do reparo, além disso, fica evidente que quanto maior o reparo, a região central também apresenta maior elevação de tensão, devido

ao fato do efeito restritivo das bordas, sendo seu movimento restringido apenas pelo preenchimento em epóxi e a luva compósita.

Pode-se observar, na Figura 36, que existe uma tendência para o aumento das tensões com o aumento da largura e uma diminuição das tensões com o aumento do comprimento. Apesar dessa tendência, de acordo com a Tabela 16, é notável que a diferença de tensão máxima da menor dimensão para a maior (nos dois casos estudados) não é superior a 3%.

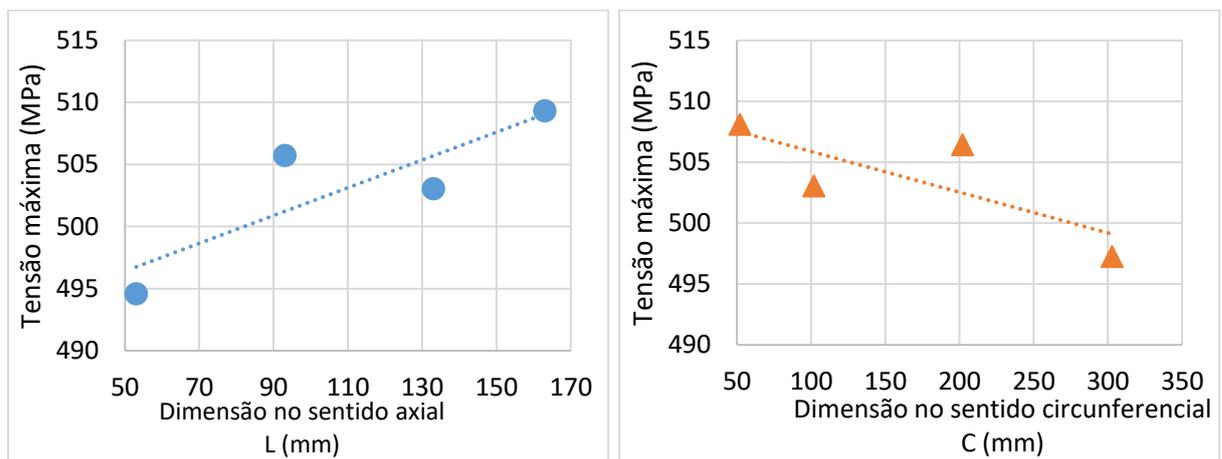
Com a utilização dos mesmos critérios de falhas para validação, a pressão de falha foi a mesma encontrada para todas as simulações. Isso é perfeitamente explicável devido ao fato do local da falha ser na região fora do reparo, ou seja, determinada pela resistência entre o duto e o tampo de aço.

Tabela 16 - Tensão máxima de von Mises no duto, para pressão de falha, na respectiva dimensão de reparo

Variação da dimensão L (Axial)			Variação da dimensão C (Circunferencial)		
L(mm) x C(mm)	Pressão de falha (MPa)	$\sigma_{eq\ máx.}$ do duto (MPa)	L(mm) x C(mm)	Pressão de falha (MPa)	$\sigma_{eq\ máx.}$ do duto (MPa)
53 x 102	28,5	494,6	133 x 52	28,5	508,1
93 x 102	28,5	505,7	133 x 102	28,5	503,1
133 x 102	28,5	503,1	133 x 202	28,5	506,4
163 x 102	28,7	509,3	133 x 302	28,5	497,3

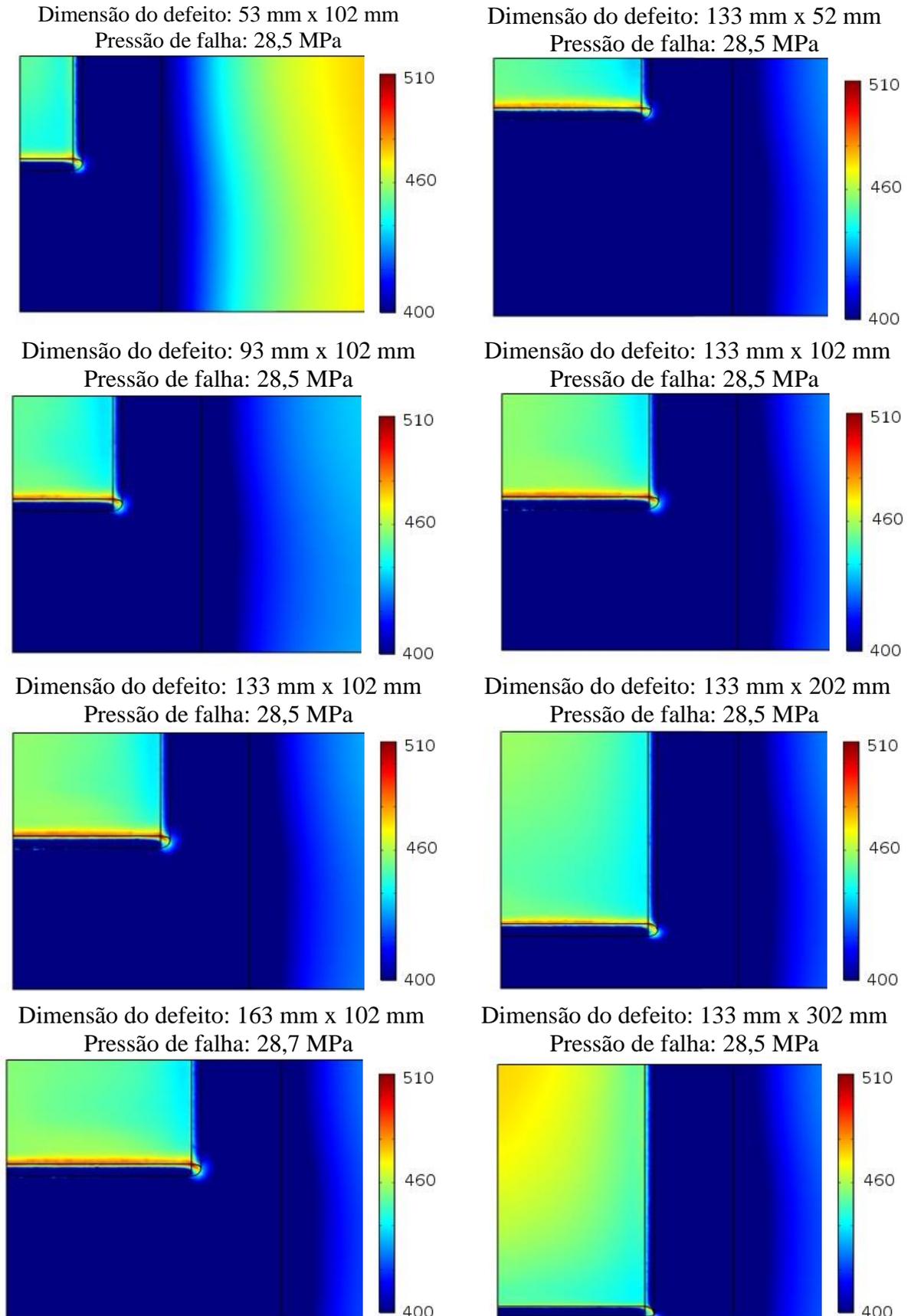
Fonte: O Autor (2019).

Figura 36 - Evolução da tensão máxima com as dimensões do reparo compósito



Fonte: O Autor (2019).

Figura 37 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) na pressão de falha com a respectiva dimensão de desgaste



Fonte: O Autor (2019).

### 5.3 ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE COLÔNIAS

Para o estudo da influência de colônias os resultados da pressão de falha para dutos sem reparo estão presentes na Tabela 17, sendo encontrados resultados equivalentes ao apresentado por Benjamin *et al.* (2005).

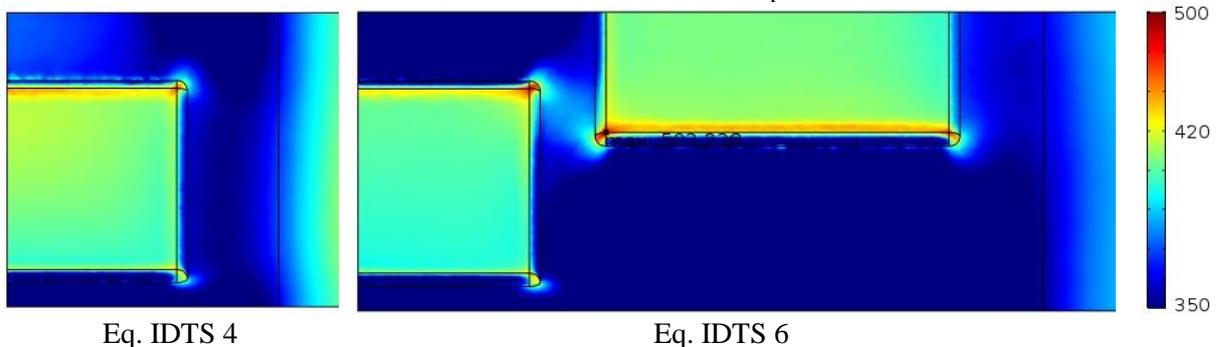
Tabela 17 - Perda percentual de resistência de duto com colônias de defeitos

Espécime	Pressão de falha	Perda percentual
Duto íntegro	28,1	-
Equivalente ao IDTS 2	14,2	-49% (Em relação ao duto íntegro)
Equivalente ao IDTS 4	13	-8% (Em relação ao IDTS 2)
Equivalente ao IDTS 6	12,7	-11% (Em relação ao IDTS 2)

Fonte: O Autor (2019).

Os resultados dos modelos simulados com reparos, como esperado, apresentaram soluções equivalentes aos estudos da dimensão do reparo (seção 5.2), havendo pequenas variações de tensões no duto e componentes de reparo. Similarmente, a tensão equivalente de von Mises para os dutos na pressão de falha foi apresentada na Figura 38. Mesmo com as restrições ocasionadas pela luva de material compósito, observa-se visualmente a interação entre os campos de tensão causados entre os defeitos.

Figura 38 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) na pressão de falha de 28,5 MPa



Fonte: O Autor (2019).

É possível identificar na Tabela 18 que o reparo acarretou em uma tensão máxima no duto similar entre os espécimes equivalente ao IDTS 6 com o equivalente ao IDTS 2. Já para o caso de IDTS 4, houve inclusive uma redução na tensão máxima. O local da falha nos três casos ocorreu na região fora do reparo, ou seja, entre o duto e o tampo de aço.

Tabela 18 - Tensão máxima de von Mises e pressão de falha obtidos nos dutos

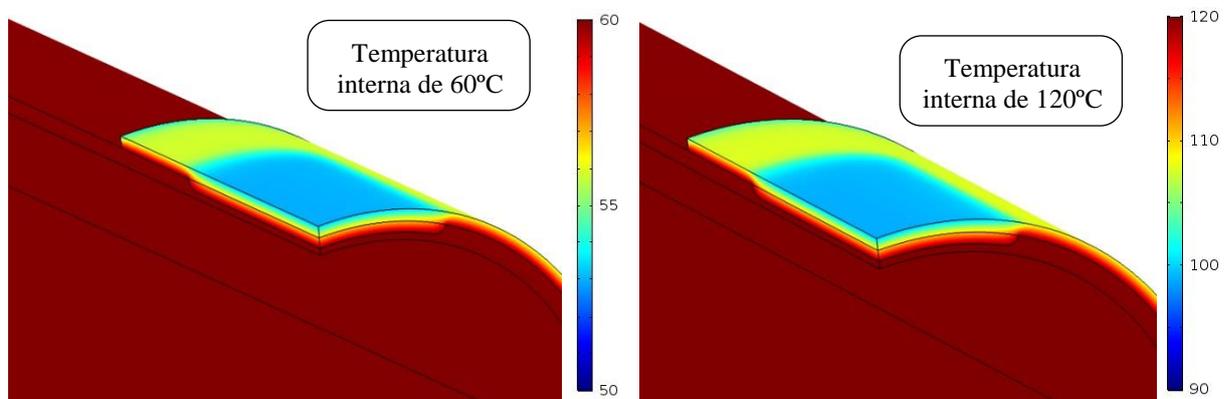
Espécime	Pressão de falha (MPa)	$\sigma_{e \text{ máx.}}$ do duto (MPa)
Equivalente ao IDTS 2	28,5	503,1
Equivalente ao IDTS 4	28,5	468
Equivalente ao IDTS 6	28,6	503,2

Fonte: O Autor (2019).

#### 5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Como resultado das simulações, a distribuição de temperatura para dois casos é apresentada na Figura 39. Pode-se observar que a temperatura se apresentou quase uniforme em todo o duto (tanto na região reparada como na região não reparada) com nível muito próximo da temperatura na parede interna (condição de contorno). O mesmo não pode ser dito do preenchimento e da luva em material compósito, que devido aos materiais poliméricos apresentarem uma baixa condutividade, resultou em um pequeno gradiente de temperatura, sendo tão maior, quanto maior a diferença de temperatura.

Figura 39 - Distribuição de temperatura para temperatura interna de 60°C e 120°C



Fonte: O Autor (2019).

As distribuições da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) na pressão falha dos dutos foram apresentadas na Figura 40, em que foi possível observar a variação de tensão de acordo com a geometria, apresentando elevação da tensão na região desgastada e fora do reparo, com a falha ocorrendo fora da região reparada.

A Tabela 19 resume as pressões de falha por modelo analítico ( $P_{falha\ Analítico}$ ), a pressão de falha encontrada na simulação ( $P_{falha\ Numérico}$ ) e a espessura de reparo para recompor a resistência mecânica do duto.

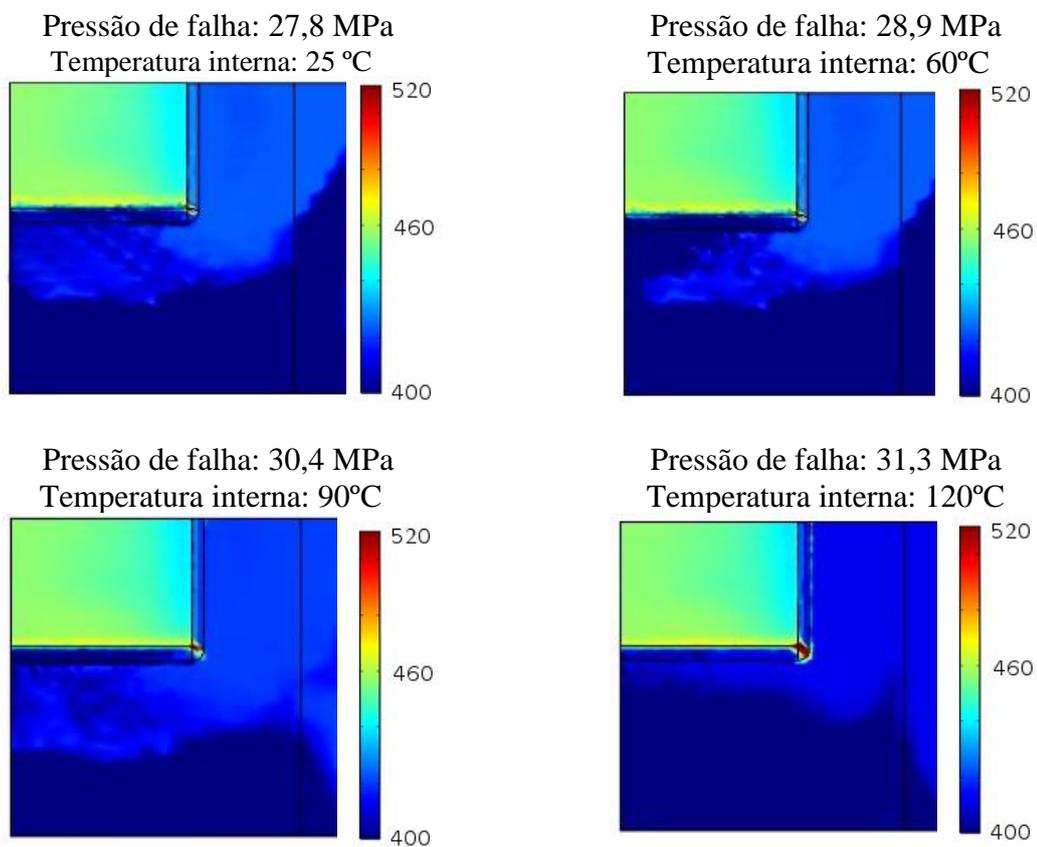
As pressões de falha do duto apresentaram um aumento em função do  $\Delta T$ , ocorrendo devido às características do material, onde apresenta um aumento de propriedades mecânicas até uma temperatura entorno de 200 °C. Em comparação com resultados analíticos, os resultados numéricos foram menos conservativos em até 2,9%.

É também possível notar que as espessuras de reparo necessitaram de um aumento em relação à temperatura, tanto para acompanhar a elevação da pressão de falha, quanto para acompanhar a variação de propriedades físicas.

Tabela 19 - Pressões obtidas em relação a aplicação do carregamento térmico

$T_{\text{interno}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$P_{\text{falha Analítico}} \text{ (MPa)}$	$P_{\text{falha Numérico}} \text{ (MPa)}$	Espessura do reparo (mm)
25	0	27,0	27,8	3,4
60	35	28,4	28,9	3,6
90	65	29,6	30,4	3,8
120	95	30,8	31,3	3,9

Fonte: O Autor (2019).

Figura 40 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) para a pressão de falha com a respectiva temperatura interna

Fonte: O Autor (2019).

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O reparo de dutos por luvas de material compósito é um método eficiente, de relativo baixo custo e se bem dimensionado é seguro, contudo, algumas limitações dos materiais utilizados exigem um cuidado, como a temperatura em que está submetido. Uma ferramenta que se apresenta bem poderosa para análise do uso desse tipo de reparo são *softwares* de simulação multifísicas, permitindo o acoplamento das principais físicas envolvidas em um duto: cargas mecânicas e térmicas.

Neste trabalho foi apresentada uma modelagem numérica de dutos com ou sem reparo compósito, utilizando o *software* comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Os modelos foram validados a partir de dados experimentais disponíveis na literatura. O *software* COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> permitiu a aplicação de efeitos mecânicos não lineares, propriedades anisotrópicas de materiais compósitos e fenômenos de expansão térmica e o MEF se apresentou como sendo uma ferramenta de boa acurácia e bastante promissora.

Três estudos foram elaborados, o primeiro foi um estudo paramétrico buscando verificar o impacto da dimensão do defeito no dimensionamento de um reparo de luva compósita, o segundo estudo buscou a influência de colônias de defeito, por fim, ocorreu uma análise de efeitos térmicos com intuito da aplicação de luvas compósitas em dutos com temperatura acima da temperatura ambiente, sendo alcançadas as conclusões:

- Atualmente o sistema de reparo compósito em um duto com perda de metal é consideravelmente limitado as restrições intrínsecas da matriz polimérica de um compósito reforçado com fibras, como a limitação da temperatura pela temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) e a temperatura de deflexão ao calor (HDT);
- O *software* comercial COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> se apresentou como uma ferramenta capaz e de utilização adequada para engenheiros no uso de simulações, pelo método de elementos finitos, de reparos compósitos com e sem gradientes de temperatura;
- Modelos numéricos foram construídos, simulados e pós-processados com o COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>, ocorrendo validação com resultados obtidos por métodos experimentais para um duto íntegro, um duto com desgaste e um duto desgastado com luva de material compósito, constituído de fibra de vidro e epóxi, apresentando erros na pressão de falha de 1,8%, 2,9% e -2,1% respectivamente;
- Existiu uma tendência para elevação nas tensões no defeito com o aumento da largura e uma diminuição das tensões com o aumento do comprimento, contudo, as simulações

realizadas apresentaram diferença de tensão máxima da menor dimensão para a maior (nos dois casos estudados) não superior a 3%, ou seja, não indicando grande significância no dimensionamento do reparo;

- As simulações realizadas indicaram que a ocorrência de colônias de defeito não apresentou significância no dimensionamento de reparo;
- As simulações térmicas indicaram que o carregamento térmico teve um impacto significativo nas pressões de falha e deve ser considerado nos estudos de dimensionamento de reparos compósitos, para garantir sua segurança operacional.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir, encontram-se algumas sugestões de trabalhos posteriores que podem ser desenvolvidos para aplicação de luvas de materiais compósitos:

- Extensão do modelo numérico com carregamento combinado de pressão interna, forças axiais, tensões cisalhantes, momentos torçores e momentos fletores com validação experimental;
- Estudo paramétrico da influência de propriedades mecânicas do material da luva compósita e do material de enchimento, visando seleção e desenvolvimento de novos materiais;
- Realizar estudos numéricos e experimentais para a interface de contato entre o duto e os materiais compósitos;
- Estudar a influência de efeitos termomecânicos com considerações variadas de carregamento térmico e transiente;
- Estudo buscando avaliar a influência do comprimento da luva além do defeito.

## REFERÊNCIAS

- AGY. **High strength glass fibers**. South Carolina: AGY, 2006. (Technical Paper).
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2000.
- AMORIM, Felipe do Carmo. **Influência da temperatura no comportamento mecânico do polímero DGEBA (Diglicidil Éter Bisfenol A)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- ANGÉLICO, Ricardo Afonso. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2018**. Rio de Janeiro: ANP, 2018.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **PCC-2-2015: repair of pressure equipment and piping**. New York: ASME, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15280-1: dutos terrestres parte 1: projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Definição**. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>. Acesso em: 29 jan. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D648-18: standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position**, West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1142-15: standard terminology relating to thermophysical properties**, west conshohocken: ASTM International, 2015.
- BEER, Ferdinand Pierre. *et al.* **Mechanics of Materials**. 6th ed. New York: McGraw Hill, 2012.
- BENJAMIN, A. C. *et al.* Burst tests on pipeline containing interacting corrosion defects. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING*, 24<sup>th</sup>, 2005, Halkidiki. **Proc [...]**. Halkidiki: OMAE, 2005.
- BISCAINHO, Clarissa Alves. **Materiais Compósitos: um dos maiores avanços**. 2017. Disponível em: <https://betaeq.com.br/index.php/2017/05/19/materiais-compositos/>. Acesso em: 9 set. 2018.
- BOUCHONNEAU, Nadège. **Étude du systèmes d'isolation thermique pour les grandes profondeurs d'eau**. 2007. Tese (Docteur Sciences pour l'Ingénieur) - Université de Franche-comté, Paris, 2007.

CALLISTER, William D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CHAN, P. H. *et al.* The flexural properties of composite repaired pipeline: Numerical simulation and experimental validation. **Composite Structures**, v. 133, p.312-321, dez. 2015.

CONCAWE. **Performance of European cross-country oil pipelines**: statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971. Bruxelas: CONCAWE, 2018.

CRONIN, Duane S. **Assessment of corrosion defects in pipelines**. 2000. Tese (Doutorado) - University of Waterloo, Waterloo, 2000.

CURTY, Larissa Azevedo. **Estudo experimental dos consoles curtos de concreto armado reforçado com compósitos de fibras de carbono**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DANIEL, I. M. Failure of Composite Materials. **Strain**, v. 43, n. 1, p.4-12, fev. 2007.

DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. **Engineering mechanics of composite materials**. 2th ed. New York: Oxford University Press, 2006.

DUELL, J.M.; WILSON, J.M.; KESSLER, M.R.. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. **International journal of pressure vessels and piping**, [S.l.], v. 85, n. 11, p.782-788, nov. 2008.

DUTRA, Aldo Cordeiro; NUNES, Laerce de Paula. **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

FARRAG, Khalid (org.). **Selection of pipe repair methods**. Illinois: Gas Technology Institute, 2013.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **24817**: petroleum, petrochemical and natural gas industries — composite repairs for pipework — qualification and design, installation, testing and inspection. Geneva: ISO, 2017.

LOPES JUNIOR, Rodinei. **Estimativa da pressão de falha de tubulações corroídas reparadas com compósitos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

KHAZRAJI, Ahmed Naif Al-; AMIN, Samir Ali; WARMIZYARI, Husam Ahmed Al-. Investigation of mechanical properties for carbon steels tubes serviced at high temperature after long time of operation. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 10, n. 17, p.60-68, dez. 2016.

LIM, Kar Sing et al. An Overview of Corroded Pipe Repair Techniques Using Composite Materials. **International science index, materials and metallurgical engineering**, v. 10, n. 1, p.19-25, 2016.

MAZURKIEWICZ, Lukasz *et al.* Experimental and numerical study of steel pipe with part-wall defect reinforced with fibre glass sleeve. **International journal of pressure vessels and piping**, v. 149, p.108-119, jan. 2017.

MCCREADY, Jack R.; KNOFCZYNSKI, Matthew; KELLER, Michael W. Survivability of composite repairs of piping subjected to flexural loads. **International journal of pressure vessels and piping**, v. 152, p.7-14, maio 2017.

MENDONÇA, Paulo de Tarso. **Materiais compostos & estruturas-sanduiche**. Barueri: Manole, 2005.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Safet report**: transportation safety database. Washington: NTSB, 2002. (NTSB/SR-02/02)

RODEIRO, Pablo Filgueira. **Análise de distribuição de temperaturas e tensões residuais em soldas do tipo ring-weld**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROHEM, Ney Robson Ferreira. **Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2010.

SAEED, Nariman. **Composite overwrap repair system for pipelines**: onshore and offshore application. 2015. Tese (Doctor of Philosophy) - The University of Queensland, Queensland, 2015.

SAEED, Nariman; RONAGH, Hamid; VIRK, Amandeep. Composite repair of pipelines, considering the effect of live pressure-analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p.605-610, mar. 2014.

SHAMSUDDOHA, Md. **Behaviour of infilled rehabilitation system with composites for steel pipe**. 2014. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Southern Queensland, Toowoomba, 2014.

SHAMSUDDOHA, Md *et al.* Characterisation of mechanical and thermal properties of epoxy grouts for composite repair of steel pipelines. **Materials & Design** (1980-2015), v. 52, p.315-327, dez. 2013.

SIRK, Timothy W. et al. Bi-modal polymer networks: Composition-dependent trends in thermal, volumetric and structural properties from molecular dynamics simulation. **Polymer**, v. 58, p.199-208, fev. 2015.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: cálculo**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: materiais projetos e montagem**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

THYSSENKRUPP MATERIALS INTERNATIONAL. **Material data sheet ASTM A106**. Hamm: THYSSENKRUPP, 2011.

TROTIGNON, Jean-pierre et al. **Matières plastiques**: structures-propriétés, mise en oeuvre, normalisation. 6. ed. Paris: AFNOR, 1996.