

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Filipe Barcauí Guedes  
Eduardo da Rocha Santos Manhães**

**Análise da Integridade Estrutural de Tubulações com corrosão por meio da  
Metodologia de Adequação ao Uso (*Fitness-For-Service*)**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Rio de Janeiro  
2024**

**Filipe Barcauí Guedes**  
**Eduardo da Rocha Santos Manhães**

**Análise da Integridade Estrutural de Tubulações com corrosão por meio da  
Metodologia de Adequação ao Uso (*Fitness-For-Service*)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica, do Departamento  
de Engenharia Mecânica, do Centro  
Federal de Educação Tecnológica Celso  
Suckow da Fonseca.

Orientador: Pedro Manuel Calas  
Lopes Pacheco

Coorientador: Bruno Felipe  
Silva

**Rio de Janeiro**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G924 Guedes, Filipe Barcauí  
Análise da integridade estrutural de tubulações com corrosão por meio da metodologia de adequação ao uso (fitness-for-service) / filipe barcauí guedes [e] Eduardo da Rocha Santos Manhães. — 2024.  
118f. : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.

Bibliografia : f. 114-118

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientador: Bruno Felipe Silva

1. Engenharia mecânica. 2. Análise estrutural (Engenharia). 3. Tubulação - Corrosão. 4. Mecânica do solo I. Manhães, Eduardo da Rocha Santos. II. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). III. Silva, Bruno Felipe. (Coorient.). IV. Título.

CDD 621

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, pilares fundamentais em nossas vidas. Aos nossos pais, pelo amor incondicional e pelo apoio constante, e aos nossos irmãos, pelo incentivo e companheirismo. Sem a presença, os conselhos e o carinho de todos vocês, esta jornada teria sido muito mais difícil. Este trabalho é uma pequena retribuição por todo o apoio, amor e incentivo que sempre nos deram. Com toda nossa gratidão, Filipe e Eduardo.

## **AGRADECIMENTOS**

Nós gostaríamos de expressar nossos sinceros agradecimentos às pessoas que nos apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

Eu Filipe, agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional e encorajamento durante toda a minha jornada acadêmica. Agradeço aos meus amigos da faculdade, que estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldade e celebração. Sou grato ao professor Pedro Manuel e ao Bruno Felipe, cuja orientação e conhecimento foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Agradeço também aos colegas e supervisores do meu estágio na Modec, especialmente ao André Figueiredo, a Aymê Assis e ao Lucas Serrano, por suas orientações e ensinamentos que foram cruciais no aprendizado da metodologia apresentada neste projeto final.

Eu Eduardo, gostaria de agradecer primeiramente ao meu pai, por sempre acreditar em mim e me dar todo o suporte necessário. Agradeço aos meus amigos, especialmente ao Filipe, por todo o apoio e incentivo ao longo desse trabalho. Sou imensamente grato ao professor Pedro Manuel e ao Bruno Felipe, pela paciência, orientação e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao Cefet/RJ por todo o meu desenvolvimento profissional e pessoal durante a trajetória de graduação.

Por fim, agradecemos a todos os professores e colegas do curso de Engenharia Mecânica do Cefet/RJ, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Dê-me uma alavanca longa o  
suficiente e um ponto de apoio, e  
moverei o mundo.  
(Archimedes, 250 a.C.)

## RESUMO

GUEDES, Filipe. MANHÃES, Eduardo. **Análise da Integridade Estrutural de Tubulações com corrosão por meio da Metodologia de Adequação ao Uso (*Fitness-For-Service*)**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2024.

A integridade estrutural é crucial para manter a forma e a função de sistemas ao longo do tempo. Em diversas áreas da engenharia, a integridade busca evitar falhas catastróficas e garantir segurança. Tubulações, essenciais em aplicações industriais, estão sujeitas a processos de degradação, como corrosão, que podem provocar falhas como vazamentos. A Metodologia proposta pela norma API 579-1, Análise de Adequação ao Uso, é uma ferramenta valiosa para avaliar integridade de componentes mecânicos, oferecendo uma visão precisa do estado industrial. Em ambientes *offshore*, essa abordagem otimiza operações e logística, contribuindo para a mitigação de riscos. Este estudo visa analisar as características básicas e os princípios utilizados nessa metodologia. Uma tubulação real é analisada através da metodologia em questão e de outras formas de avaliações envolvendo modelos analíticos de Mecânica dos Sólidos e o código de projeto de tubulações ASME B31.3, de modo a avaliar as condições seguras de operação recomendadas pelas diferentes abordagens. Portanto, este trabalho busca aprofundar o conhecimento sobre o critério de avaliação de perda de espessura localizada de acordo com a metodologia da norma API 579-1, aplicando-a de maneira prática em cenário real. Por fim, as metodologias supracitadas são comparadas, evidenciando que a Análise de Adequação ao Uso proporciona resultados menos conservadores, que indicam a integridade da tubulação, enquanto as outras metodologias reprovam a sua operação nas condições de projeto. Dessa forma, a metodologia estabelece limites seguros de operação, otimizando recursos e mantendo a eficiência da operação do sistema considerado.

**Palavras-chave:** API 579-1. Adequação ao Uso. Integridade estrutural. Tubulação. Corrosão. Análise de tensões. Perda de espessura. ASME B31.3. Mecânica dos sólidos.

## ABSTRACT

GUEDES, Filipe. MANHÃES, Eduardo. **Analysis of the Structural Integrity of Pipes with corrosion using the Fitness-For-Service Methodology**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro, 2024.

Structural integrity is crucial to maintaining the form and function of systems over time. In various areas of engineering, integrity seeks to prevent catastrophic failures and ensure safety. Pipes, essential in industrial applications, are subject to degradation processes, such as corrosion, which can cause failures such as leaks. The methodology proposed by the API 579-1 standard, Fitness for Use Analysis, is a valuable tool for assessing the integrity of mechanical components, offering an accurate view of the industrial state. In offshore environments, this approach optimizes operations and logistics, contributing to risk mitigation. This study aims to analyze the basic characteristics and principles used in this methodology. A real pipeline is analyzed using the methodology in question and other forms of evaluation involving analytical models from Solid Mechanics and the ASME B31.3 pipeline design code, to assess the safe operating conditions recommended by the different approaches. Therefore, this work seeks to deepen knowledge about the criteria for assessment of localized thickness loss according to the API 579-1 standard methodology, applying it in a practical way in a real scenario. Finally, the methodologies are compared, showing that the Suitability for Use Analysis provides less conservative results, which indicate the integrity of the pipe, while the other methodologies disapprove of its operation under the design conditions. In this way, the methodology establishes safe operating limits, optimizing resources and maintaining the efficient operation of the system under consideration.

**Keywords:** Fitness-For-Service. Integrity. Piping. Corrosion. Pressurized Component.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de tubulações industriais de uma plataforma. Fonte: Motta, 2021. ....	18
Figura 2 - Critério de falha de <i>Tresca</i> . Adaptado de GERE, 2003. ....	28
Figura 3 - Critério de falha de <i>von Mises</i> . Adaptado de GERE, 2003. ....	29
Figura 4 - Distribuição de Tensões Tubo Cilíndrico. Adaptado de GERE, 2003. ....	30
Figura 5 - Distribuição da tensão longitudinal. Adaptado de GERE, 2003. ....	31
Figura 6 - Distribuição da tensão circunferencial. Adaptado de GERE, 2003. ....	31
Figura 7 - Círculo de Mohr. Fonte: Próprio autor. ....	32
Figura 8 - Distribuição de tensão radial. Adaptado de BUDYNAS; NISBET, 2011. ....	34
Figura 9 - Distribuição de pressões internas e externas. Adaptado de BUDYNAS; NISBET, 2011. ....	35
Figura 10 - Modelo de viga bi apoiada. Fonte: Próprio autor. ....	36
Figura 11 - Modelo da seção crítica do tubo. Fonte: Próprio autor. ....	38
Figura 12 - Vista frontal da seção crítica Fonte: Próprio autor. ....	38
Figura 13- Pontos de tensão máxima e mínima na seção transversal do tubo promovidas pelo peso próprio. Fonte: Próprio autor. ....	39
Figura 14 - Modelo de viga bi engastada. Fonte: Próprio autor. ....	41
Figura 15 - Modelo da seção crítica do tubo. Fonte: Próprio autor. ....	42
Figura 16 - Corrosão em tubo metálico. Fonte: ENCANADOR PORTO ALEGRE, 2023. ....	51
Figura 17 - Corrosão uniforme. Adaptado de LEAL JÚNIOR, 2023. ....	53
Figura 18 - Corrosão localizada. Fonte: OLIVEIRA, 2015. ....	54
Figura 19 - Organograma de Aplicação do <i>FFS</i> . Fonte: API 579-1, 2021. ....	57
Figura 20 - Diagrama de Análise de Falha (FAD). Adaptado de API 579-1, 2021. ....	61
Figura 21 - Fluxograma de trabalho da parte 05. Fonte: API 579-1, 2021. ....	62
Figura 22 - Fluxograma de escolha entre parte 04 e parte 05. Fonte: API 579-1, 2021. ....	63
Figura 23 - Componente do Tipo A. Fonte: HOMELE, 2023. ....	64
Figura 24 - Limites de temperatura e diâmetro nominal para tubos de Tipo A. Fonte: API 579-1, 2021. ....	64
Figura 25 - Limites de temperatura e diâmetro nominal para tubos de Tipo A, para tubos não ferrosos e aços de alta liga. Fonte: API 579-1, 2021. ....	65
Figura 26 - Bocal de vaso de pressão. Fonte: UO, JIANG, ZHANG, WEI, ZHANG, WAN, WANG, 2016. ....	65
Figura 27 - Componente Tipo C. Fonte: ARC MACHINES, 2023. ....	66
Figura 28 - Exemplo de LTA. Adaptado de LU; WANG, 2020. ....	67
Figura 29 - Exemplos de Sulco. Fonte: Adaptado de CHEN, KHOO, CHENG, 2009. ....	67
Figura 30 - Exemplo teórico de Malha. Fonte: LU; WANG, 2020. ....	69
Figura 31 - Construção do <i>CTP</i> . Adaptado de API 579-1, 2021. ....	70
Figura 32 - Enquadramento dos danos. Adaptado de API 579-1, 2021. ....	71
Figura 33 - Exemplo de descontinuidade estrutural ( <i>MSD</i> ). Fonte: JAWAD, FARR, 1984. ....	72
Figura 34 - Perfil de espessura crítica. Adaptado de API 579-1, 2021. ....	73

Figura 35 - Gráfico de definição da aceitação da PMTA. Adaptado de API 579-1, 2021.....	76
Figura 36 - Subdivisões realizadas no <i>CTP</i> . Adaptado de API 579-1, 2021. ....	79
Figura 37 – Tubulação de transporte de gás de processo, componente com dano de perda de espessura localizada devido a corrosão externa. Fonte: Próprio autor.....	82
Figura 38 - Aproximação de área da seção. Fonte: Próprio autor.....	94
Figura 39 – Interseção dos valores de $\lambda$ e $Rt$ . Fonte: Próprio autor.....	96
Figura 40 - <i>CTP</i> longitudinal do dano em estudo. Fonte: Próprio autor.....	99
Figura 41 - Subseção definida ao redor do ponto inicial. Fonte: Próprio autor. ....	99
Figura 42 – Gráfico de tensão equivalente de <i>von Mises</i> (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor. ....	108
Figura 43 - Gráfico de tensão equivalente de Tresca (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor.....	108
Figura 44 – Modelo Analítico para o critério de falha de <i>von Mises</i> de Pressão máxima (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor.....	109
Figura 45 – PMTA (MPa) x Espessura (mm) segundo ASME B31.3. Fonte: Próprio autor.....	110
Figura 46 – Gráfico de PMTA (MPa) para espessura de 2,8 mm, de acordo com todas as metodologias. Fonte: Próprio autor.....	111
Figura 47 - Indicadores de pressão. Fonte: Próprio autor.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicabilidade de acordo com o mecanismo de dano. Adaptado de API 579-1, 2021.....	58
Tabela 2 - Materiais e seus limites de temperatura limite para regime em fluência. Adaptado de API 579-1, 2021.....	68
Tabela 3 - Parâmetro $Mt$ de acordo com $\lambda$ . Adaptado de API 579-1, 2021.....	75
Tabela 4 - Cálculo de Tenacidade a fratura. Adaptado de API 579-1, 2021.....	78
Tabela 5 - Dados do componente.....	82
Tabela 6 - Dados do Dano.....	83
Tabela 7 – Malha de medições de espessura.....	83
Tabela 8 - Resultados do modelo de paredes finas.....	85
Tabela 9 - Resultados do modelo de paredes grossas.....	86
Tabela 10 - Resultados do modelo de viga bi apoiada.....	87
Tabela 11 - Resultados do modelo de viga bi engastada.....	87
Tabela 12 - Relação do raio interno sobre espessura.....	87
Tabela 13 - Tensão Equivalente de <i>von Mises</i> .....	88
Tabela 14 - Tensão Equivalente de Tresca.....	89
Tabela 15 - Pressão máxima modelo analítico.....	89
Tabela 16 - Espessura mínima segundo ASME B31.3.....	91
Tabela 17 - Pressão Máxima de Trabalho Admissível ASME B31.3.....	91
Tabela 18 - Premissas do nível 1.....	93
Tabela 19 - Valores de $FC_{Aml}$ , $Rt$ e $\lambda$ .....	95
Tabela 20 - Validação do nível 1.....	95
Tabela 21 - PMTA calculada para $FFS$ 1.....	95
Tabela 22 – Valores de $Mt$ , $RSF$ e $RSFa$ .....	97
Tabela 23 - Pressão máxima admissível reduzida.....	97
Tabela 24 - Verificação do passo 9 do nível 1.....	97
Tabela 25 - Parâmetros da primeira subseção, definida ao redor do ponto 4.....	100
Tabela 26 - Parâmetros de todas as subseções, definidas ao redor do ponto 4.....	100
Tabela 27 – Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 4.....	101
Tabela 28 - Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 5.....	102
Tabela 29 - Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 3.....	102
Tabela 30 - Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 6.....	103
Tabela 31 - Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 7.....	104
Tabela 32 - Cálculo do $RSF$ para todas as subseções definidas a partir do ponto 2.....	104
Tabela 33- Escolha de $RSF$ mínimo do dano, destacado em vermelho.....	105
Tabela 34 - Nova PMTA reduzida a partir do nível 2.....	105

## LISTA DE SIGLAS

<i>HVAC</i>	<i>Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado</i>
<i>FFS</i>	<i>Fitness-For-Service</i>
<i>API</i>	<i>American Petroleum Institute</i>
<i>ASME</i>	<i>Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos</i>
<i>PMTA</i>	<i>Pressão Máxima de Trabalho Admissível</i>
<i>LCD</i>	<i>Carga Limite do Componente Danificado</i>
<i>LSD</i>	<i>Carga Limite do Componente Sem Dano</i>
<i>FAD</i>	<i>Diagrama de Avaliação de Falha</i>
<i>LUC</i>	<i>Limite de colapso plástico do componente</i>
<i>LDC</i>	<i>Limite de colapso plástico do componente danificado</i>
<i>LTA</i>	<i>Afinamento Localizado</i>
<i>CTP</i>	<i>Perfil de Espessura Crítico</i>
<i>MT</i>	<i>Partícula Magnética</i>
<i>PT</i>	<i>Líquido Penetrante</i>
<i>UT</i>	<i>Ultrassônico</i>
<i>MSD</i>	<i>Descontinuidade Estrutural Principal</i>
<i>PMTAr</i>	<i>Pressão Máxima de Trabalho Admissível Reduzida</i>
<i>PSV</i>	<i>Válvula de segurança</i>
<i>GLP</i>	<i>Gás Liquefeito de Petróleo</i>
<i>GNV</i>	<i>Gás Natural Veicular</i>
<i>SCH</i>	<i>Espessura padronizada comercial de tubos</i>
<i>ASTM</i>	<i>Sociedade Americana de Testes e Materiais</i>
<i>DCL</i>	<i>Diagrama de Corpo Livre</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_n$	Tensões principais
$\sigma_c$	Tensão circunferencial
$\sigma_l$	Tensão longitudinal
$\sigma_r$	Tensão radial
$\sigma_{EQ}^{VM}$	Tensão equivalente de <i>von Mises</i>
$\sigma_{EQ}^{Tresca}$	Tensão equivalente de Tresca
$S_{adm}$	Tensão admissível
$r_i$	Raio interno do tubo
$r_o$	Raio externo do tubo
$r$	Raio do tubo
$D_e$	Diâmetro externo do tubo
$D_i$	Diâmetro interno do tubo
$t$	Espessura de parede do tubo
$F_y$	Força na direção y
$p$	Pressão
$L$	Comprimento do tubo
$\sigma_x$	Tensão na direção x
$\sigma_y$	Tensão na direção y
$\sigma_z$	Tensão na direção z
$\sigma_x^{Mec}$	Tensão mecânica na direção x
$\sigma_l^P$	Tensão na direção longitudinal devido à pressão
$\sigma_l^R$	Tensão resultante na direção longitudinal
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento na direção xy
$\tau_{xz}$	Tensão de cisalhamento na direção xz
$\tau_{yz}$	Tensão de cisalhamento na direção yz
$p_i$	Pressão interna
$p_o$	Pressão externa
$q$	Carga distribuída
$m$	Massa
$g$	Aceleração da gravidade

$\rho$	Massa específica
$v$	Volume
$M_n$	Momento na direção n
$N_n$	Reação normal na direção n
$I$	Momento de inércia
$x$	Comprimento da seção crítica na direção x
$y$	Comprimento da seção crítica na direção y
$V$	Força cortante
$A$	Área da seção transversal definida na seção crítica
$Q_Z^*$	Momento de primeira ordem de área
$t^*$	Espessura da viga no local de análise
$\bar{y}$	Coordenada y do centroide
$A'$	Área de interesse da seção crítica
$R_n$	Reação de apoio
$C$	Sobre espessura de corrosão
$t_m$	Espessura final de projeto
$W$	Fator de eficiência de solda
$Y$	Fator de redução
$E$	Fator de qualidade
$t_{rd}$	Espessura residual
$t_{mm}$	Espessura mínima medida
$s$	Comprimento longitudinal do dano
$c$	Comprimento circunferencial do dano
$g_l$	Comprimento do sulco
$g_w$	Largura do sulco
$g_r$	Raio do sulco
$b$	Orientação do sulco
$L_{MSD}$	Distância do dano até à descontinuidade estrutural mais próxima
$LOSS$	Perda Uniforme de Espessura no Componente
$FCA$	Corrosão Futura no Componente Fora da Região do Dano
$FCA_{ml}$	Corrosão Futura no Componente na Região do Dano
$t_c$	Espessura de parede futura fora da região do dano
$R_t$	Parâmetro de espessura remanescente

$\lambda$	Parâmetro de comprimento longitudinal
$M_t$	Fator de Folias
$RSF$	Fator de Resistência Remanescente
$RSF_a$	Fator de Resistência Remanescente
$E_c$	Eficiência de junta circunferencial
$E_l$	Eficiência de junta longitudinal
$t_{min}^L$	Eficiência de junta circunferencial
$s_i$	Distância longitudinal da subseção
$s_e$	Distância longitudinal da subseção adjacente
$s_s$	Comprimento da subseção
$A^i$	Área de perda de material baseada em $s^i$
$A_o^i$	Área original da região baseada em $s^i$
$M_t^i$	Fator de folias para subseção $i$
$\lambda_i$	Parâmetro de comprimento longitudinal para cada subseção $i$
$RSF^i$	Fator de resistência equivalente de cada subseção $i$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Projeto de tubulações .....</b>	<b>26</b>
2.1.1 Tubo cilíndrico de paredes finas .....	29
2.1.2 Tubo cilíndrico de paredes grossas .....	33
2.1.3 Carregamentos de peso próprio do tubo e peso do fluido .....	36
2.1.4 Carregamentos combinados de pressão e peso .....	44
2.1.5 Projeto segundo ASME B31.3 .....	45
<b>2.2 Tipos de danos .....</b>	<b>49</b>
2.2.1 Corrosão .....	50
2.2.1.1 Corrosão uniforme ou generalizada .....	53
2.2.1.2 Corrosão localizada.....	53
<b>3 NORMA DE ADEQUAÇÃO AO USO.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Visão geral.....</b>	<b>56</b>
<b>3.2 Metodologia <i>FFS</i>.....</b>	<b>57</b>
3.2.1 Parte 5: Avaliação da perda de espessura local de metais.....	62
3.2.1.1 Definição de tipos de componentes .....	63
3.2.1.2 Aplicabilidade e limitações.....	66
3.2.1.3 Inspeção e medição de espessura.....	69
3.2.1.4 Dados requeridos .....	71
3.2.1.5 Nível 1.....	72
3.2.1.6 Nível 2.....	77
<b>4 ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....</b>	<b>81</b>

<b>4.1 Descrição do caso.....</b>	<b>81</b>
4.1.1 O problema.....	82
<b>4.2 Metodologia .....</b>	<b>84</b>
4.2.1 Método analítico.....	84
4.2.2 Normas .....	89
4.2.2.1 Cálculo de espessura mínima ASME B31.3 .....	90
4.2.2.2 <i>FFS</i> Nível 1 .....	92
4.2.2.3 <i>FFS</i> Nível 2.....	98
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>107</b>
<b>5.1 Comparação das metodologias.....</b>	<b>107</b>
<b>5.2 Resultados alcançados .....</b>	<b>107</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Pastoukhov (2010), a integridade estrutural de um projeto se refere à capacidade de um sistema, estrutura ou componente manter sua forma, função e desempenho esperados ao longo do tempo, sob diversas condições de carga, uso e exposição a diferentes fatores ambientais. Esta é uma característica crítica em diversas áreas, como engenharia mecânica, engenharia civil, engenharia aeroespacial, entre outras. Além disso, a integridade estrutural, sob condições especificadas, envolve a garantia de que a estrutura ou componente não sofrerá falhas catastróficas. Para assegurar a integridade estrutural em um projeto, são realizadas análises de engenharia, simulações computacionais, testes de materiais e protótipos, inspeções regulares e manutenção preventiva.

No que diz respeito às tubulações, esses sistemas de transporte de fluidos (líquidos, gases ou sólidos suspensos), compostos geralmente por tubos ou dutos, são feitos na maior parte das vezes de materiais como metal, plástico, cerâmica ou concreto. Portanto, desempenham um papel fundamental em uma variedade de aplicações industriais, como o fornecimento de água potável, distribuição de gás, transporte de produtos químicos, petróleo e gás, bem como em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC). Segundo Antaki e Faulkner (2003), a integridade das tubulações é vital para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade das operações. Os danos mais habituais nesses sistemas industriais são: corrosão, cavitação, fadiga, deformação, vazamentos, obstruções, dentre outros. A Figura 1 representa um sistema de tubulações de processo em uma plataforma de produção de petróleo.



**Figura 1 - Sistema de tubulações industriais de uma plataforma. Fonte: Motta, 2021.**

Por essas razões, a Análise de Adequação ao Uso da API 579-1, do inglês *Fitness-For-Service (FFS)*, emerge como uma abordagem altamente relevante no contexto das instalações industriais, particularmente para otimizar a execução e a logística envolvidas em operações offshore. Essa norma possibilita a avaliação de danos como corrosão, erosão, fadiga e danos mecânicos, bem como a avaliação de trincas e falhas. Além disso, permite o estudo de tensões e deformações, bem como os efeitos de pressão interna e externa, e temperaturas extremas. A API 579-1 também considera os efeitos de fluência e relaxação, proporcionando critérios claros de aceitação para determinar a continuidade segura da operação dos equipamentos. Portanto, engloba aspectos como a contratação de mão de obra de terceiros, a busca por pessoal altamente qualificado, o gerenciamento de pessoas a bordo (*People on Board*), planejamento e fabricação de tubos.

A API 579-1 (2021) descreve a metodologia *FFS* para avaliar componentes pressurizados com defeitos ou danos. Se a avaliação confirmar que o equipamento é seguro nas condições atuais, sua operação pode continuar, desde que sejam implementados programas de monitoramento e inspeção adequados. Desta forma, a abordagem da Análise de Adequação ao Uso (*Fitness-For-Service*) é de extrema utilidade para a avaliação da integridade de componentes pressurizados, permitindo estender a vida útil de equipamentos e sistemas de tubulações industriais que estejam em operação, mesmo que apresentem condições divergentes das idealizadas no projeto, sejam elas decorrentes de danos relacionados à degradação ao longo do tempo ou de defeitos de fabricação.

Ademais, a Análise de Adequação ao Uso oferece uma metodologia de avaliação dividida em três níveis, conforme os danos ou defeitos identificados no componente em estudo. Se o componente for aprovado em algum desses níveis, as ações corretivas podem ser postergadas, sendo necessárias apenas quando a avaliação em todos os três níveis o reprovar. Logo, ela é particularmente valiosa ao permitir que se ganhe tempo para planejar e executar reparos ou substituições, contribuindo para a manutenção da segurança, eficiência e confiabilidade das operações industriais.

Os equipamentos pressurizados e tubulações em plataformas offshore operam sob condições extremas de pressão, temperatura e ambientes adversos, sendo estes extremamente corrosivos. Portanto, as condições supracitadas potencializam a degradação das instalações industriais, as quais frequentemente resultam em anomalias estruturais, como furos, trincas e perda de espessura.

A aplicação da Análise de Adequação ao Uso possibilita uma tomada de decisão mais precisa e informada em relação à integridade e confiabilidade dos componentes industriais.

Isso, por sua vez, contribui para evitar eventos não planejados, minimizar o tempo de inatividade e, em última análise, aperfeiçoar a logística e a gestão de recursos necessários para operações offshore bem-sucedidas.

Dessa maneira, essa abordagem proativa e baseada em dados desempenha um papel vital na redução de riscos, na garantia da segurança das operações e no suporte ao planejamento estratégico, permitindo que as empresas offshore enfrentem os desafios logísticos de maneira mais eficiente e eficaz.

Como resultado, o objetivo deste trabalho é aprofundar a compreensão da metodologia em estudo e utilizá-la para conduzir um estudo de caso em uma tubulação real. O propósito desse estudo de caso é determinar em que condições de operação a tubulação, com danos do tipo corrosão, pode ser utilizada sem a ocorrência de falhas, mantendo as condições iniciais que foram determinadas na etapa de projeto. Dessa forma, os objetivos serão alcançados por meio da realização de análises que envolvem modelos analíticos, com base na norma API 579-1.

Este trabalho divide-se em cinco capítulos, sendo estruturados como: Introdução; Revisão Bibliográfica; Norma de Adequação ao Uso, Análise da Integridade Estrutural, Discussão dos Resultados e, por fim, Conclusão.

A Revisão Bibliográfica traz um panorama geral sobre a metodologia *Fitness-For-Service (FFS)* de acordo com a norma API 579-1, trazendo contribuições de outros trabalhos relevantes. Além disso, apresenta o procedimento para o dimensionamento de tubulações de acordo com as equações de Mecânica dos Sólidos e com o código de projeto ASME B31.3, também, evidenciando os tipos de danos que ocorrem em componentes abordados nas normas avaliadas.

O capítulo sobre Norma de Adequação ao Uso aprofunda o estudo na norma supracitada, trazendo como a norma é dividida e como a sua metodologia é utilizada para que seja aplicável a diferentes tipos de situações e danos em tubulações. Isto posto, todo o procedimento é detalhado de acordo com os níveis em que a norma é dividida, sendo o nível 1 e o nível 2 os objetos deste trabalho, onde todo o procedimento e cálculo é estruturado para que seja posteriormente utilizado no estudo de caso apresentado.

O capítulo Análise de Integridade Estrutural é voltado para analisar o estudo de caso deste trabalho, tendo como objetivo mostrar os desenvolvimentos e passos empregados em cada metodologia e como foram aplicados no problema.

Em seguida, o capítulo acerca da Discussão dos Resultados apresenta os valores encontrados de tensões equivalentes e pressões máximas de trabalho para as metodologias empregadas neste estudo. Dessa forma, são comparados os valores encontrados com o intuito

de mostrar as diferenças previstas cada método, por meio de gráficos, com a finalidade de manter a operação da tubulação com perda de espessura localizada.

Por fim, o capítulo de Conclusão evidencia as quatro metodologias aplicadas e a finalidade por trás da utilização das mesmas e, além disso, mostra que é possível manter a operação da tubulação danificada na pressão de projeto. Ademais, destaca um ponto de atenção acerca da monitoração da tubulação para um planejamento de manutenção futuro e sugere o desenvolvimento de trabalhos futuros visando aprofundar o tema de acordo com o nível 3 da norma API 579-1.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho tem como objetivo comparar e analisar diferentes métodos de avaliação da integridade de tubos com danos por corrosão, utilizando os critérios da mecânica dos sólidos, norma de projeto e de adequação ao uso, bem como apresentar as principais características da Análise de Adequação ao Uso, de acordo com a norma API 579-1, a qual avalia a vida útil de equipamentos pressurizados e se posiciona como uma ferramenta que pode otimizar processos de manutenção, indicando se o reparo ou substituição dos componentes avaliados é de caráter urgente ou pode ser programado para um momento futuro. Além disso, o trabalho realiza uma comparação entre outras abordagens que são utilizadas para projeto de tubulações de processo, com o intuito de evidenciar que a API 579-1 é uma ferramenta interessante para validar a operação de equipamentos que apresentam anomalias em sua estrutura. Em plataformas offshore, onde a corrosão interna e externa é um tipo de dano que normalmente se faz presente, essa análise torna-se crucial para decidir sobre a continuidade da operação dos equipamentos com segurança.

A metodologia *FFS* (*Fitness-For-Service*), surge como uma avaliação vantajosa para verificar a integridade de componentes danificados ou deteriorados, adiando a necessidade de intervenções imediatas e permitindo a extensão segura do uso dos equipamentos. Além de estimar a vida útil remanescente, o *FFS* auxilia no desenvolvimento de estratégias de inspeção e manutenção, oferecendo uma abordagem eficiente e econômica para a gestão de integridade em ambientes agressivos.

Para compreender melhor o tópico de *FFS*, torna-se importante analisar os casos e resultados presentes em contribuições de outros autores. Dessa forma, torna-se mais fácil de entender a metodologia e o quão relevante é o tema quando se trata da avaliação da integridade estrutural das tubulações em serviço, para determinar se os danos presentes têm impacto significativo na segurança da operação.

Logo, para a elaboração do presente trabalho foram pesquisadas referências que dão embasamento sobre o tema, sendo fundamental citá-las, pois contribuem para o entender melhor os mecanismos envolvidos e as abordagens adotadas.

Richter (2022) fez uma análise sobre a integridade mecânica de um vaso de pressão, utilizando-se de um estudo de caso com o uso das normas API 579-1 e ASME VIII Divisão I, aplicando a metodologia *FFS* para a determinação das espessuras mínimas para um vaso de

pressão instalado em uma indústria siderúrgica. Através do estudo, foram determinadas as espessuras mínimas requeridas do tampo superior e inferior, o casco e o bocal, com base nas informações presentes na norma de código ASME VIII Divisão I. Como conclusão, foi verificado que após o mapeamento da espessura de todo o tampo do vaso de pressão com o auxílio do ensaio previsto na API 579-1, a condição estrutural não era aceitável, pois inúmeros pontos tinham a espessura menor que a mínima requerida por projeto. Observou-se que os resultados obtidos pelo nível 1 não foram suficientes para aprovar a operação de forma segura, porque a pressão máxima admissível calculada foi menor que a estipulada em projeto. Portanto, foi necessária a redução da pressão de operação do equipamento temporariamente e foi planejada a troca do vaso de pressão, após 30 anos de operação do equipamento. Por fim, o autor avalia a metodologia *FFS* como uma ferramenta útil, evidenciando que ela pode proporcionar um equilíbrio entre a economia e a segurança, com a finalidade de evitar reparos desnecessários durante a vida em serviço do equipamento, sempre mantendo os riscos associados ao dano dentro dos parâmetros admissíveis.

Silva (2023) faz a análise de vida residual em vaso acumulador de condensado por corrosão uniforme, trazendo uma avaliação de nível 1 da API 579-1, para que o vaso de pressão se mantenha em operação com segurança mesmo estando abaixo da espessura mínima de projeto, garantindo a integridade estrutural. O autor realiza o cálculo das tensões existentes no projeto, além de analisar o histórico do equipamento, também, traz os resultados obtidos nas medidas de espessura feitas por varredura, evidenciando as regiões críticas e calculando a espessura mínima requerida de projeto com o apoio da norma de código ASME VIII, Divisão 1. A espessura mínima de projeto é de 8,2 mm, resultando em uma vida residual limite de 0,09 anos, ou seja aproximadamente um mês, sendo inferior ao prazo de inspeção planejado, porém, a API 579-1 considera uma espessura mínima para operação de 2,19 mm. Com isso, os resultados obtidos pelo autor são favoráveis e o equipamento é aprovado de acordo com a avaliação de nível 1 da metodologia *FFS*, sendo a espessura mínima recalculada muito menor da mínima de projeto, onde ao utilizar a mesma para o novo cálculo de vida residual, como resultado encontra-se uma vida residual de 1,78 anos. Por último, o autor enfatiza na conclusão de que o novo valor de vida residual encontrado se estabelece apenas se as taxas de corrosão se mantiverem iguais, sendo o ponto de atenção no projeto.

Azevedo (2016) avaliou a integridade estrutural de um vaso de pressão com defeito tipo trinca planar, conforme a norma API 579-1, parte 9. Dessa forma, o autor tem como objetivo verificar se o equipamento em análise está apto para o serviço, avaliando o comportamento no Diagrama de Avaliação de Falhas. Também foi analisado o desempenho do componente ao

variar parâmetros, tais como, o comprimento e profundidade de trinca, pressão de operação e propriedades do material. Portanto, para realizar a avaliação da integridade estrutural, o autor faz a comparação entre os valores obtidos através de uma rotina computacional de cálculos baseados nas equações da parte 9 da norma, com os resultados apresentados pela norma através de um exemplo resolvido, sendo a diferença entre os dois na ordem de 1%. Desta forma, foi feita a escolha dos resultados provenientes da rotina. Em seguida, foram apresentadas as características do equipamento, fabricado em 2005 através da norma ASME VIII Divisão 1, onde a espessura mínima inspecionada foi de 9,58. Em relação a trinca, o comprimento medido é de 18,4mm e a profundidade máxima de 4,4mm, obtidas através de ensaios não destrutivos. A análise focou no cálculo do tamanho máximo admissível da trinca, comparado com o defeito existente. O autor escolheu o nível 2 da API-579, por considerar o nível 1 muito conservador e incapaz de captar variações nos parâmetros. A avaliação foi realizada em duas áreas de interesse: a borda e a base da trinca. Com isso, foram obtidas as razões de tenacidade e de colapso, através das equações do nível 2, que serviram de coordenadas no Diagrama de Avaliação de Falhas. Ao final, ao plotar o gráfico, constatou-se que os pontos que representavam essas regiões estavam dentro da área segura, indicando que o vaso de pressão estava apto para continuar em operação, mesmo com a presença da trinca.

Zangeneh (2021) realiza uma análise detalhada de um tubo que apresenta perda de espessura localizada, de acordo com a avaliação de nível 3 da norma API 579-1. O autor considera no estudo diferentes tipos de dano, incluindo corrosão geral, área de afinamento localizado (*LTA*) e corrosão por pites. Porém, o dano escolhido foi o do tipo *LTA* devido a corrosão sob deposição. Para a avaliação de nível 3, é utilizada a análise por método dos elementos finitos, onde os valores encontrados determinam se a resistência remanescente do componente permite a continuidade da operação. Através das inspeções, a espessura mínima encontrada foi de 5,92mm, sendo que a espessura nominal do tubo era de 8,18 mm. Sendo assim, a avaliação é necessária para determinar se o reparo deve ser realizado ou se a tubulação pode continuar operando até a próxima inspeção programada. Com isso, para executar a avaliação do nível 3 do tubo corroído, o método dos elementos finitos é importante para determinar a pressão de falha do tubo com *LTA*, entretanto, o modelo empregado deve considerar a geometria do tubo, propriedades dos materiais e cargas aplicadas de maneira realista. Para modelar as regiões sem danos, o autor utiliza-se da espessura mínima medida e para as regiões danificadas a variação de espessura na localização exata do dano *LTA*, com os valores sendo entre 5,92 mm e 3,98 mm. Por fim, após a análise do modelo, o autor mostra os resultados de pressão de ruptura para o tubo não danificado e danificado, sendo

respectivamente, 27,6 MPa e 25,1 MPa. Além disso, o fator de resistência remanescente (*RSF*) tem como valor 0,91. Através dos resultados, considerando os efeitos da perda de espessura por corrosão futura (*FCA*) de 1 mm por ano, o autor assegura que mesmo com uma perda de espessura futura de até 3 mm, a pressão interna ainda será menor que a pressão de ruptura determinada para ambas as regiões. Dessa forma, estabelece-se que a tubulação pode continuar o serviço até a próxima inspeção programada, sendo em cerca de 3 anos, com base na corrosão futura.

Almeida (2014) apresenta um artigo que analisa um vaso de pressão sob corrosão interna e externa utilizando a norma API 579-1. O autor obteve as medições da perda de espessura da parede do equipamento danificado através de testes não destrutivos por ultrassom, para que o modelo fosse desenvolvido. O objetivo do estudo é analisar e avaliar os valores da *PMTA* fornecidos pela avaliação de adequação ao uso (*FFS*) utilizando análise térmica numérica com o método dos elementos finitos. Para a avaliação, alguns fatores como a corrosão futura (*FCA*), a perda de espessura uniforme (*LOSS*) e as variações de temperatura, são levados em consideração por afetarem a integridade estrutural do componente. O vaso de pressão em questão tem uma pressão de trabalho de 2,76 MPa, uma espessura nominal de 0,0032 m (3,2 mm) e uma *FCA* de 0,00254 m (2,54 mm). A análise é baseada em aplicar a metodologia do nível 1 e nível 2 da norma individualmente para a corrosão interna e externa, verificando se a *PMTA* calculada é menor ou maior do que a pressão de trabalho. Dessa forma, para a corrosão externa, a *PMTA* do nível 1 é de 2,18 MPa e a *PMTA* do nível 2 é de 2,42 MPa, sendo ambas menores do que a pressão de trabalho de 2,76 MPa. Em seguida, o mesmo procedimento é realizado para a corrosão interna, sendo a *PMTA* do nível 1 de 0,88 MPa e a *PMTA* do nível 2 de 0,98 MPa, onde novamente ambas são menores que a pressão de trabalho de 2,76 MPa. Logo, com os resultados obtidos observa-se que a resistência remanescente (*RSF*) da corrosão interna é menor do que a da corrosão externa, sendo mais crítica. Com isso, após as reprovações no nível 1 e 2, o autor prossegue para a avaliação de nível 3 utilizando o método dos elementos finitos. Por fim, com os resultados o autor propõe uma redução da pressão de trabalho para que o *RSF* aumente e torne a operação do vaso de pressão mais segura.

Ameh (2017) realiza uma avaliação de adequação ao uso (*FFS*) de um vaso de pressão envelhecido que sofre de corrosão localizada externa. O objetivo do estudo foi estabelecer a integridade de um componente, de acordo com a API 579-1, utilizando os níveis 1 e 2. O equipamento tem como espessura nominal 16,25 mm, uma corrosão futura (*FCA*) de 2,25 mm e uma pressão de trabalho de 2,5 MPa. A inspeção foi realizada através de métodos não destrutivos, para obter o perfil de espessura crítico através da malha de medições de espessura.

Em sequência, após todos os cálculos do nível 1 e nível 2, em ambos os critérios de aceitação das metodologias foram aceitos, dessa forma, a operação do equipamento em sua pressão de trabalho de 2,5 MPa é aprovada. Por fim, o autor realiza o cálculo da vida remanescente do vaso de pressão, de acordo com a taxa de corrosão estabelecida, obtendo 40 anos de vida remanescente, considerando o dano existente.

Menegatti (2010) analisa a integridade estrutural de um vaso de pressão utilizando a norma API 579-1, através do nível 2. O estudo avalia a criticidade de uma trinca paralela a um cordão de solda longitudinal do corpo cilíndrico, tendo como objetivo avaliar os critérios da norma aplicada à aceitabilidade de descontinuidades em vasos de pressão. O equipamento tem uma pressão máxima de operação de 0,98 MPa, uma pressão máxima de trabalho admissível de 1,72 MPa e uma espessura nominal de 7,94 mm. Com isso, através dos dados do componente, o autor determina a razão de colapso e de tenacidade para analisar os pontos no Diagrama de Avaliação de Falhas (*FAD*). Por fim, a conclusão mostra que os resultados obtidos através da API 579-1 correspondem ao que era esperado de acordo com a mecânica da fratura, evidenciando a temperatura tem influência direta na razão de tenacidade e a pressão de operação tem maior influência na razão de colapso.

Logo, conclui-se que os trabalhos supracitados elucidam a importância da metodologia *FFS*, pois através da mesma foi possível alongar o tempo de operação de equipamentos de uma maneira segura, mesmo que não sendo nas condições ideais de projeto, porém, evitando uma parada repentina em toda a operação para manutenção ou troca do equipamento.

## 2.1 PROJETO DE TUBULAÇÕES

As tubulações de instalações industriais desempenham um papel vital na condução de fluidos e gases essenciais para o funcionamento eficiente de processos industriais. A geometria das tubulações industriais desempenha um papel crucial no fluxo de fluidos, minimizando perdas de carga e maximizando a eficiência energética. A seleção criteriosa dos materiais utilizados nas tubulações é igualmente importante, levando em consideração fatores como resistência à corrosão, resistência mecânica e compatibilidade química. A análise e projeto demandam cálculos precisos das tensões presentes, para garantir a integridade estrutural e operação segura de toda a instalação.

De acordo com Hibbeler (2010), para avaliar o estado de tensões em regiões longe de descontinuidades geométricas, como bocais e junções entre os tampos e o corpo, duas

metodologias são normalmente utilizadas: análise de tensões em vasos de pressão de paredes finas, que apresenta resultados satisfatórios e precisos para tubos com pequenas espessuras, e de paredes grossas, o qual apresenta resultados precisos para ambos os casos de espessura de parede. Em seguida, é necessário desenvolver estudos mais precisos, aplicando fatores de concentração de tensões ou realizando análises numéricas por elementos finitos para examinar as tensões em regiões de descontinuidade geométrica.

A hipótese de vasos de pressão de paredes finas, comumente utilizada em normas de projeto de tubulações como a ASME B31.3, tem origem como uma simplificação na análise de tensões em equipamentos e componentes sob pressão interna. Essa simplificação deriva da solução de Lamé (1852), que descreve a distribuição de tensões em cilindros e esferas de paredes grossas. Quando a razão entre o raio médio ( $r$ ) e a espessura da parede ( $t$ ) do vaso apresenta um valor grande, ou seja  $\frac{r}{t} \gg 10$ , as tensões variam pouco ao longo da espessura, permitindo que o vaso seja tratado como de parede fina. Nesse caso, as tensões são consideradas constantes em toda a espessura, simplificando os cálculos e mantendo a precisão para projetos de engenharia. Essa hipótese é amplamente utilizada devido à sua simplicidade e aplicabilidade em diversas situações práticas, onde as paredes dos vasos são significativamente mais finas que o raio do cilindro ou da esfera. No entanto, para paredes grossas esta razão ( $\frac{r}{t}$ ) é tipicamente menor do que 10, indicando que a espessura da parede é significativamente maior em relação ao raio interno.

Além das considerações sobre a espessura das paredes, a avaliação de segurança também envolve a análise da tensão equivalente uniaxial obtida através de critérios de falha. Dois critérios de falha, para materiais dúcteis, comuns são o critério de *Tresca* e o critério de *von Mises*. O primeiro, também conhecido como critério de máxima tensão de cisalhamento ou critério de cisalhamento máximo, define que o material, considerando apenas a tensão axial, escoar quando sua tensão de cisalhamento máxima atinge o valor da tensão de cisalhamento que ocorre no momento de escoamento. Sendo assim, para evitar a falha, a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$\sigma_{EQ}^{Tresca} \leq \sigma_1 - \sigma_3 \leq S_{adm} \quad (1)$$

onde  $\sigma_{EQ}^{Tresca}$  representa a tensão equivalente obtida através do critério de *Tresca*.

A Figura 2, apresenta o gráfico do critério de *Tresca* para um estado de tensão biaxial, onde a região em cinza representa o *locus* elástico, onde o material se encontra no regime elástico.

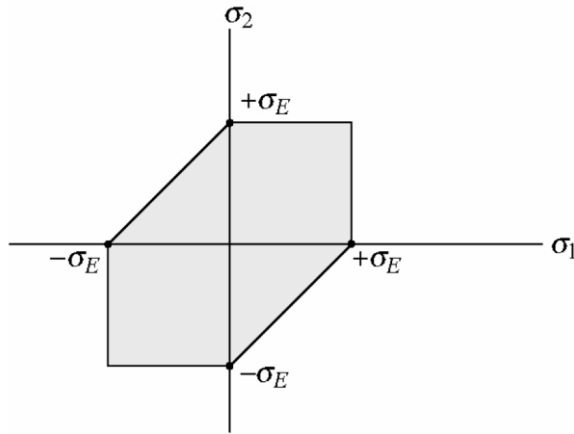


Figura 2 - Critério de falha de *Tresca*. Adaptado de GERE, 2003.

Em muitos casos, o critério de *von Mises* é mais utilizado na indústria como critério de tensões equivalentes por apresentar uma melhor concordância com resultados experimentais. Baseado nas distorções provocadas pela energia de deformação, esse critério leva em conta a densidade de energia de deformação de distorção em um elemento de volume do material submetido a um estado de tensões, de forma que a tensão equivalente é definida por:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (2)$$

onde  $\sigma_{EQ}^{VM}$  representa a tensão equivalente obtida através do critério de *von Mises*.

A Figura 3 representa graficamente o critério de *von Mises* para um estado de tensão biaxial, onde a região em cinza representa o *locus* elástico, onde o material se encontra no regime elástico.

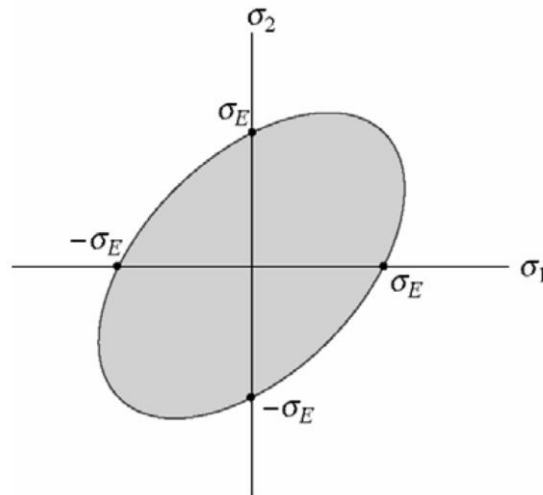


Figura 3 - Critério de falha de *von Mises*. Adaptado de GERE, 2003.

É importante notar que, ao projetar uma tubulação, vários fatores podem influenciar as cargas a que ele estará sujeito. Além da pressão interna, o peso próprio e as cargas externas, como vento e carga sísmica, devem ser considerados. A combinação dessas cargas pode variar de acordo com as normas e regulamentos aplicáveis, sendo necessário um estudo cuidadoso para garantir a integridade e a segurança em todas as condições operacionais. Portanto, o projeto de instalações industriais é uma tarefa que exige a consideração de diversos parâmetros para assegurar o desempenho confiável desses equipamentos.

### 2.1.1 Tubo Cilíndrico de Paredes Finas

De acordo com Hibbeler (2010), a hipótese de paredes finas apresenta bons resultados para espessuras relativamente pequenas, onde é comparado de forma quantitativa a ordem de grandeza do raio interno ( $r_i$ ) e da espessura ( $t$ ), de forma que se  $\frac{r_i}{t} > 10$  a consideração de projeto de paredes finas pode ser utilizada obtendo resultados de tensões aproximadamente 4% menores que as tensões reais encontradas no vaso, se essa condição não for obedecida esse modelo não é recomendado. A Figura 4 representa a distribuição de tensões.

O equacionamento segue as seguintes hipóteses:

- As tensões são constantes ao longo da espessura.
- A tensão radial não é considerada, porque seu valor é pequeno quando comparado as tensões circunferencial e longitudinal.
- O carregamento é simétrico, não causando distorção angular.

- As tensões são calculadas no corpo do vaso de pressão em regiões distantes de distorções geométricas, como junções com os tampos, bocais, suportes de fixação e pés.

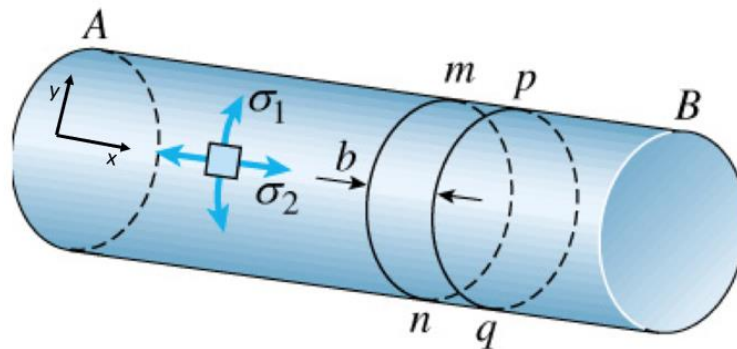


Figura 4 - Distribuição de Tensões Tubo Cilíndrico. Adaptado de GERE, 2003.

Para descobrir a tensão longitudinal é feito o equilíbrio de forças no eixo x, onde a tensão longitudinal é definida por:

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\rightarrow -p(\pi r^2) + \sigma_l(2\pi r t) = 0 \\ &\rightarrow \sigma_l = \frac{pr}{2t} \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $\sigma_l$  representa a tensão longitudinal, obtida através do equilíbrio de forças,  $p$  é a pressão interna atuante no tubo,  $r$  é o raio do tubo e  $L$  é o comprimento do tubo.

A Figura 5 representa a tensão longitudinal atuante na parede do tubo.

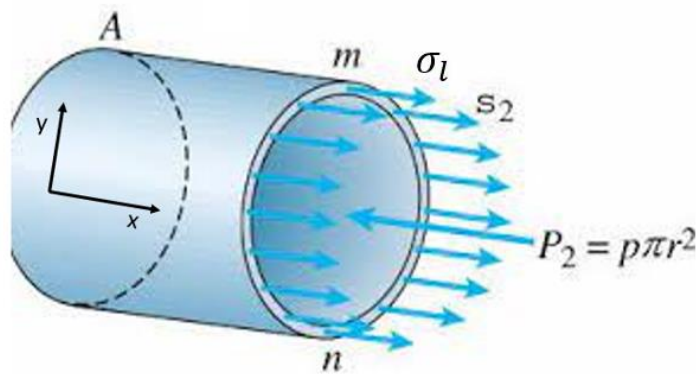


Figura 5 - Distribuição da tensão longitudinal. Adaptado de GERE, 2003.

Para descobrir a tensão circunferencial é feito o equilíbrio de forças no eixo y, onde a tensão circunferencial é definida por:

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\rightarrow -p(2rL) + \sigma_c(2Lt) = 0 \\ &\rightarrow \sigma_c = \frac{pr}{t} \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $\sigma_c$  representa a tensão circunferencial, obtida através do equilíbrio de forças.

A Figura 6 representa a tensão circunferencial atuante na parede do tubo.

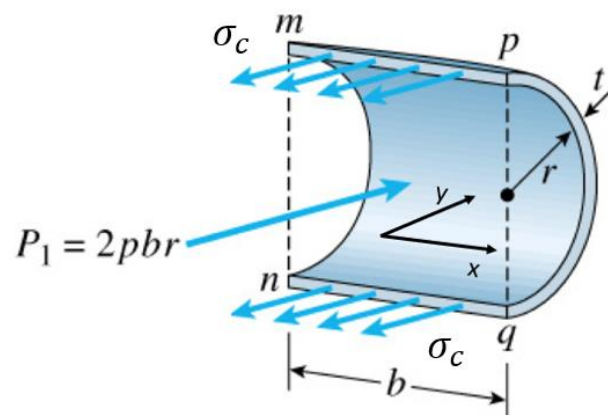


Figura 6 - Distribuição da tensão circunferencial. Adaptado de GERE, 2003.

O próximo passo dessa modelagem consiste em encontrar a tensão equivalente a qual o tubo está submetido, para então comparar a tensão encontrada com o limite admissível  $S_{adm}$  do material.

O Círculo de Mohr, mostrado no esquema abaixo, é uma representação gráfica que mostra o estado das tensões normais e de cisalhamento presentes na seção transversal do componente avaliado. As tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as máximas e mínimas tensões normais respectivamente, definidas em planos sem cisalhamento, enquanto a máxima tensão de cisalhamento  $\tau_{m\acute{a}x}$  ocorre em planos inclinados a 45 graus. Essa ferramenta é crucial para avaliar a resistência e integridade de materiais. Na hipótese de paredes finas é considerado o estado plano de tensões, ou seja,  $\sigma_r = 0$ . A Figura 7 representa o Círculo de Mohr.

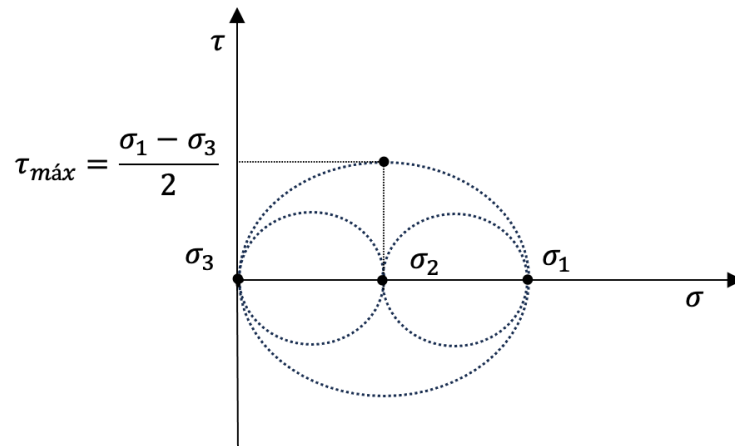


Figura 7 - Círculo de Mohr. Fonte: Próprio autor.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \sigma_l = \frac{pr}{2t} \\ \sigma_y = \sigma_c = \frac{pr}{t} \\ \sigma_z = \sigma_r = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma_c = \frac{pr}{t} \\ \sigma_2 = \sigma_l = \frac{pr}{2t} = \frac{\sigma_c}{2} \\ \sigma_3 = 0 \end{array} \right.$$

Sendo assim, é definido o critério de tensão equivalente na equação a seguir:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\frac{\left(\frac{pr}{t} - \frac{pr}{2t}\right)^2 + \left(\frac{pr}{t} - 0\right)^2 + \left(\frac{pr}{2t} - 0\right)^2}{2}}$$

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \frac{\sqrt{3}pr}{2t} \quad (5)$$

A comparação final utilizada na verificação de projeto é do  $\sigma_{EQ}^{VM}$  com o  $S_{adm}$  do material utilizado.

- Caso  $\sigma_{EQ}^{VM} \leq S_{adm}$  o projeto está **aprovado**.
- Caso  $\sigma_{EQ}^{VM} > S_{adm}$  o projeto está **reprovado**.

### 2.1.2 Tubo Cilíndrico de Paredes Grossas

Segundo Hibbeler (2010), esta hipótese considerada que a espessura não é pequena o suficiente para ter a tensão radial desprezada, diferentemente do modelo de paredes finas. Para utilizar esse modelo, é feita uma análise quantitativa da ordem de grandeza do raio interno ( $r_i$ ) e da espessura ( $t$ ), e diferentemente do modelo de paredes finas, esse modelo apresenta resultados satisfatórios para as todas as aplicações.

Esse equacionamento segue as seguintes hipóteses:

- Distribuição não homogênea das tensões.
- A tensão radial é considerada.
- É necessário utilizar a seção crítica da parede do cilindro para o cálculo da tensão equivalente.
- As tensões são calculadas no corpo do vaso de pressão em regiões distantes de distorções geométricas, como junções com os tampos, bocais, suportes de fixação e pés.

A tensão radial é calculada através da equação subsequente:

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (6)$$

A Figura 8 representa a distribuição da tensão radial, onde seu valor aumenta quanto mais próximo a  $r_i$ .

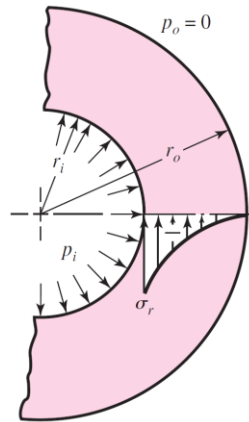


Figura 8 - Distribuição de tensão radial. Adaptado de BUDYNAS; NISBET, 2011.

As tensões circunferenciais e longitudinais também são presentes, porém, são calculadas de outra maneira. As tensões circunferenciais e longitudinais são definidas nas equações a seguir:

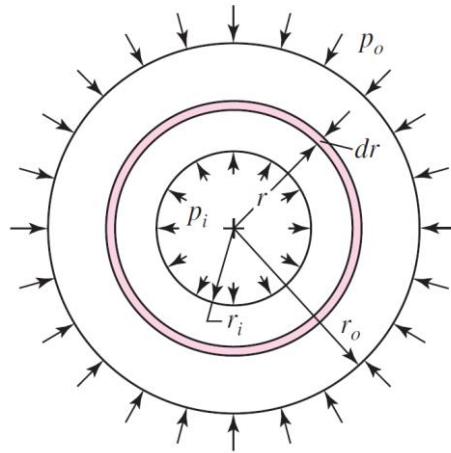
1. Tensão circunferencial  $\sigma_c$

$$\sigma_c = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o^2 - \frac{r_i^2 r_o^2 (p_o - p_i)}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2} \quad (7)$$

2. Tensão longitudinal  $\sigma_l$

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (8)$$

A Figura 9 ilustra a distribuição das pressões internas e externas, juntamente com os raios internos e externo.



**Figura 9 - Distribuição de pressões internas e externas. Adaptado de BUDYNAS; NISBET, 2011.**

O próximo passo deste método consiste em encontrar a tensão equivalente a qual o tubo está submetido, para novamente comparar a tensão encontrada com o limite admissível  $S_{adm}$  do material.

Novamente o critério de falha utilizado é o de *von Mises*, porém neste caso não é possível utilizar o estado plano de tensões, porque o  $\sigma_3 \neq 0$ .

As tensões principais em tubos são:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_c \\ \sigma_2 = \sigma_l \\ \sigma_3 = \sigma_r \end{cases}$$

Ao substituir as tensões circunferencial, longitudinal e radial na equação geral de *von Mises* (Eq. 2), obtém-se o valor da tensão equivalente de *von Mises*:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_c - \sigma_l)^2 + (\sigma_c - \sigma_r)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2}{2}} \quad (9)$$

A comparação final utilizada na verificação de projeto é do  $\sigma_{EQ}^{VM}$  com o  $S_{adm}$  do material utilizado.

- Caso  $\sigma_{EQ}^{VM} \leq S_{adm}$  o projeto está **aprovado**.
- Caso  $\sigma_{EQ}^{VM} > S_{adm}$  o projeto está **reprovado**.

### 2.1.3 Carregamentos de Peso Próprio do Tubo e Peso do Fluido

Outros tipos de carregamento que são incluídos no estudo são os carregamentos distribuídos, de peso do tubo e de peso do fluido. Esses carregamentos influenciam diretamente na tensão equivalente a qual o tubo está submetido, principalmente nas tensões de flexão que podem se somar à tensão longitudinal em uma tubulação na horizontal, ou às tensões normais em uma tubulação na vertical.

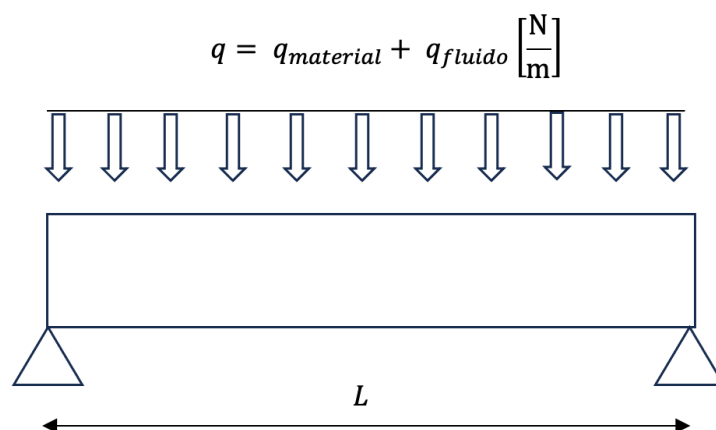
A análise de tensões de um trecho do tubo pode ser desenvolvida considerando o trecho do tubo como uma viga com as extremidades restritas.

A modelagem pode ser feita de duas maneiras, dependendo da condição das extremidades do trecho estudado:

- Viga bi apoiada: Caso o tubo possua liberdade de rotação da seção transversal e movimentação ao longo da direção longitudinal.
- Viga bi engastada: Caso o trecho da tubulação não possua liberdade de rotação da seção transversal e de movimentação ao longo da direção longitudinal.

#### 1. Viga bi apoiada

O modelo de viga bi apoiada corresponde a estrutura sustentada em dois pontos que fornecem apoio vertical e permitem livre movimentação na horizontal e rotação. A Figura 10 representa o modelo de viga bi apoiada.



**Figura 10 - Modelo de viga bi apoiada. Fonte: Próprio autor.**

A carga a qual o componente está submetido pode ser representada por uma carga distribuída  $q$ , onde essa carga é a soma das cargas distribuídas do peso próprio do material do

tubo ( $q_{material}$ ) e do peso do fluido ( $q_{fluido}$ ) alocado no trecho de tubulação estudado. A carga distribuída é definida pelo peso ( $mg$ ) dividido pelo comprimento ( $L$ ) do trecho:

$$q = \frac{mg}{L} \quad (10)$$

A massa é definida pela massa específica do material multiplicada pelo volume do trecho:

$$m = \rho v \rightarrow m = \rho \frac{L\pi(r_o - r_i)^2}{2} \quad (11)$$

Para encontrar as tensões equivalentes devido ao peso do material, é feito o passo a passo descrito abaixo.

- Diagrama de corpo livre:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow N_1 + N_2 - qL = 0$$

$$\sum M_z = 0 \rightarrow N_2L - q \frac{L^2}{2} = 0$$

Portanto:

$$\begin{cases} N_2 = q \frac{L}{2} \\ N_1 = q \frac{L}{2} \end{cases}$$

- Seção crítica:

A Figura 11 representa o modelo utilizado para determinação dos esforços internos.

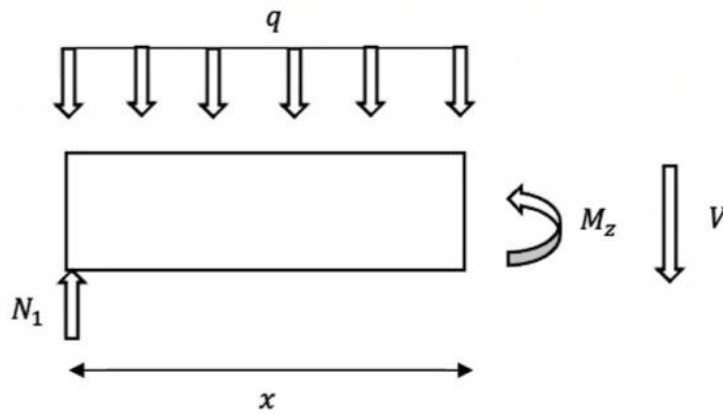


Figura 11 - Modelo da seção crítica do tubo. Fonte: Próprio autor.

O momento fletor é dado por:

$$\begin{aligned} \sum M_z = 0 &\rightarrow M - N_1 x + qx \left(\frac{x}{2}\right) = 0 \\ M_z &= q \frac{L}{2} x - qx \left(\frac{x}{2}\right) \\ M_z &= \frac{q}{2}(Lx - x^2) \\ M_z &= \frac{qL^2}{4} \end{aligned} \quad (12)$$

O momento fletor ( $M_z$ ) máximo é obtido quando  $x = \frac{L}{2}$ , ou seja, na metade do comprimento do tubo.

Para se encontrar a tensão equivalente é necessário o cálculo do momento de inércia da seção crítica do tubo.

A vista frontal da seção crítica do tubo está disponível na Figura 12.

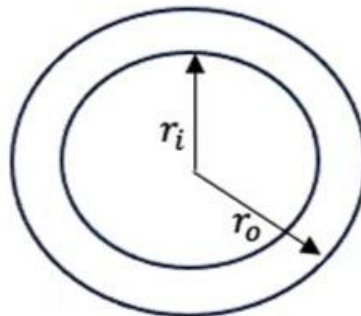


Figura 12 - Vista frontal da seção crítica Fonte: Próprio autor.

A seção crítica da tubulação é a de um anel, de forma que o momento de inércia da seção é obtido através da subtração dos momentos de inércia dos círculos externo e interno, conforme as seguintes equações:

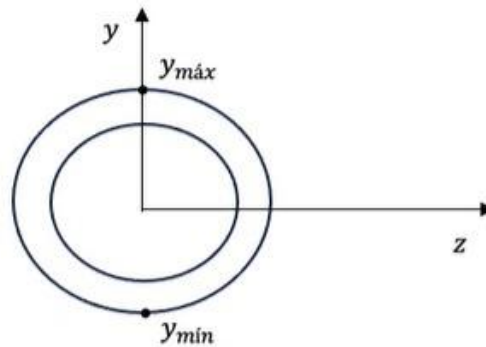
$$I_{circulo} = \frac{\pi r^4}{4} \quad (13)$$

$$I_{seção} = \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{4} \quad (14)$$

De acordo com Hibbeler (2010), utilizando o momento fletor ( $M_z$ ) atuante sobre o tubo e o momento de inércia da seção crítica ( $I_{seção}$ ), é possível calcular a tensão encontrada no eixo x, através da equação subsequente:

$$\sigma_x = \frac{-M_z y}{I_{seção}} \quad (15)$$

Os valores de  $\sigma_x$  variam de acordo com o y, ou seja, os pontos de tensão máxima e mínima encontram-se na superfície do tubo, respectivamente, em  $y_{máx} = -r_o$  e  $y_{mín} = +r_o$ , conforme apresentado na representação esquemática da Figura 13.



**Figura 13- Pontos de tensão máxima e mínima na seção transversal do tubo promovidas pelo peso próprio. Fonte: Próprio autor.**

Ao descobrir  $y_{máx}$  e  $y_{mín}$  são reunidas as variáveis necessárias para solucionar a equação da tensão longitudinal máxima devido ao carregamento distribuído:

$$\sigma_x = \frac{qr_0(L^2)}{2\pi(r_0^4 - r_i^4)} \quad (16)$$

Completando a análise dos esforços internos, é feita a análise da força cortante  $V$ .

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\rightarrow -V + N_1 - qx = 0 \\ &\rightarrow V = q\left(\frac{L}{2} - x\right) \\ &V = q\frac{L}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

A equação (17) define a força cortante, onde é obtido o  $V$  máximo quando  $x = 0$  ou  $x = L$ , ou seja, nos pontos de apoio.

Com isso, a tensão de cisalhamento atuante na seção é definida na seguinte equação:

$$\tau_{xy} = \frac{VQ_Z^*}{I_Z t^*} \quad (18)$$

Para calcular a tensão de cisalhamento é necessário encontrar  $Q_Z^*$ , o qual é definido na equação subsequente para seção transversal circular vazada. Para encontrar a tensão de cisalhamento máxima, foi adotado o modelo onde o momento de primeira ordem de área é calculado na região do centroide da seção crítica. Essa hipótese é apropriada porque o carregamento é aplicado em uma seção simétrica.

$$Q_Z^* = \bar{y} A' = \frac{4r_0}{3\pi} \frac{\pi r_0^2}{2} - \frac{4r_i}{3\pi} \frac{\pi r_i^2}{2} \quad (19)$$

onde,  $t^* = 2(r_0 - r_i)$

Posteriormente, ao definir o momento de primeira ordem, é encontrada a tensão de cisalhamento máxima, ao substituir as equações (14), (17) e (19) na equação (18). A tensão de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) máxima é representada na equação a seguir:

$$\tau_{xy} = \frac{2qL}{3\pi(r_0^2 - r_i^2)} \left( \frac{r_0^2 + r_0 r_i + r_i^2}{r_0^2 + r_i^2} \right) \quad (20)$$

Concluindo a análise, é feito o cálculo da tensão equivalente de *von Misses* ( $\sigma_{EQ}^{VM}$ ), desta vez é utilizada a equação geral que leva em conta as tensões normais e de cisalhamento, conforme a seguinte equação:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\frac{[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2]}{2} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (21)$$

Considerando que  $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ , e as equações de  $\sigma_x$  e  $\tau_{xy}$ , obtém-se a equação subsequente, a qual define a partir das tensões normais e de cisalhamento máximas a equação de tensão equivalente para o modelo de viga bi apoiada. Essa solução é considerada conservadora, pois os valores máximos das tensões supracitadas ocorrem em seções e em pontos diferentes. Sendo assim, ao considerar os valores máximos das duas tensões, a tensão equivalente encontrada é sempre maior que a tensão equivalente real presente na seção crítica da estrutura.

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\left(\frac{qr_0(L^2)}{2\pi(r_o^4 - r_i^4)}\right)^2 + 3\left[\frac{2qL}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)}\left(\frac{r_o^2 + r_or_i + r_i^2}{r_o^2 + r_i^2}\right)\right]^2} \quad (22)$$

## 2. Viga bi engastada

O modelo de viga bi engastada corresponde a uma estrutura fixada em dois pontos que restringem tanto a movimentação vertical quanto horizontal, além de impedir a rotação. A Figura 14 representa o modelo de viga bi engastada.

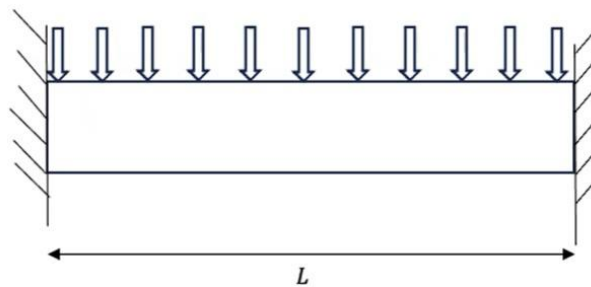


Figura 14 - Modelo de viga bi engastada. Fonte: Próprio autor.

Novamente, a carga a qual o componente está submetido pode ser representada por uma carga distribuída  $q \left[\frac{N}{m}\right]$ . De acordo com Budynas–Nisbett (2011), após o desenvolvimento do DCL são definidos os momentos fletores  $M_1$  e  $M_2$  e as reações  $R_1$  e  $R_2$  atuantes nos engastes da esquerda e da direita, conforme Figura 14. O momento fletor e da reação nos engastes são representados a seguir, respectivamente:

$$M_1 = M_2 = \frac{-qL^2}{12} \quad (23)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{qL}{2} \quad (24)$$

- Encontrando os esforços internos:

A Figura 15 representa o modelo utilizado da seção crítica do tubo.

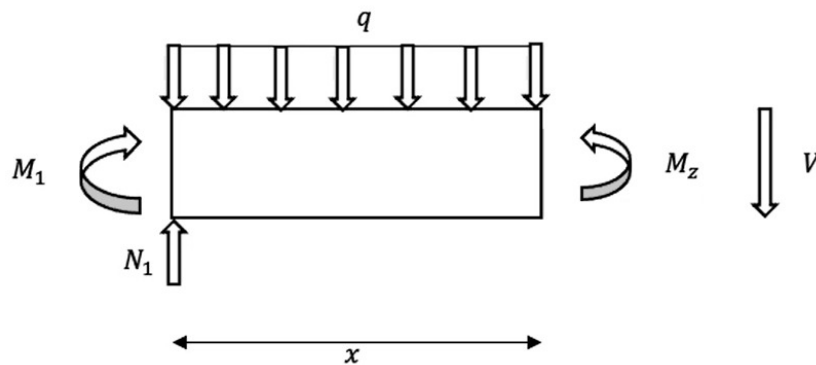


Figura 15 - Modelo da seção crítica do tubo. Fonte: Próprio autor.

Para a força cortante, novamente é feito o equilíbrio de forças em y, onde a força cortante ( $V$ ) máxima é definida na equação a seguir, onde o seu valor máximo encontra-se nos engastes.

$$\begin{aligned} V &= \frac{q}{2}(L - 2x) \\ V &= q \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (25)$$

De acordo com Budynas–Nisbett (2011), o momento fletor é encontrado na seguinte equação, através do equilíbrio de momentos em z:

$$M_z = \frac{q}{12}(6Lx - 6x^2 - L^2) \quad (26)$$

Para encontrar o momento fletor máximo é necessário derivar a equação (26) e encontrar os valores de  $x$  que maximizam o momento fletor e assim definir a seção crítica.

$$\frac{d}{dx} M_z = \frac{d}{dx} \left[ \frac{q}{12}(6Lx - 6x^2 - L^2) \right] = 0$$

$$\frac{q}{12}(6L - 12x) = 0$$

$$x = \frac{L}{2}$$

Desta forma, o momento fletor máximo é encontrado na metade do tubo ( $x = \frac{L}{2}$ ), sendo calculado através da equação subsequente:

$$M_z = \frac{qL^2}{24} \quad (27)$$

Os cálculos de momento de inércia ( $I_{seção}$ ), de tensão longitudinal ( $\sigma_x$ ) e de tensão de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) são os mesmos da viga bi apoiada, de maneira que as equações (14), (15) e (18) são aproveitadas. Sendo assim, para encontrar a equação da tensão normal máxima, substitui-se as variáveis de momento fletor e momento de inércia da seção já conhecidos, de forma a encontrar a equação a seguir:

$$\sigma_x = \frac{-\frac{qL^2}{24}y}{\frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{4}} = \frac{qr_oL^2}{6\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (28)$$

Já a tensão de cisalhamento para esse caso é a mesma obtida no resultado da viga bi apoiada, ou seja, a equação (20) é aproveitada.

Por fim, é utilizada a mesma metodologia da viga bi apoiada para encontrar a tensão equivalente de *von Mises* para o modelo de viga bi engastada, substituindo as equações (20) e (28) na equação geral, de forma a obter a seguinte equação:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\left(\frac{qr_0L^2}{6\pi(r_o^4 - r_i^4)}\right)^2 + 3\left[\frac{2qL}{3\pi(r_o^2 - r_i^2)}\left(\frac{r_o^2 + r_or_i + r_i^2}{r_o^2 + r_i^2}\right)\right]^2} \quad (29)$$

Novamente, o valor de tensão equivalente obtido, através dessa metodologia simplificada, é maior que a tensão equivalente real definido na seção crítica, tornando essa análise conservadora.

#### 2.1.4 Carregamentos Combinados de Pressão e Peso

De acordo com Silva Teles (2010), as tensões longitudinais devido a carregamento de pressão ( $\sigma_l$ ) e as tensões longitudinais devido ao carregamento de pesos distribuídos ( $\sigma_x$ ) interagem diretamente e devem ser somadas.

Quando  $y < 0$ , a tensão na direção x devido ao carregamento mecânico ( $\sigma_x^{Mec}$ ), é tratativa e deve ser somada ao valor da tensão longitudinal devido à pressão ( $\sigma_l^P$ ). Quando  $y > 0$ ,  $\sigma_x^{Mec}$  é subtraída de  $\sigma_l^P$ .

Após a soma das tensões longitudinais é feito o cálculo de tensão resultante de acordo com equação (21), onde são utilizadas as tensões em todas as direções, a fim de calcular a tensão a qual o tubo está submetido. Sendo assim, a tensão longitudinal considerando a contribuição de ambos os carregamentos nesta direção é dada por:

$$\sigma_l^R = \sigma_l^P + \sigma_x^{Mec} \quad (30)$$

1. Para viga bi apoiada, considerando a hipótese de paredes grossas:

$$\sigma_l^R = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{qr_0L^2}{2\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (31)$$

2. Para viga bi engastada, considerando a hipótese de paredes grossas:

$$\sigma_l^R = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{q r_o L^2}{6\pi(r_o^4 - r_i^4)} \quad (32)$$

Após a seleção do equacionamento de tensão longitudinal, novamente deve-se calcular a tensão equivalente de *von Mises*, chegando na equação geral que considera o carregamento de pressão e mecânico, conforme equação subsequente:

$$\sigma_{EQ}^{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_c - \sigma_l^R)^2 + (\sigma_c - \sigma_r)^2 + (\sigma_l^R - \sigma_r)^2}{2}} + 3\tau_{xy}^2 \quad (33)$$

### 2.1.5 Projeto Segundo ASME B31.3

Uma norma utilizada como referência para construção de tubulações de processos é a norma americana ASME B31.3, desenvolvida pela Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (*American Society of Mechanical Engineers*). Através dessa norma, torna-se possível projetar tubulações de acordo com classe de pressão, temperatura, tipo de fluido, entre outras características requeridas.

A ASME B31.3 desfruta de ampla aceitação e aplicação na indústria, sendo particularmente relevante em segmentos como petroquímica, geração de energia, química e diversas outras áreas industriais. Esta norma estabelece rigorosos critérios abrangendo o projeto, fabricação, teste, inspeção e operação segura de sistemas de tubulações. A ASME B31.3 oferece orientações detalhadas abordando questões como seleção de materiais, cálculos de espessura das paredes, técnicas de soldagem, testes não destrutivos, e outros elementos essenciais relacionados aos sistemas de tubulações. Neste trabalho será dado foco no item de cálculo de espessura de parede do tubo, visto que é o objetivo desse trabalho, sendo possível encontrar no Capítulo II nomeado Design.

O Capítulo de cálculo de espessura de parede da norma ASME B31.3 é uma parte fundamental desse código amplamente reconhecido na indústria de engenharia e tubulações. Esse item aborda minuciosamente a determinação da espessura necessária das paredes de tubulações utilizadas em uma variedade de instalações industriais, como refinarias, usinas de energia e instalações químicas.

O objetivo primordial desse cálculo é garantir a integridade estrutural e a segurança dos sistemas de tubulações, assegurando que eles possam suportar com segurança a pressão interna, a temperatura, bem como outras cargas e condições operacionais. Alguns pontos essenciais no cálculo de espessura de parede da ASME B31.3 estão listados abaixo:

- **Requisitos de Projeto:** O item especifica os critérios de projeto, incluindo as condições operacionais, as cargas, as propriedades dos materiais e as normas de segurança que devem ser atendidas. Fornecendo a base para o cálculo.
- **Equações e Métodos de Cálculo:** A ASME B31.3 apresenta equações e métodos que os engenheiros devem seguir para determinar a espessura mínima requerida da parede da tubulação, levando em consideração fatores como pressão, temperatura, diâmetro da tubulação e materiais.
- **Fatores de Segurança:** A norma estabelece fatores de segurança a serem aplicados nos cálculos para garantir que a tubulação tenha uma margem de segurança adequada, levando em consideração variações operacionais e incertezas.
- **Critérios de Falha:** A ASME B31.3 define critérios de falha, como tensão admissível, que são usados para avaliar se a espessura calculada atende aos padrões de segurança.
- **Materiais e Corrosão:** A norma considera a corrosão e a seleção de materiais, levando em conta a vida útil esperada da tubulação e a necessidade de proteção contra a corrosão.
- **Reavaliação Periódica:** Além do projeto inicial, a norma estabelece diretrizes para a reavaliação periódica da espessura da parede, garantindo que a tubulação continue segura ao longo do tempo.
- **Documentação e Registro:** Todos os cálculos e dados devem ser documentados e registrados de forma adequada para fins de monitoramento, manutenção e conformidade regulatória.

Desta forma, o Capítulo de cálculo de espessura de parede da ASME B31.3 desempenha um papel crucial na garantia da segurança e eficiência dos sistemas de tubulações em ambientes industriais. Ela fornece um conjunto de diretrizes rigorosas que ajudam os engenheiros a determinar a espessura apropriada da parede, garantindo que essas tubulações possam operar com segurança sob condições variadas e ao longo do tempo.

Conforme estabelecido pela norma, a espessura requerida é determinada pela soma da espessura mínima do tubo com o fator "C". Esse fator engloba tanto as tolerâncias mecânicas quanto as provenientes da corrosão, que pode afetar a parede interna ou externa do tubo.

A equação seguinte é utilizada para calcular a espessura com as tolerâncias supracitadas:

$$t_m = t + C \quad (34)$$

onde a espessura mínima não pode ser menor que  $t_m$ .

A equação da espessura mínima  $t$ , estabelecida pela norma, se assemelha com a equação de vasos de pressão de paredes espessas, pois também depende dos valores de pressão interna ( $p$ ), diâmetro externo ( $D_e$ ), diâmetro interno ( $D_i$ ) e tensão admissível ( $S_{adm}$ ).

O diferencial do equacionamento da ASME B31.3 se encontra na inclusão dos fatores de eficiência de solda ( $W$ ), do fator de redução ( $Y$ ) e do fator de qualidade ( $E$ ).

O fator de eficiência de solda ( $W$ ) é um parâmetro que leva em consideração a eficiência da junta soldada em comparação com o material base, em termos de resistência mecânica. Esse fator é utilizado para calcular a espessura de parede efetiva de uma junta soldada em relação à espessura de parede nominal do material base, levando em consideração fatores como o tipo de solda, a qualidade da soldagem, o material de enchimento utilizado e outros fatores que afetam a integridade da junta soldada. Os valores de variam na faixa de  $0 \leq W \leq 1$ , onde  $W = 1$  indica que a junta soldada tem a mesma resistência mecânica que o material base, ou seja, a junta é considerada 100% eficiente em termos de resistência, normalmente representa tubos sem costura, ou com costura de solda de topo totalmente radiografada, ou seja, com maior confiabilidade de solda. Os demais valores desse coeficiente se encontram tabelados na norma.

O fator de redução ( $Y$ ) é um parâmetro que leva em consideração a redução da resistência mecânica de um material causada por diferentes condições de serviço, como temperatura, carregamento cíclico, corrosão, entre outros. Ele é usado para ajustar a resistência nominal de um material, a fim de levar em conta esses fatores de redução e garantir a segurança e a confiabilidade de estruturas e componentes. Seu valor varia de acordo com o tipo de material, das condições de serviço e das especificações de projeto.

O valor do coeficiente de redução é definido para duas condições:

- para  $t < \frac{D}{6}$ : os valores são tabelados conforme os materiais dispostos na norma.

A interpolação é permitida nessa tabela.

- para  $t \geq \frac{D}{6}$ : é utilizada a seguinte equação:

$$Y = \frac{d + 2C}{D + d + 2C} \quad (35)$$

O fator de qualidade ( $E$ ) é um parâmetro utilizado em engenharia, particularmente na área de confiabilidade de sistemas e componentes, para avaliar a qualidade ou a eficiência de um item, processo, ou sistema em relação ao seu desempenho desejado ou esperado. O valor de ( $E$ ) é um número que varia de 0 a 1.  $E = 1$  indica que o item, processo ou sistema atende plenamente aos requisitos de desempenho, para valores de  $E < 1$  a qualidade ou eficiência do item ou sistema é considerada mais baixa. Os valores de  $E$  para cada tipo de sistema e serviço são tabelados na norma.

Com todas os coeficientes encontrados, os valores de pressão, diâmetros externo e interno, a sobre espessura de corrosão ( $C$ ) e a tensão admissível do material, chegamos ao equacionamento de espessura mínima. Existem dois casos para o equacionamento, para  $t < \frac{D}{6}$  e para  $t \geq \frac{D}{6}$ .

- para  $t < \frac{D}{6}$ :

As equações a seguir são utilizadas para os cálculos, sendo a primeira em função do diâmetro externo e a segunda em função do diâmetro interno, levando em consideração o fator de corrosão "C":

$$t = \frac{pD}{2(S_{adm}EW + pY)} \quad (36)$$

$$t = \frac{p(d + 2C)}{2[S_{adm}EW - p(1 - Y)]} \quad (37)$$

A norma estabelece que os resultados mencionados anteriormente são equivalentes e derivados das informações de resistência dos materiais apresentadas nas seções anteriores deste trabalho. Portanto, tanto uma quanto a outra podem ser empregadas para o cálculo da espessura mínima.

- Para  $t \geq \frac{D}{6}$ :

Quando  $t \geq \frac{D}{6}$  ou  $\frac{p}{S_{adm}E} \geq 0,385$ , é necessário realizar uma análise mais aprofundada no cálculo da espessura do projeto de pressão para tubos retos, levando em conta aspectos como teoria de falha, influência da fadiga e efeitos de tensão térmica.

## 2.2 TIPOS DE DANOS

De acordo com Carneiro (2019), a exploração e produção de petróleo e gás em ambientes marítimos desafiadores, como as plataformas offshore, é uma parte fundamental da indústria de energia. No entanto, essas operações estão sujeitas a uma série de ameaças que podem comprometer a integridade das tubulações submarinas, causando uma variedade de tipos de danos. Entre esses danos, destacam-se a fratura frágil, as trincas, os danos devido ao fogo, a fluência, os danos mecânicos, a fadiga e a corrosão. Cada um desses tipos de danos apresenta desafios específicos para a manutenção e segurança das tubulações offshore, exigindo estratégias de prevenção e reparo cuidadosamente elaboradas para garantir a continuidade das operações e a proteção do meio ambiente. Neste contexto, é essencial compreender esses danos e os fatores que contribuem para sua ocorrência, a fim de implementar medidas eficazes de gerenciamento de riscos e preservar a integridade das infraestruturas submarinas. Neste item, explora-se esses tipos de danos, destacando suas causas, efeitos e as medidas mitigadoras utilizadas na indústria offshore.

De acordo com o Callister (2012), a fratura frágil ocorre sem qualquer deformação apreciável e através da rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é, aproximadamente, perpendicular à direção da tensão de tração aplicada, e produz uma superfície de fratura relativamente plana. Sendo assim, esse tipo de fratura é comum nos materiais frágeis, os quais possuem pouca ou nenhuma ductilidade e tenacidade.

Ademais, as trincas são caracterizadas por se tratar de pequenas fissuras ou rachaduras em materiais, devido a tensões externas ou internas. Desse modo, elas podem ser de tamanho microscópico ou até mesmo visíveis a olho nu, sendo comuns de acontecerem em materiais e estruturas.

Além disso, os danos devido ao fogo são um tipo de problema comumente observado em sistemas de tubulação que estão sujeitos a incêndios ou altas temperaturas. Dessa forma, existem algumas maneiras que podem fazer com que esse dano ocorra, sendo a extensão do dano causado dependente da severidade do incêndio, da temperatura atingida e do material da tubulação.

Outro fator que leva a falha do componente é a fluência, sendo a mesma identificável por meio da deformação do material que ocorre através da ação de cargas constantes e elevadas, sendo esse efeito combinado ao fato de a operação ser realizada em altas temperaturas. Logo,

esse fenômeno faz com que o material seja deformado de maneira gradual e contínua, tendo como resultado a redução das dimensões projetadas do material e um alongamento dele.

Os danos mecânicos referem-se a danos ou deformações causados em um material ou objeto devido à aplicação de forças externas, impactos, atrito ou estresse mecânico. Dessa forma, os danos podem ser provenientes de fatores diversos, tais como, forças de compressão, tensão, torção, cisalhamento, flexão e fadiga.

A fadiga é um mecanismo de dano que, segundo Callister (2012), ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e variáveis. Portanto, é possível que nessas circunstâncias ocorra uma falha sob um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração. Com isso, é possível definir a fadiga como o fenômeno que ocorre após um longo período, sendo sob tensões repetidas ou ciclos de deformação. Além disso, a falha por fadiga é considerada de natureza frágil mesmo em materiais normalmente dúcteis, sendo que o processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas, onde geralmente a superfície da fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada.

Por fim, a corrosão é definida por Callister (2012) como um ataque destrutivo e não intencional de um metal, esse ataque é eletroquímico e começa normalmente na superfície, sendo o tipo de dano que será mais bem detalhado nesse trabalho, pois é o fator que influencia na redução da espessura da tubulação estudada.

### 2.2.1 Corrosão

A corrosão é um tipo de deterioração em metais que está relacionado à perda de material causada pela dissolução, como exemplo na Figura 16, ou pela formação de um filme passivo não metálico, conhecido como oxidação. O processo corrosivo, é desencadeado por reações eletroquímicas que se desdobram no ânodo (onde ocorre a oxidação) e no cátodo (onde ocorre a redução).



**Figura 16 - Corrosão em tubo metálico. Fonte: ENCANADOR PORTO ALEGRE, 2023.**

A oxidação é o processo no qual o elemento metálico perde elétrons, convertendo-se em um cátion cuja carga determinada pela quantidade  $n+$  de elétrons retirados de sua camada de valência. A equação de redução do Fe é dada por:



Por outro lado, a redução é o processo em que a espécie química conhecida como agente oxidante aceita elétrons cedidos pelo metal, resultando na sua conversão em um ânion cuja carga é determinada pela quantidade  $n-$  de elétrons recebidos na sua camada de valência. A reação de redução do oxigênio, em meios neutros e básicos, segue a seguinte equação:



Os metais e ligas metálicas são suscetíveis à oxidação ou corrosão, variando em intensidade de acordo com o ambiente em que se encontram. Dessa forma, a corrosão de metais pode ser categorizada em algumas distintas modalidades, sendo essas: corrosão galvânica, corrosão em frestas, corrosão por pites, corrosão intergranular, lixiviação seletiva, erosão-corrosão, corrosão sob tensão, corrosão uniforme ou generalizada e corrosão localizada.

Sendo assim, torna-se importante entender os mecanismos inerentes à corrosão supracitados, de acordo com o Callister (2012), os tipos principais de corrosão são definidos da seguinte maneira.

A corrosão denominada galvânica, se manifesta quando dois materiais metálicos ou apenas ligas com composições distintas são eletricamente conectados em um ambiente contendo um eletrólito.

Além da corrosão galvânica, outra corrosão importante é a que ocorre em frestas. A corrosão por frestas acontece devido à variação na concentração dos íons presentes na solução eletrolítica entre duas áreas distintas da mesma peça.

Ademais, a corrosão por pites é de extrema relevância. A corrosão por pites é uma forma de corrosão localizada, na qual pequenos orifícios, chamados de pites, se formam na superfície da peça.

Também, pode se destacar a corrosão intergranular, estabelecida como um fenômeno que ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grão para algumas ligas e em ambientes específicos.

Outrossim, a lixiviação seletiva, trata-se de quando um elemento ou constituinte é removido preferencialmente como consequência de processos de corrosão.

Já a erosão-corrosão, surge da ação combinada de um ataque químico e da abrasão ou desgaste mecânico causado pelo movimento de um fluido.

Outro tipo de corrosão é a que ocorre sob tensão, sendo a mesma também chamada de trincamento por corrosão sob tensão, que é o resultado do efeito combinado de uma tensão de tração e de um ambiente corrosivo, sendo necessário que ambos os fenômenos ocorram simultaneamente.

Por fim, a corrosão uniforme, ou generalizada, e a corrosão localizada são duas formas diferentes de deterioração de um material devido à ação de agentes corrosivos, como a exposição a ambientes corrosivos. A principal diferença entre elas está na extensão e no padrão de corrosão. Dessa forma, a corrosão localizada é caracterizada por ocorrer em áreas específicas ou pontos isolados de uma superfície metálica, também, geralmente cria pequenas áreas de corrosão, como picadas, pontos ou fissuras, além disso, pode ser mais destrutiva em termos de profundidade, mas afeta uma área de superfície menor da superfície. Por outro lado, a corrosão generalizada ocorre de maneira uniforme em toda a superfície de um material, afetando uma grande área da superfície ocorrendo uma diminuição geral da espessura do material corroído, ao contrário da corrosão localizada, é geralmente menos destrutiva em termos de profundidade, mas pode afetar uma área maior, incluem a corrosão atmosférica e em ambiente aquoso como exemplos.

A escolha entre tratamentos e estratégias de prevenção depende do tipo de corrosão em questão. A corrosão localizada pode ser mais difícil de detectar e pode levar a falhas súbitas e

catastróficas, enquanto a corrosão generalizada é mais previsível e pode ser monitorada mais facilmente. Portanto, as medidas de prevenção e reparo serão adaptadas ao tipo específico de corrosão observado em um trecho curto ou em qualquer estrutura metálica.

#### 2.2.1.1 Corrosão uniforme ou generalizada

De acordo com Callister (2012), a corrosão uniforme ou generalizada é um tipo de corrosão eletroquímica, que ocorre quando toda a superfície exposta de um material metálico se deteriora de maneira uniforme e generalizada, resultando em uma cobertura ou depósito de material. Dessa forma, essas interações ocorrem de maneira microscópica, as reações de oxidação e redução são uniformes, geralmente na forma de oxigênio ou substância corrosivas. Portanto, é possível destacar exemplos comuns, como a ferrugem que se forma de maneira generalizada em aço e ferro. Usualmente, essa é a forma mais prevalente de corrosão e pode ser prevista com relativa facilidade, porém, pode ser extremamente prejudicial, pois a perda de material pode ocasionar falhas estruturais, reduzindo a vida útil em casos em que a manutenção e a preservação dos componentes não sejam adequadas. Uma ilustração de corrosão uniforme é apresentada na Figura 17.

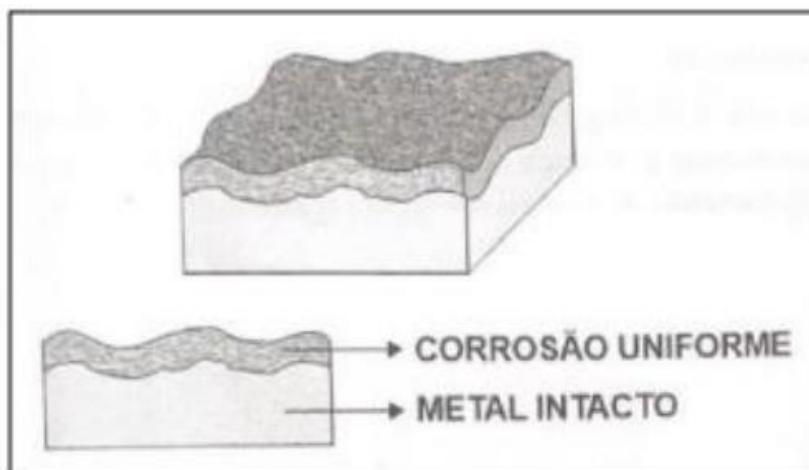


Figura 17 - Corrosão uniforme. Adaptado de LEAL JÚNIOR, 2023.

#### 2.2.1.2 Corrosão localizada

A corrosão localizada é um tipo de degradação que ocorre em áreas específicas de um material metálico, enquanto o restante da superfície permanece relativamente intacto. Esse tipo

de corrosão é mais concentrado em regiões localizadas, resultando em danos mais severos nessas áreas específicas. As corrosões já mencionadas, como as por pites, por frestas, galvânica, intergranular são exemplos desse tipo de corrosão.

O principal problema desse tipo de dano é a profundidade aliada a dificuldade de detecção da perda de espessura, já que não é possível visualizar a real extensão a olho nu, tornando necessária a inspeção regular para identificar sinais precoces de corrosão localizada e tomar medidas preventivas antes que danos significativos ocorram. A Figura 18 ilustra um caso de corrosão localizada.



**Figura 18 - Corrosão localizada. Fonte: OLIVEIRA, 2015.**

### 3 NORMA DE ADEQUAÇÃO AO USO

A Norma que trata da análise de adequação ao uso (*Fitness-For-Service - FFS*) API 579-1 (2021) foi desenvolvida pelo Instituto Americano de Petróleo (*American Petroleum Institute*), essa metodologia de estudo é utilizada para avaliação da integridade de estruturas, podendo ser utilizada em diversas indústrias, sendo elas siderurgia, nuclear, química, petroquímica ou até mesmo aeroespacial. As análises de *FFS* são atualmente amplamente reconhecidas e referenciadas nos códigos e padrões da API, incluindo o 510, 570 e 653. Essas análises desempenham um papel crucial na tomada de decisões relacionadas à execução, reparo ou substituição de equipamentos, proporcionando uma abordagem fundamentada e criteriosa.

O objetivo dessa análise é avaliar quantitativamente os danos e descontinuidades, sendo esses construtivos ou ocorridos ao longo da vida útil do equipamento (Todeschini, 2011). Após a análise, é avaliado se um componente ou estrutura está em condições de continuar operando com segurança e seu tempo de vida residual, mesmo apresentando defeitos ou danos, buscando primeiramente a integridade e a viabilidade operacional. Desse modo, por alguns motivos é possível escolher a *FFS* em vez de realizar um reparo ou substituição imediata. Esses motivos incluem a economia, pois a *FFS* permite avaliar se o componente danificado ainda é seguro para operar, evitando custos desnecessários de reparo ou substituição. Também, ocorre a minimização do tempo de parada, dado que a substituição ou reparo pode, em alguns casos, demandar tempo significativo e interromper a operação. Além disso, há a inviabilidade de reparo ou substituição, especialmente em componentes de difícil acesso, com superfícies inadequadas ou geometrias complexas, em áreas de risco. Por fim, há a limitação de recursos, que pode ocorrer devido a restrições de materiais ou mão de obra em determinadas situações.

Dessa forma, o *FFS* oferece uma alternativa viável se o componente ainda atender aos critérios de segurança e permite a realização de avaliações rápidas, que quando aprovadas permitem a operação contínua do componente. Caso a avaliação de nível 1 não seja suficiente para aprovar o equipamento, as avaliações de níveis 2 e 3 podem ser realizadas. Desta forma, a ferramenta *FFS* é uma opção viável e eficaz em termos de segurança e viabilidade, pois busca estabelecer se o componente danificado representa um risco aceitável para a segurança. Se a integridade estrutural for comprovadamente mantida dentro dos limites de segurança, a *FFS* pode ser mais prudente.

Ademais, é importante ressaltar que a escolha entre a *FFS* e o reparo/substituição depende da natureza do dano, da importância da estrutura/componente, dos regulamentos

aplicáveis e de uma avaliação adequada dos riscos. Em muitos casos, a *FFS* é usada como uma ferramenta de avaliação inicial para determinar a viabilidade de continuar operando, mas pode ser seguida por reparo ou substituição, se necessário.

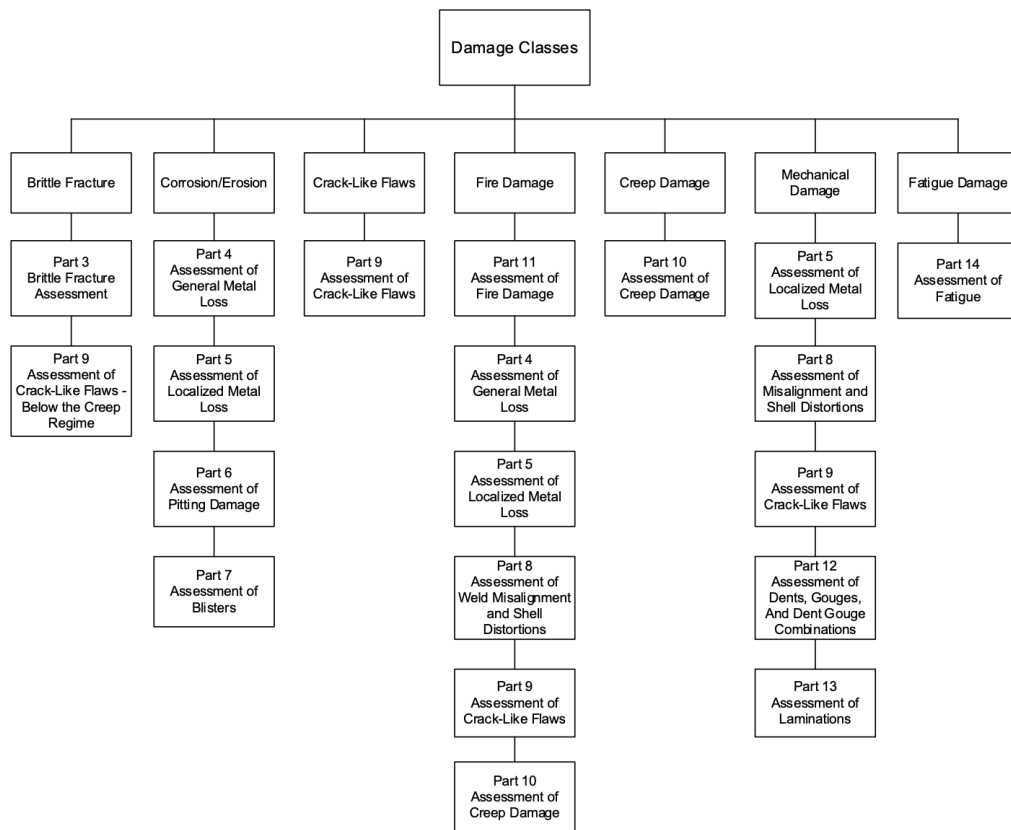
### 3.1 VISÃO GERAL

A norma API 579-1 é dividida em duas partes: a API 579-1 "*Fitness-For-Service*", que abrange o estudo em sua totalidade, incluindo teoria, demonstrações e diretrizes; e a API 579-1-2 "*Fitness-For-Service Example Problem Manual*", que foca na resolução de exemplos práticos e na aplicação direta dos princípios estabelecidos pela norma.

A API 579-1, que serve como base metodológica para atingir o objetivo deste trabalho, é subdividida em 14 partes. As duas primeiras abordam introdução e os níveis de estudo, enquanto da terceira até a décima quarta parte são descritos os procedimentos de avaliação. Os respectivos escopos das partes mencionadas estão definidos a seguir:

1. Parte 1: Esta parte introduz o estudo, abrangendo a delimitação do seu escopo e a explicação de sua aplicabilidade, além de delinear as responsabilidades dos usuários envolvidos. Também são destacadas as qualificações necessárias para a utilização adequada do estudo. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas como fundamentação.
2. Parte 2: Nesta parte, são abordados os níveis de estudo, a adequação para operação contínua, os métodos de avaliação, sua aplicação e limitações, as informações necessárias para conduzir o estudo, as técnicas e os critérios de aceitação, a definição da vida remanescente, as técnicas de inspeção, o monitoramento e os procedimentos de remediação.
3. Partes 03 a 14: As avaliações específicas para cada mecanismo de dano mencionado no item 2.2 são apresentadas. Cada parte adota uma abordagem distinta e é dividida em subseções que detalham aspectos cruciais, como aplicabilidade, dados necessários para análise, critérios de aceitação, cálculos de vida remanescente, estratégias de remediação e protocolos de monitoramento.

A Figura 19 apresenta, em inglês, o organograma que detalha a aplicação de cada parte, relacionando-a ao dano específico identificado na estrutura.



**Figura 19 - Organograma de Aplicação do FFS. Fonte: API 579-1, 2021.**

### 3.2 METODOLOGIA FFS

A aplicação bem-sucedida da metodologia *FFS* demanda a observância de uma série de premissas essenciais antes da condução dos cálculos estruturais. Inicialmente, é imperativo identificar o tipo de dano e seu mecanismo associado, essa identificação procede-se por meio de uma análise do histórico operacional do equipamento, integrada ao exame de seu projeto e suas normas de fabricação. Posteriormente, faz-se uso do organograma para determinar a parte específica da norma a ser empregada. A aplicabilidade da avaliação é definida dentro de cada parte, a partir daí o executante define se é possível ou não prosseguir com a avaliação. A Tabela 1 define, em inglês, a aplicabilidade de cada parte da norma.

**Tabela 1 - Aplicabilidade de acordo com o mecanismo de dano. Adaptado de API 579-1, 2021.**

**Table 2.1 – Overview of Flaw and Damage Assessment Procedures**

Flaw or Damage Mechanism	Part	Overview
Brittle Fracture	<a href="#">Part 3</a>	Assessment procedures are provided for evaluating the resistance to brittle fracture of existing carbon and low alloy steel pressure vessels, piping, and storage tanks. Criteria are provided to evaluate normal operating, start-up, upset, and shut-down conditions.
General Metal Loss	<a href="#">Part 4</a>	Assessment procedures are provided to evaluate general corrosion. Thickness data used for the assessment can be either point thickness readings or detailed thickness profiles. A methodology is provided to utilize the assessment procedures of <a href="#">Part 5</a> when the thickness data indicates that the metal loss can be treated as localized.
Local Metal Loss	<a href="#">Part 5</a>	Assessment techniques are provided to evaluate single and networks of Local Thin Areas and groove-like flaws in pressurized components. Detailed thickness profiles are required for the assessment. The assessment procedures can also be utilized to evaluate individual pits or blisters as provided for in <a href="#">Part 6</a> and <a href="#">Part 7</a> , respectively.
Pitting Corrosion	<a href="#">Part 6</a>	Assessment procedures are provided to evaluate widely scattered pitting, localized pitting, pitting which occurs within a region of local metal loss, and a region of localized metal loss located within a region of widely scattered pitting. The assessment procedures can also be utilized to evaluate a network of closely spaced blisters as provided for in <a href="#">Part 7</a> .
Blisters and HIC/SOHIC Damage	<a href="#">Part 7</a>	Assessment procedures are provided to evaluate isolated and networks of blisters and HIC/SOHIC Damage. The assessment guidelines include provisions for blisters and HIC/SOHIC damage located at weld joints and structural discontinuities such as shell transitions, stiffening rings, and nozzles.
Weld Misalignment and Shell Distortions	<a href="#">Part 8</a>	Assessment procedures are provided to evaluate stresses resulting from geometric discontinuities in shell type structures including weld misalignment and shell distortions (e.g. out-of-roundness and bulges).
Crack-Like Flaws	<a href="#">Part 9</a>	Assessment procedures are provided to evaluate crack-like flaws. Solutions for stress intensity factors and reference stress (limit load) are included in <a href="#">Annex 9B</a> and <a href="#">Annex 9C</a> , respectively. Methods to evaluate residual stress as required by the assessment procedure are described in <a href="#">Annex 9D</a> . Material properties required for the assessment are provided in <a href="#">Annex 9E</a> . Recommendations for evaluating crack growth including environmental concerns are also covered.
High Temperature Operation and Creep	<a href="#">Part 10</a>	Assessment procedures are provided to determine the remaining life of a component operating in the creep regime. Material properties required for the assessment are provided in <a href="#">Annex 10B</a> . Analysis methods for evaluating crack growth including environmental concerns are also covered.
Fire Damage	<a href="#">Part 11</a>	Assessment procedures are provided to evaluate equipment subject to fire damage. A methodology is provided to rank and screen components for evaluation based on the heat exposure experienced during the fire. The assessment procedures of the other Parts of this publication are utilized to evaluate component damage.
Dent, Gouge, and Dent Gouge Combinations	<a href="#">Part 12</a>	Assessment techniques are provided to evaluate dent, gouge, and dent gouge combinations in components.
Laminations	<a href="#">Part 13</a>	Assessment procedures are provided to evaluate laminations. The assessment guidelines include provisions for laminations located at weld joints and structural discontinuities such as shell transitions, stiffening rings, and nozzles.
Fatigue	<a href="#">Part 14</a>	Assessment procedures are provided to evaluate pressurized components subject to cyclic loading. The assessment procedures include specific requirements for welded joints.

Em conjunto com os dados reunidos para investigar a causa raiz da anomalia, é compilado o histórico de manutenção e conduzida uma inspeção do dano. Durante essa avaliação, são coletados detalhes como as dimensões da perda de espessura, o estado de tensões na região afetada do componente e as características mecânicas do material. Embora os dados necessários para a análise sejam geralmente os mesmos nas avaliações de 03 a 14, em algumas partes podem ser requisitadas informações específicas adicionais.

Outras premissas pertinentes incluem os critérios de avaliação e aceitação, os quais são distintos para cada item e definidos conforme o tipo de anomalia em questão. Vale destacar que é factível a ocorrência de múltiplos tipos de dano na mesma área avaliada, o que demanda uma avaliação abrangente utilizando mais de um item da norma. Seguindo essa avaliação, torna-se necessária a análise de vida remanescente, essa aproximação é feita com base numa estimativa

de tamanho futuro do dano, estabelecendo um tamanho limite. Dessa forma, essa estimativa busca um intervalo de inspeção seguro, que garanta a integridade do componente.

Os próximos passos são definidos para casos específicos, sendo estes o monitoramento em serviço e os métodos de remediação. O monitoramento em serviço é feito em casos complexos, devido ao serviço e ambiente em questão, essa complexidade dificulta a definição de uma vida remanescente precisa e, portanto, não é possível definir um intervalo de inspeção seguro. Desta forma, cada parte define métodos específicos de monitoramento constante para o(s) tipo(s) de dano em questão. A remediação é usada para controlar o tamanho futuro da anomalia, devido ao significativo crescimento do dano, o qual deteriora o material. Essa abordagem também é específica para cada mecanismo de dano.

A abordagem da Metodologia de *FFS* é pautada em três distintos níveis de estudo, os quais se diferenciam com base na complexidade e precisão da análise, no nível de conservadorismo adotado, na quantidade de informações requeridas e no nível de expertise do engenheiro encarregado da execução. Cada parte, numerada de 03 a 14, incorpora os níveis 1, 2 e 3, sendo o primeiro nível o mais conservador e menos complexo. Comumente, na indústria, esses níveis são conduzidos de forma sequencial, de modo que, se o primeiro não for aprovado, o estudo progride para o segundo e subsequentemente para o terceiro nível.

O primeiro nível da adequação ao uso é exclusivamente definido para cada tipo de dano no mecanismo em questão. Esta avaliação requer a integração de todos os dados mencionados anteriormente, juntamente com uma inspeção detalhada do componente em questão. Este estudo pode ser conduzido por profissionais especializados em inspeção ou engenharia dentro da unidade.

O segundo nível da Metodologia de Análise de Adequação ao Uso (*FFS*) foi concebido para oferecer uma análise menos conservadora e mais detalhada, resultando em conclusões mais precisas do que aquelas derivadas do que a inicial. Este estágio também demanda uma inspeção minuciosa, mas sua característica distintiva é a maior precisão nos cálculos. Dado o refinamento das operações de engenharia, a condução desse estudo requer a presença de um engenheiro experiente em *FFS*.

O terceiro nível deste estudo foi elaborado para alcançar a avaliação mais precisa e detalhada, superando o nível 2. Este estágio normalmente exige a inspeção mais meticulosa possível, podendo incluir até mesmo um escaneamento 3D do componente, e seus cálculos são fundamentados em análises numéricas, como a análise de elementos finitos, realizada por meio de softwares computacionais avançados. Para conduzir essa avaliação, é imperativo contar com engenheiros especializados e experientes neste nível.

As análises de adequação ao uso, do primeiro nível até o terceiro, dependem dos seguintes conceitos: Pressão Máxima de Trabalho Admissível (*PMTA*), Carga Limite do Componente Danificado (*LDC*), Carga Limite do Componente Sem Dano (*LUC*), Fator de Resistência Remanescente (*RSF*) e do Diagrama de Avaliação de Falha (*FAD*).

De acordo com a ASME B31.3 (2019), a *PMTA* é definida por pressão máxima que uma tubulação pode suportar de forma segura e contínua durante sua operação. A *PMTA* é geralmente determinada com base em normas, levando em consideração fatores como material, espessura, temperatura e condições de operação do equipamento. Para calcular essa pressão em um tubo cilíndrico, é utilizada a equação a seguir:

$$PMTA = \frac{2S_{adm}Et}{D_e - 2Yt} \quad (40)$$

É possível observar que a pressão é diretamente proporcional à tensão admissível do material ( $S_{adm}$ ), e à espessura de parede ( $t$ ), enquanto a *PMTA* diminui com o aumento do diâmetro externo ( $D_e$ ).

Segundo a API 579-1 (2021), a *LDC* é um parâmetro utilizado na engenharia de falhas e na análise de integridade estrutural para avaliar a capacidade de carga máxima que um componente com defeitos ou danos pode suportar antes de sofrer colapso plástico. Para calcular essa carga em tubulações é necessário identificar as condições de carregamento do componente, propriedades do material e principalmente o tipo de dano em questão, ou seja, a *LDC* é calculada de forma diferente em cada parte da API 579-1.

De acordo com a API 579-1 (2021), a *LUC* avalia a capacidade de carga máxima que um componente sem defeitos ou danos pode suportar antes de sofrer colapso plástico. Novamente para realizar o cálculo dessa carga é necessário conhecer as condições de carregamento do componente, propriedades do material, porém diferentemente do componente com anomalias, esse conceito é o mesmo para todas as partes da norma e pode ser calculado de maneira semelhante a tensão circunferencial presente na tubulação, conforme equação subsequente:

$$LUC = \frac{pD}{2t} \quad (41)$$

O Fator de Resistência Remanescente (*RSF*) é definido como capacidade remanescente de uma estrutura em relação a um determinado critério de falha. No caso geral o *RSF* é definido como  $RSF = \frac{LDC}{LUC}$ , porém ele possui um cálculo específico para a parte 5 da norma de *FFS*.

Outras definições importantes são a *LOSS* (Perda Uniforme de Espessura no Componente) e a *FCA* (Corrosão Futura no Componente Fora da Região do Dano). Segundo a API 579-1 (2021), *LOSS* é definido por quantidade de metal que foi uniformemente perdida no momento da inspeção, ou perda uniforme de metal fora da região danificada no momento da inspeção. A *FCA* é representada por capacidade de resistir à corrosão futura para compensar a perda de metal devido a taxa de corrosão atuante na estrutura, o valor do *FCA* é baseado na taxa de corrosão e o tempo previsto de vida remanescente do componente.

O Diagrama de Análise de Falha (*FAD*) é utilizado como uma ferramenta na tomada de decisões sobre a integridade estrutural de um componente. Esse diagrama é uma representação que identifica e analisa as possíveis causas de falha em um sistema ou componente, destacando os diversos modos de falha e as relações entre eles. Na Figura 20 é representado o *FAD*.

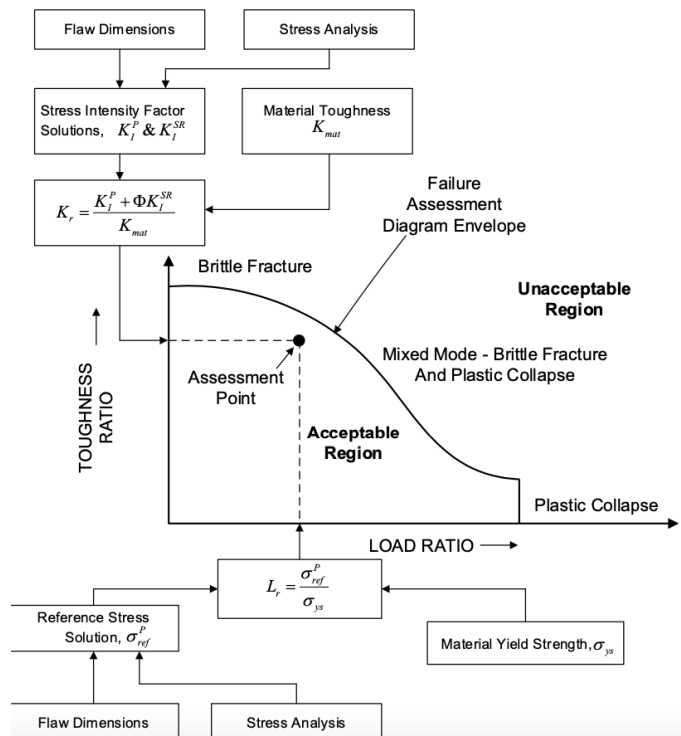


Figura 20 - Diagrama de Análise de Falha (FAD). Adaptado de API 579-1, 2021.

### 3.2.1 Parte 5: Avaliação da Perda de Espessura Local de Metais

Conforme mencionado no item anterior, a API 579-1 contém 11 partes definidas especificamente para cada tipo de dano, na parte 05 é feita a avaliação de perda de espessura localizada. Esta análise engloba elementos pressurizados propensos à perda localizada de material, resultante de processos como corrosão, erosão e/ou danos mecânicos. Através desses métodos os componentes avaliados podem ser qualificados para operação contínua, ou para redução de pressão. A Figura 21 mostra o fluxograma da parte 05.

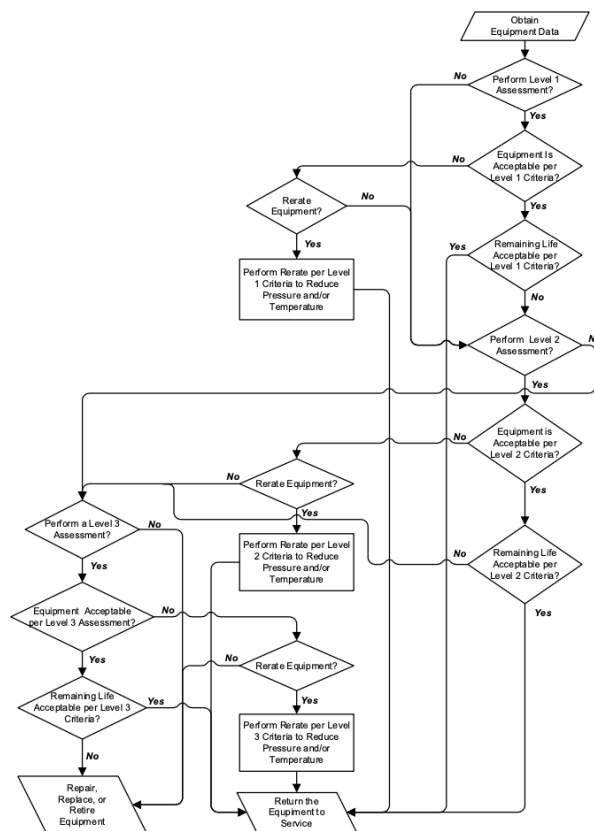


Figura 21 - Fluxograma de trabalho da parte 05. Fonte: API 579-1, 2021.

Na avaliação de *FFS*, é importante se definir a distinção entre a aplicação da parte 04 (perda de espessura generalizada) e da parte 05 (perda de espessura localizada). A diferença entre essas anomalias está na distribuição da perda de espessura ao longo do componente. A perda de espessura generalizada é uniforme, afetando uma grande área, enquanto a perda de espessura localizada é concentrada em uma região específica. Desta maneira, a abordagem para avaliação e reparo pode variar com base na natureza específica da deterioração.

Na parte 04, resumidamente, caso o componente possa ser avaliado usando perfis de espessura, existem quatro caminhos: Abordagem conservadora; Espessura média; Análise de tensões; ou caso não seja aplicável nenhum dos três anteriores, é necessário usar a parte 05 da norma.

As causas comuns destes danos são: corrosão, como por pites, danos mecânicos, trincas, erosão, até mesmo a redução de espessura devido a retificação ou esmerilhamento (procedimento realizado para remoção de trincas). Para o mecanismo de dano de corrosão, o item 2.2 deste trabalho define a diferença entre a corrosão uniforme e a localizada. O fluxograma de definição da avaliação a ser seguida é mostrado na Figura 22.

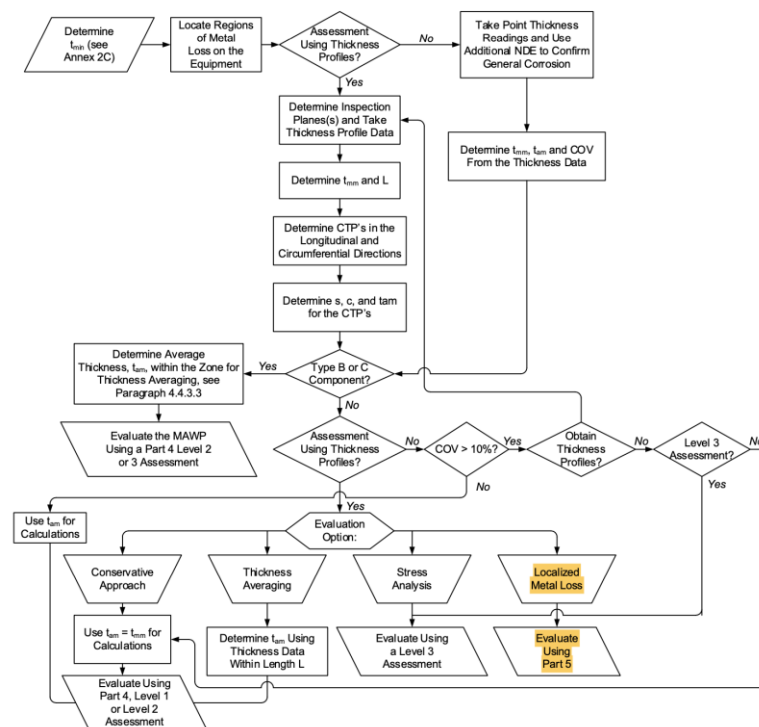


Figura 22 - Fluxograma de escolha entre parte 04 e parte 05. Fonte: API 579-1, 2021.

### 3.2.1.1 Definição de tipos de componentes

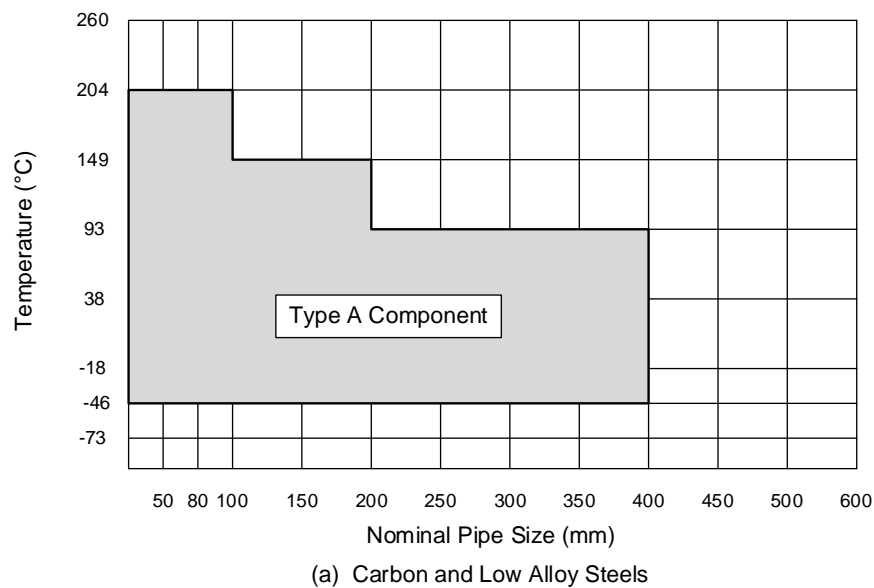
Os componentes avaliados são categorizados nos Tipos A, B e C, sendo crucial entender essas distinções, pois elas estabelecem limites claros entre os níveis 1, 2 e 3.

Os equipamentos do Tipo A são aqueles em que a pressão é o principal carregamento que determina a espessura projetada de parede. Outras cargas têm pouca influência, como é o caso de trechos retos de tubulação, conforme Figura 23.

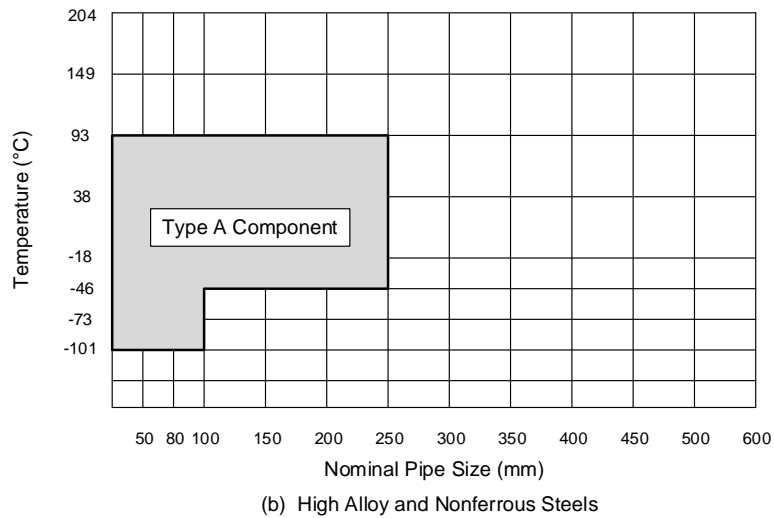


**Figura 23 - Componente do Tipo A. Fonte: HOMELE, 2023.**

No contexto de tubulações, as diretrizes normativas estabelecem duas tabelas que categorizam o Tipo A com base na temperatura de projeto e no diâmetro nominal do tubo. Portanto, uma tubulação em análise que não esteja contida nessa faixa designada não pode ser qualificada como componente do Tipo A. A Figura 24 apresenta o gráfico correspondente aos materiais de aço carbono e de baixa liga, enquanto a Figura 25 refere-se aos materiais não ferrosos e aos aços de alta liga.



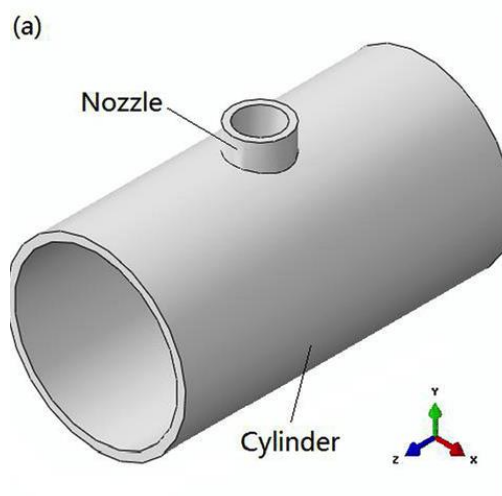
**Figura 24 - Limites de temperatura e diâmetro nominal para tubos de Tipo A. Fonte: API 579-1, 2021.**



**Figura 25 - Limites de temperatura e diâmetro nominal para tubos de Tipo A, para tubos não ferrosos e aços de alta liga. Fonte: API 579-1, 2021.**

O Tipo B é subdividido em B1 e B2. O B1 refere-se aos mesmos exemplos de componentes do Tipo A, diferenciando-se no cálculo de espessura mínima do projeto, a qual é governada pela pressão em conjunto com cargas suplementares. Portanto, um exemplo seria tubulações que não se enquadram no Tipo A.

O Tipo B2 é caracterizado por geometrias mais complexas em comparação com os tipos anteriores. Essas geometrias exigem a determinação de um nível de tensões conforme normas e códigos específicos, levando em consideração condições particulares, como é o caso de bocais de vasos de pressão, de acordo com a Figura 26.



**Figura 26 - Bocal de vaso de pressão. Fonte: UO, JIANG, ZHANG, WEI, ZHANG, WAN, WANG, 2016.**

Quanto ao Tipo C, esse não possui normas nem códigos de projeto, e sua espessura não é regida por equações dependentes de pressão e carregamentos. Desta forma, é uma exceção aos casos mencionados acima, sendo um exemplo a cabeça do vaso de pressão com junções de casco, conforme Figura 27.



**Figura 27 - Componente Tipo C. Fonte: ARC MACHINES, 2023.**

#### 3.2.1.2 Aplicabilidade e limitações

As formas de perda de espessura da parede interna, ou externa, da tubulação são separadas em dois tipos: Afinamento Localizado (LTA) e Sulco (*Groove*). Caso outro tipo de dano seja identificado, não é recomendada a utilização desta avaliação.

A LTA é definida por uma região de redução de parede, onde o comprimento de uma área afetada corresponde aproximadamente à mesma ordem de grandeza que sua largura. Deste modo, sendo desencadeada pelos mecanismos de dano mencionados neste item. Um exemplo de LTA é ilustrado na Figura 28.

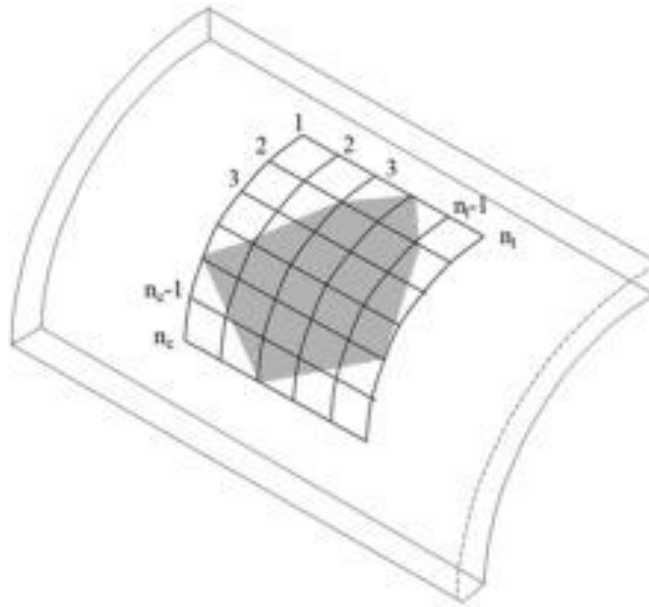


Figura 28 - Exemplo de LTA. Adaptado de LU; WANG, 2020.

O Sulco, por sua vez, é caracterizado por um dano fino e alongado, resultante de erosão ou corrosão direcional; onde o seu comprimento é significativamente superior à sua largura, ou seja, uma área menos distribuída. Um exemplo de sulco é mostrado na Figura 29.

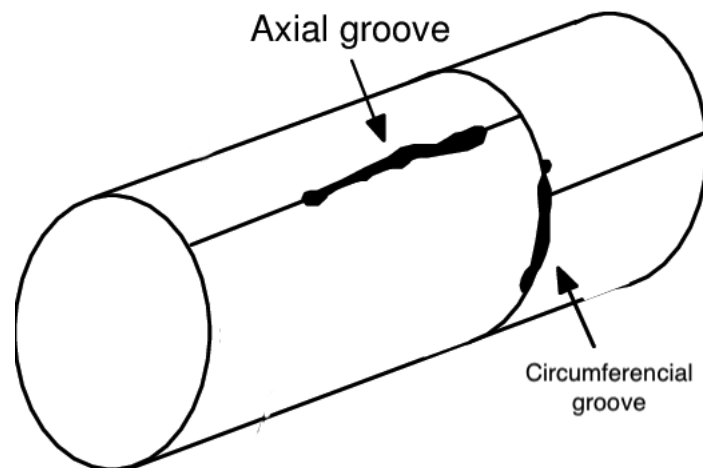


Figura 29 - Exemplos de Sulco. Fonte: Adaptado de CHEN, KHOO, CHENG, 2009.

Dentro das limitações, é importante ressaltar que os componentes avaliados nesse item da norma não podem operar na faixa de fluência, caso contrário novamente não é recomendada

a utilização desta parte da norma. Para auxiliar a verificação, é disponibilizada a Tabela 2 abaixo, para um grupo seletivo de materiais.

**Tabela 2 - Materiais e seus limites de temperatura limite para regime em fluência. Adaptado de API 579-1, 2021.**

Material	Temperature Limit
Carbon Steel ( $UTS \leq 414MPa$ (60 ksi))	343°C (650°F)
Carbon Steel ( $UTS > 414MPa$ (60 ksi))	371°C (700°F)
Carbon Steel – Graphitized	371°C (700°F)
C-1/2Mo	399°C (750°F)
1-1/4Cr-1/2Mo – Normalized & Tempered	427°C (800°F)
1-1/4Cr-1/2Mo – Annealed	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Normalized & Tempered	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Annealed	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Quenched & Tempered	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – V	441°C (825°F)
3Cr-1Mo-V	441°C (825°F)
5Cr-1/2Mo	427°C (800°F)
7Cr-1/2Mo	427°C (800°F)
9Cr-1Mo	427°C (800°F)
9Cr-1Mo – V	454°C (850°F)
12 Cr	482°C (900°F)
AISI Type 304 & 304H	510°C (950°F)
AISI Type 316 & 316H	538°C (1000°F)
AISI Type 321	538°C (1000°F)
AISI Type 321H	538°C (1000°F)
AISI Type 347	538°C (1000°F)
AISI Type 347H	538°C (1000°F)
Alloy 800	565°C (1050°F)
Alloy 800H	565°C (1050°F)
Alloy 800HT	565°C (1050°F)
HK-40	649°C (1200°F)

No que diz respeito as restrições dos materiais, é essencial salientar que o material de projeto deve possuir tenacidade. Caso contrário, sem a certeza quanto do nível de tenacidade do material, desaconselha-se a aplicação da parte 05 da norma.

Neste item, também é restrito o funcionamento do tubo em regimes cíclicos, os quais podem ser originados por flutuações de pressão e/ou temperatura, ou partidas e desligamentos. Para que o equipamento seja classificado como sujeito a serviço cíclico, é necessário que ele tenha acumulado pelo menos 150 ciclos ao longo de sua trajetória, incluindo tanto os ciclos já ocorridos quanto os previstos para operações futuras.

### 3.2.1.3 Inspeção e medição de espessura

Para a realização do estudo detalhado da parte 05, é imperativo reunir todos os dados mencionados no item 2.3.2 deste trabalho. Essas informações, aliadas aos dados de inspeção, são fundamentais para os cálculos dos níveis 1 e 2.

As inspeções, incluindo medições de espessura, desempenham um papel crucial nesse estudo. É essencial destacar que, antes da execução da Avaliação de *FFS*, é necessário comparar a espessura atual com a espessura mínima requerida no projeto. Se a espessura medida subtraída da corrosão futura (*FCA*) for maior que a espessura mínima de projeto, a adequação ao uso não é necessária.

Sendo necessário o *FFS*, o procedimento de inspeção abaixo é necessário:

1. Primeiramente localizar a região de perda de espessura localizada, sendo esta interna (maior dificuldade de localização) ou externa.
2. Classificar o tipo de componente, para traçar os perfis críticos.
3. Traçar os planos longitudinais e circunferenciais, denominada Malha (*Grid*), na superfície danificada. São recomendados, no mínimo, cinco pontos por direção, porém este número pode ser menor, caso o perfil seja uniforme. A Figura 30 mostra um exemplo de Malha.

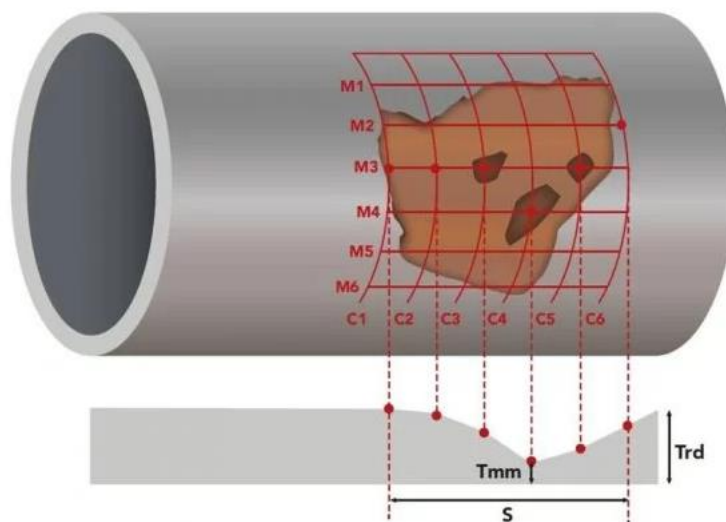


Figura 30 - Exemplo teórico de Malha. Fonte: LU; WANG, 2020.

4. Determinar a espessura medida fora da região do dano ( $t_{rd}$ ), sendo que esta medida não é necessariamente igual à espessura nominal.
5. Dentro dos intervalos da malha, definir o valor de espessura mínimo medido ( $t_{mm}$ ).

6. Determinar o perfil de espessura crítico (*CTP*), de acordo com os planos longitudinais e circunferenciais. Este perfil é determinado traçando um caminho conectando os pontos de  $t_{mm}$  de cada direção. Esse caminho encontra seu fim em um valor medido maior que  $t_{rd}$ . A Figura 31 nos mostra um exemplo de *CTP*.

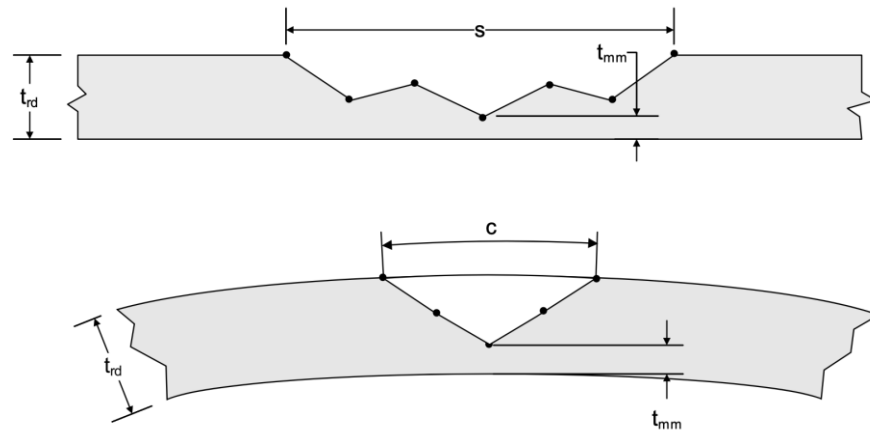
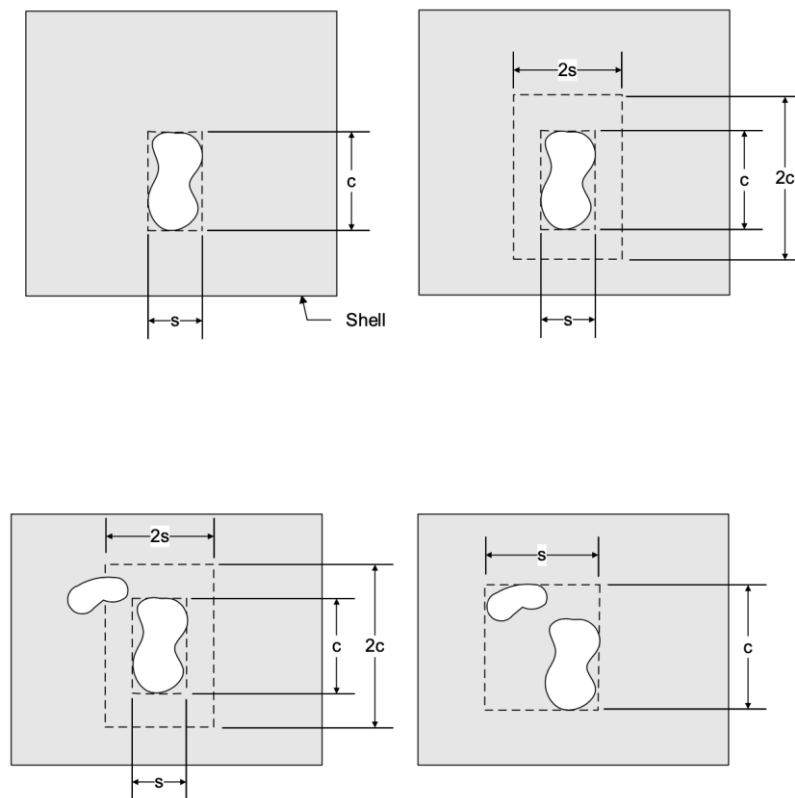


Figura 31 - Construção do *CTP*. Adaptado de API 579-1, 2021.

7. Interação entre danos: Caso existam duas ou mais regiões de perda de espessura próximas, é necessário verificar se os danos interagem. A determinação dessa interação, é feita posicionando um dos danos dentro de uma caixa de dimensões “ $s$ ” x “ $c$ ”. O próximo passo é dobrar as duas medidas dessa caixa para “ $2s$ ” e “ $2c$ ”. Caso a outra região danificada se encontre dentro dos limites deste segundo *box*, é definido que os danos interagem. Portanto, pode-se prosseguir delimitando os dois danos, em conjunto, dentro de um terceiro *box*. A Figura 32 representa todo o procedimento descrito.



**Figura 32 - Enquadramento dos danos. Adaptado de API 579-1, 2021.**

Tanto para danos de LTA e para danos de Sulco, o procedimento acima é requerido. Para LTA a malha é definida nas direções longitudinal e circunferencial. Para Sulco o procedimento é parecido, porém as medições devem ser paralelas e perpendiculares ao comprimento deste dano. Todas as soldas encontradas dentro da caixa de “ $2s$ ” x “ $2c$ ” devem ser examinadas com técnicas de Partícula Magnética (MT), de Líquido Penetrante (PT) ou de Ultrassom (UT).

#### 3.2.1.4 Dados requeridos

Feitas as medições de espessura, o próximo passo envolve a coleta dos dados necessários para os estudos dos diferentes níveis. Para as anomalias estudadas, são requeridas as medidas dos *CTPs* encontradas, sendo essas as medidas “ $s$ ”, “ $c$ ”, “ $g_l$ ”, “ $g_w$ ”, “ $g_r$ ” e “ $\beta$ ”.

Para *LTA*, são requeridas apenas as dimensões “ $s$ ” e “ $c$ ”, supracitadas. Com essas informações é possível definir a *CTP*. Já no Sulco, as variáveis “ $g_l$ ”, “ $g_w$ ”, “ $g_r$ ” e “ $\beta$ ” respectivamente representam o comprimento, largura, raio e orientação do dano. Para aplicações de níveis 1 e 2, o Sulco pode ser avaliado da mesma forma que uma *LTA*. Caso o

Sulco esteja orientado em um ângulo com o eixo longitudinal, deve-se projetar as medidas de acordo com as seguintes equações:

$$s = g_l \cos(\beta) + g_w \operatorname{sen}(\beta) \quad (42)$$

$$c = g_l \operatorname{sen}(\beta) + g_w \cos(\beta) \quad (43)$$

Outro dado importante é a  $L_{MSD}$ , a qual é estabelecida por uma descontinuidade estrutural (*MSD* vem do inglês *Major Structural Discontinuity*), ou seja, esse parâmetro representa a distância à descontinuidade estrutural mais próxima. Essa descontinuidade pode ser representada por um cordão de solda, uma redução, flange, suporte, dentre outros. A Figura 33 representa dois tipos de *MSD*.

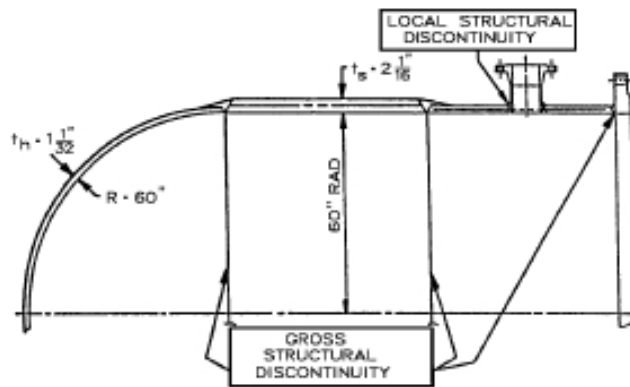


Figura 33 - Exemplo de descontinuidade estrutural (*MSD*). Fonte: JAWAD, FARR, 1984.

### 3.2.1.5 Nível 1

As avaliações de nível 1 se aplicam exclusivamente aos Componentes do Tipo A, onde a grandeza levada em conta é a pressão interna, de forma que os procedimentos são usados para determinar a aceitabilidade e/ou reavaliar um componente danificado. Em situações que ocorrem grandes variações na espessura ao longo do comprimento da anomalia ou se a rede de danos estiver densamente distribuída, esse método pode reprovar a tubulação por ser o mais conservador da metodologia *FFS*. Portanto, nessa situação buscando resultados mais abrangentes, deve-se empregar a avaliação de nível 2.

O procedimento que será descrito ao longo desse tópico, é desenvolvido para componentes onde a *PMTA* pode ser determinada. Sendo assim, pode-se dividir os procedimentos nas seguintes etapas:

1. Determinar o perfil de espessura crítica (*CTP*), conforme mostrado na Figura 34;

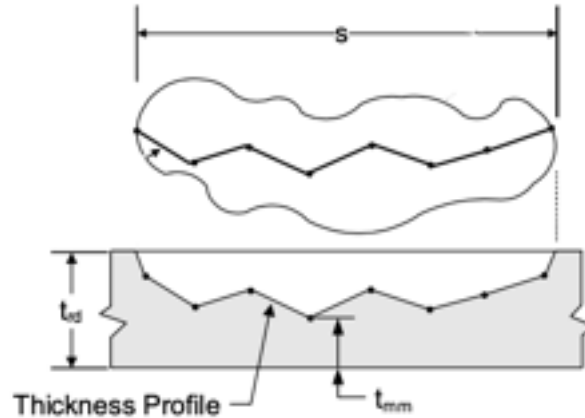


Figura 34 - Perfil de espessura crítica. Adaptado de API 579-1, 2021.

2. Encontrar a espessura de parede a ser usada na avaliação por meio das seguintes equações, conforme aplicabilidade:

$$t_{rd} = t_{nom} - LOSS \quad (44)$$

$$t_c = t_{rd} - FCA \quad (45)$$

3. Estabelecer a espessura mínima medida na LTA,  $t_{mm}$ , e as dimensões,  $s$  e  $c$  para o *CTP*;
4. Calcular a relação de espessura restante ( $R_t$ ) e o parâmetro do comprimento longitudinal ( $\lambda$ ) do dano usando as equações a seguir:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_c} \quad (46)$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{D_i t_c}} \quad (47)$$

5. Checar os critérios de tamanho de dano que limitam o procedimento. Se os requerimentos apresentados a seguir forem satisfeitos, deve-se seguir para a próxima etapa, caso contrário **o dano não é aceito** para uma avaliação de nível 1:
- $R_t \geq 0.20$
  - $t_{mm} - FCA_{ml} \geq 1.3 \text{ mm}$  (para tubulações)
  - $L_{MSD} \geq 1.8 \sqrt{D_i t_c}$
6. Se a região de perda por corrosão localizada for categorizada como uma LTA (isto é, a região de dano não é um Sulco), segue-se para a etapa 7. Entretanto, se a região for caracterizada como Sulco, a equação subsequente deve ser atendida para que seja possível prosseguir para a etapa 7. Caso contrário, não é possível a avaliação pelo nível 1 e deve-se prosseguir para outra abordagem:

$$\frac{g_r}{(1 - R_t)t_c} \geq 0.5 \quad (48)$$

7. Em seguida, deve-se determinar a *PMTA*, conforme equação (40), para o componente usando a espessura determinada pela etapa 2;
8. A etapa 8 se caracteriza pela verificação do gráfico da Figura 35 que representa a relação entre os valores de  $\lambda$  e  $R_t$  para cascos cilíndricos e esféricos. Se o ponto estiver na região acima da curva, então a operação do componente com a *PMTA* definida no projeto é aceitável. De outra forma, se a anomalia não for aceitável deve-se determinar o *RSF*, definido na seguinte equação:

$$RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} \quad (49)$$

OBS: O parâmetro  $M_t$ , usado na equação anterior, é utilizado para representar os efeitos da deformação na região do defeito na tensão circunferencial, conforme a norma API 579-1, sendo calculado a partir de  $\lambda$ , através da equação a seguir ou determinado via Tabela 3:

$$M_t = \left[ \begin{array}{l} 1,0010 - 0,014195 \cdot \lambda + 0,29090 \cdot \lambda^2 - 0,096420 \cdot \lambda^3 - 0,020890 \cdot \lambda^4 \\ - 0,0030540 \cdot \lambda^5 + 2,9570(10^{-4}) \cdot \lambda^6 - 1,8462(10^{-5}) \cdot \lambda^7 \\ + 7,1553(10^{-7}) \cdot \lambda^8 - 1,5631(10^{-8}) \cdot \lambda^9 \\ + 1,4656(10^{-10}) \cdot \lambda^{10} \end{array} \right] \quad (50)$$

Tabela 3 - Parâmetro  $M_t$  de acordo com  $\lambda$ . Adaptado de API 579-1, 2021.

$\lambda$	$M_t$	
	Cylindrical or Conical Shell	Spherical Shell
0.0	1.001	1.000
0.5	1.056	1.063
1.0	1.199	1.218
1.5	1.394	1.427
2.0	1.618	1.673
2.5	1.857	1.946
3.0	2.103	2.240
3.5	2.351	2.552
4.0	2.600	2.880
4.5	2.847	3.221
5.0	3.091	3.576
5.5	3.331	3.944
6.0	3.568	4.323
6.5	3.801	4.715
7.0	4.032	5.119
7.5	4.262	5.535
8.0	4.492	5.964
8.5	4.727	6.405
9.0	4.970	6.858
9.5	5.225	7.325
10.0	5.497	7.806
10.5	5.791	8.301
11.0	6.112	8.810
11.5	6.468	9.334
12.0	6.864	9.873
12.5	7.307	10.429
13.0	7.804	11.002
13.5	8.362	11.592
14.0	8.989	12.200
14.5	9.693	12.827
15.0	10.481	13.474
15.5	11.361	14.142

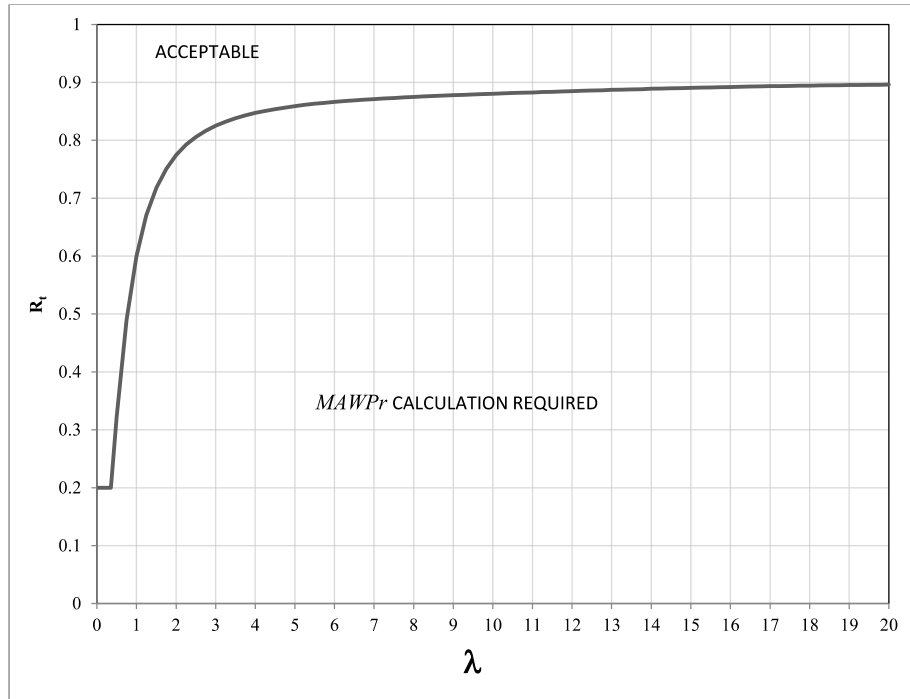


Figura 35 - Gráfico de definição da aceitação da PMTA. Adaptado de API 579-1, 2021.

Sendo assim, caso  $RSF \geq RSF_a$ , a operação definida é admissível, com a *PMTA* definida pela equação (40). Caso contrário, é necessário a redução da pressão para o equipamento operar. Segundo a API 579-1, a redução da pressão máxima de trabalho é feita através da equação subsequente, onde essa redução é proporcional à razão entre resistências remanescentes.

$$PMTA_r = PMTA \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad (51)$$

O  $RSF_a$  pode ser definido como 0,90 ou por meio de cálculos de acordo com o Anexo F da norma.

9. A etapa 9 é utilizada para os componentes de superfícies cilíndricas e cônicas, além de cotovelos. Para esse procedimento, é verificada a tensão longitudinal da região do dano. São necessárias as etapas de verificação abaixo:

- $c \leq 2s \left(\frac{E_L}{E_C}\right)$ , caso não atendida, prosseguir para o tópico abaixo;
  - Calcular a  $t_{min}^L$  usando a  $PMTA_r$ , através da equação a seguir;

$$t_{min}^L = \frac{PMTA_r \cdot D}{4(SE + PMTA_r \cdot Y)} \quad (52)$$

- Determinar:  $t_{min}^L \leq t_{mm} - FCA_{ml}$ , se a condição não for satisfeita, utilizar o tópico abaixo;
  - Definir a nova  $PMTA_r$  através da seguinte equação:

$$PMTA_r^* = PMTA_r \left( \frac{t_{mm} - FCA_{ml}}{t_{min}^L} \right) \quad (53)$$

Por fim, caso após todas as verificações das etapas supracitadas, o componente não atenda as qualificações do nível 1, é necessária outra abordagem, sendo estas: Reparo, substituição ou redução da pressão de operação; Redução da  $FCA_{ml}$ , através de pintura ou outros mecanismos para mitigar a corrosão; Ajuste do coeficiente de solda; por último, seguir para avaliações de níveis 2 e 3.

### 3.2.1.6 Nível 2

Conforme supracitado, este nível de estudo proporciona resultados mais efetivos utilizando uma análise mais refinada. Desta forma, a melhoria é realizada através do cálculo do  $RSF$ , principalmente para casos que apresentam grandes variações no  $CTP$ . Portanto, o nível 2 garante que o trecho mais atingido pela perda de espessura seja devidamente identificado, posteriormente avaliado e que seus métodos sejam empregados para avaliar regiões metálicas, pouco espaçadas, que se encontram com redução de espessura. Além disso, este procedimento aplica-se não somente a componentes do tipo A, mas também a componentes do tipo B1 de Classe 1.

Neste trabalho, será estudado o nível 2 aplicado a componentes de tipo A, sendo assim a utilização deste procedimento pode ser feita após a análise de nível 1, quando este primeiro

método não é aprovado. Isto posto, é importante destacar que as limitações desse nível da avaliação são as mesmas do primeiro nível.

Ademais, cabe destacar que a avaliação de nível 1 e nível 2 tem semelhanças além da citada anteriormente. Deste modo, as etapas de 1 até 5 seguem a mesma metodologia para os dois estudos, sendo que a diferenciação ocorre a partir da etapa 6, quando a região de perda for caracterizada como um Sulco.

Os componentes de tipo A e B1 possuem uma avaliação própria, com verificações similares. As fases da avaliação para os componentes tipo A, conforme citado anteriormente, são inicialmente iguais à avaliação de nível 1, portanto nesse item será detalhado do passo 6 em diante:

6. Se a região de perda por corrosão localizada for categorizada como uma LTA, segue-se para a etapa 7. Entretanto, se a região for caracterizada como um Sulco, os passos de *a* até *c* devem ser seguidos;
  - a. Caso a equação a seguir for satisfeita, seguir para a etapa 7. Caso negativo seguir para etapa 6b.

$$\frac{g_r}{(1 - R_t)t_c} \geq 0.5 \quad (54)$$

- b. Se a equação subsequente for satisfeita, então o Sulco em estudo deve ser avaliado como uma trinca e seguir a parte 9 da norma API 579-1, onde a profundidade e comprimento da trinca são considerados iguais aos do Sulco e a tenacidade a fratura é encontrada na Tabela 4.

$$0.1 < \frac{g_r}{(1 - R_t)t_c} < 0.5 \quad (55)$$

**Tabela 4 - Cálculo de Tenacidade a fratura. Adaptado de API 579-1, 2021.**

Material	Toughness Coefficients					
	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
High-Sulfur Steels (Greater than 0.01 percent)	90.93	0.107416	502.3968	7.206574	1191.002	0.0
Low-Sulfur Steels (0.01 percent or less)	146.27	-11.03721	-1626.36	62.67731	10229.16	-28.1154

$$K_{mat,g} = \frac{A_0 + A_2\beta + A_4\beta^2}{1 + A_1\beta + A_3\beta^2 + A_5\beta^3} \cdot C_K$$

Where:

$$\beta = \frac{g_r}{a} \left( \frac{a}{t_c} \right)^{0.9}$$

$$a = (1 - R_t)t_c$$

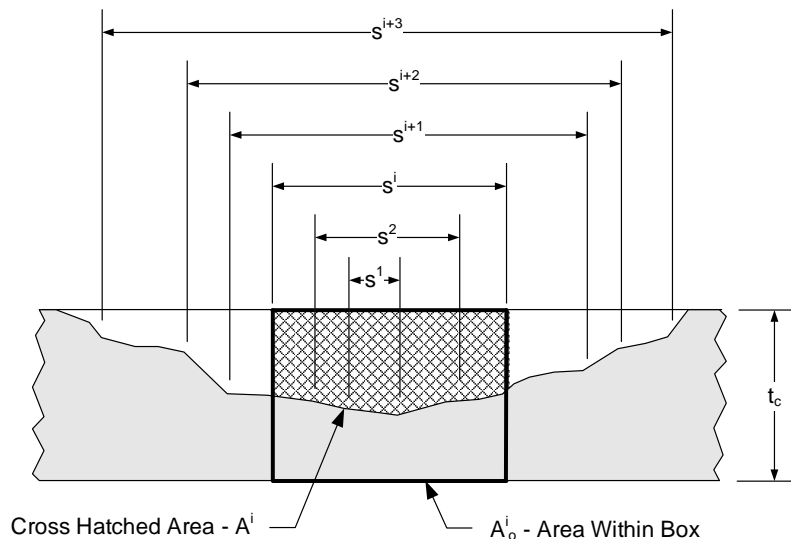
$$C_K = 1.0 \quad \text{for } ksi\sqrt{in}$$

$$C_K = 1.09884 \quad \text{for } MPa\sqrt{m}$$

- c. Se a seguinte equação for satisfeita, então o Sulco em estudo também deve ser avaliado como uma trinca e deve seguir a parte 9 da norma API 579-1, onde a profundidade e comprimento da trinca são considerados iguais aos do Sulco e a tenacidade a fratura é avaliada conforme parte 9.

$$\frac{g_r}{(1 - R_t)t_c} \leq 0.1 \quad (56)$$

7. Determinar a *PMTA* do componente, conforme equação (40), da mesma maneira do nível 1;
8. Determinar o *RSF* para o perfil de espessura *CTP*, conforme procedimento de *a* até *g* listado a seguir;
- Classificar em ordem crescente as medidas de espessura.
  - Definir o local de perda máxima de material como o ponto inicial da avaliação. Esse ponto será o  $t_{mm}$ . Os demais pontos de partida deverão estar de acordo com o passo *a*.
  - Subdividir o perfil de espessura em seções a partir de seu ponto inicial. A quantidade de subseções é definida de acordo com a precisão desejada, sempre abrangendo as grandes variações de espessura. A Figura 36 representa o procedimento de subdivisão.



**Figura 36 - Subdivisões realizadas no *CTP*. Adaptado de API 579-1, 2021.**

- d. Para cada item, calcular seu *RSF* equivalente, conforme equação subsequente:

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i} \left(\frac{A^i}{A_o^i}\right)} \quad (57)$$

OBS:  $A_o^i = s^i t_c$ .

O parâmetro  $M_t^i$  é determinado através da Tabela 3, ou utilizando  $\lambda = \lambda_i$  e  $s = s_i$  na equação (50).

- e. Determinar o valor mínimo dentre os  $RSF^i$  calculados no passo anterior. A partir disso é definido o ponto de avaliação verdadeiro.
  - f. Repetir o procedimento dos passos  $c$  até  $e$  para o próximo ponto de partida, o qual corresponde ao próximo ponto listado nos perfis de espessura.
  - g. O  $RSF$  a ser considerado na avaliação é o de valor mínimo encontrado dentre todos os pontos avaliados.
9. Avaliar a extensão longitudinal do dano para superfícies cilíndricas e cônicas. Para superfícies esféricas e conformadas é necessário avaliar as regiões circunferenciais e meridionais de maior extensão do dano. Sendo assim, caso o  $RSF \geq RSF_a$ , então a operação definida é admissível com a  $PMTA$  definida pela PSV, caso contrário, é necessário o cálculo da  $PMTA_r$ , conforme equação (51), para aprovação do equipamento;
  10. A última etapa da avaliação é igual a etapa 9 do nível 1, sendo necessária apenas para componentes de superfícies cilíndricas e cônicas, além de cotovelos, de maneira que o mesmo procedimento e as mesmas equações são utilizados, ou seja, nesse nível também é avaliada a tensão longitudinal da região danificada.

Caso algum dos passos acima não seja atendido, a avaliação do item 5.4.3.4 da norma é utilizada para uma análise mais detalhada.

Por fim, caso após todas as verificações das etapas supracitadas, o componente não atenda as qualificações do nível 2, é necessária outra abordagem, sendo estas: Reparo, substituição ou redução da pressão de operação; Redução da  $FCA_{ml}$ , através de pintura ou outros mecanismos para mitigar a corrosão; Ajuste do coeficiente de solda; ou seguir para avaliação de nível 3.

## 4 ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar um exemplo da aplicação da metodologia descrita nos capítulos anteriores. Com isso, visa estabelecer as ações e verificações necessárias para a manutenção da integridade das tubulações industriais. Todo equipamento de instalação *offshore* precisa de inspeções periódicas e do histórico operacional dela.

Os inspetores são responsáveis diretamente para identificação dos danos e de reportá-los ao engenheiro de integridade responsável. As técnicas de inspeção variam desde a visual até outros tipos de ensaios não destrutivos, como ensaio por ultrassom ou raios x. Depois de definido o tipo de avaria, e a sua localização, é importante a definição do mecanismo de dano.

Quando esse mecanismo é definido, pode ser escolhida a sua solução, seja o reparo ou substituição do trecho, ou a avaliação de *FFS* estudada neste trabalho, a qual pode aprovar a operação, ou reclassificar essa linha para operar numa pressão reduzida.

Neste capítulo será apresentado o estudo de um caso, onde serão aplicadas as metodologias descritas no Capítulo 2 deste trabalho.

### 4.1 DESCRIÇÃO DO CASO

Foi escolhida para o estudo de caso uma tubulação de uma plataforma de óleo e gás localizada na Bacia de Santos. Essa tubulação é de gás de processo, gás o qual após processamento e refino se transforma nos gases combustíveis conhecidos como *GLP* e *GNV*. A produção do sistema o qual essa linha está contida é vital para operação da plataforma. Caso esse sistema seja interditado, a produção é forçada a parar, porque essa linha é considerada um elemento crítico da plataforma. A linha é composta por um tubo de 2” com diâmetro externo de 60,3 mm e uma espessura de parede de tamanho comercial *SCH XXS*, conforme as normas ASME B36.10 e ASME B36.19M, equivalente a uma espessura nominal de 11,1 mm. Essa linha de aço carbono foi projetada conforme ASME B31.3 para uma classe de pressão ASME Classe 2500, onde o fluido de serviço atualmente escoava com uma pressão de 25,53 MPa e uma temperatura de 50 °C. A Figura 37 mostra o trecho analisado da tubulação e seus dados de projeto são apresentados na Tabela 5.



**Figura 37 – Tubulação de transporte de gás de processo, componente com dano de perda de espessura localizada devido a corrosão externa. Fonte: Próprio autor.**

**Tabela 5 - Dados do componente.**

Código de projeto	ASME B31.3
Material	ASTM SA-106 Gr. C
Espessura Nominal	11,1 mm
Diâmetro Externo	60,3 mm
Espessura Mínima Requerida ( $t$ )	7,3 mm
Tensão Admissível	161 MPa – ASME B31.3 Tabela A1M
Pressão de Projeto	42,55 MPa
Eficiência de Junta L	1,00
Eficiência de Junta C	1,00
Diâmetro Interno	38,1 mm
Peso Próprio + Peso Fluido	14,58 kg
Comprimento do trecho	1000 mm

#### 4.1.1 O Problema

A tubulação supracitada encontra-se com um trecho deteriorado devido a corrosão atmosférica do ambiente marinho ao qual a plataforma está exposta. Dessa forma, a corrosão gerou uma perda de espessura localizada, ocasionando um dano localizado que cobre uma área de superfície de aproximadamente 6300 mm<sup>2</sup>. A Tabela 6 disponibiliza os dados do dano

encontrado no trecho da linha e a Tabela 7 configura a malha de medições de espessura, a qual foi construída conforme item 3.2.1.3.

**Tabela 6 - Dados do Dano.**

Mecanismo de dano	Corrosão atmosférica externa
Comprimento	70 mm
Largura	90 mm
Espessura mínima encontrada	2,8 mm
$L_{MSD}$	100 mm

**Tabela 7 – Malha de medições de espessura.**

Dados de Inspeção												
Planos de Inspeção Longitudinais	Planos de Inspeção Circunferenciais										CTP Circunferencial	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10		
M1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
M2	11,1	11,1	9	9,2	9	8,8	9,5	9,3	11,1	11,1	11,1	8,8
M3	11,1	11,1	8,5	4,7	4,1	4	5,4	8,7	11,1	11,1	11,1	4
M4	11,1	11,1	8,7	3,5	2,8	3,4	6,5	8	11,1	11,1	11,1	2,8
M5	11,1	11,1	8	3,6	3,5	3,4	6,6	7,9	11,1	11,1	11,1	3,4
M6	11,1	11,1	8,5	3,8	4,7	5,4	5,7	8,3	11,1	11,1	11,1	3,8
M7	11,1	11,1	9	5,3	6	5,1	5	9,3	11,1	11,1	11,1	5
M8	11,1	11,1	10	10,4	10	9,9	10,4	10	11,1	11,1	11,1	9,9
M9	11,1	11,1	10,7	10,2	10,6	10,3	10,6	10,3	11,1	11,1	11,1	10,2
M10	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
CTP Longitudinal	11,1	11,1	8	3,5	2,8	3,4	5	7,9	11,1	11,1	11,1	

Notas:

1. Espaçamento das leituras longitudinais é de 10 mm.
2. Espaçamento das leituras circunferenciais é de 10 mm.
3. Espessura mínima requerida de projeto é de 7,3 mm.

O tubo em estudo foi projetado para operar com uma espessura nominal de 11,1 mm, conforme indicado na Tabela 5, e segundo norma de projeto sua espessura mínima é de 7,3 mm, valor calculado conforme equações (36) e (37), ou seja, a espessura encontrada na inspeção a bordo é menor do que espessura mínima requerida por norma. Portanto, seguindo os procedimentos padrões, essa linha deveria parar seu serviço devido aos riscos associados a ruptura do componente, entretanto, os métodos de engenharia evidenciados neste trabalho

auxiliam na solução de casos como esse. Sendo assim, a metodologia *FFS* pode ser aplicada para verificação da espessura encontrada, aprovando ou não sua operação, de acordo com os requisitos mínimos e sem apresentar riscos para segurança.

## 4.2 METODOLOGIA

A metodologia de avaliação da integridade será desenvolvida considerando três abordagens: uso de modelos analíticos baseados em Mecânica dos Sólidos, cálculo de espessura mínima pela ASME B31.3 e nas avaliações de *Fitness-For-Service* da API 579-1.

Em primeiro lugar, deve ser feita uma avaliação do componente em questão, em termos dos dados de fabricação, material e informações pertinentes de projeto. Os dados são mostrados na Tabela 5, com o intuito de contextualizar o que foi citado no capítulo anterior. Posteriormente, deve ser analisada a anomalia encontrada no trecho da tubulação, utilizando os dados das Tabelas 6 e 7.

O método analítico será pautado na avaliação da seção crítica do equipamento pressurizado, seção essa que possui a espessura de 2,8 mm. A norma de projeto do tubo, ASME B31.3, é utilizada para encontrar a espessura mínima da estrutura para resistir à pressão de projeto e essa espessura mínima será comparada com a menor encontrada. Por fim, as análises de adequação ao uso serão feitas, evidenciando, ou não, se a estrutura com a anomalia apresentada pode operar com sua pressão de projeto.

### 4.2.1 Método Analítico

Em primeiro lugar, nesse item serão utilizados os modelos definidos nos itens 2.1.1 ao 2.1.4, os quais são empregados para calcular as tensões resultantes em diferentes pontos da tubulação. Dessa forma, os modelos consideram fatores como o material da tubulação, geometria, cargas externas e internas que fornecem estimativas precisas da tensão. Com isso, a análise desses modelos se torna essencial para garantir que a tubulação seja projetada e operada dentro de limites seguros.

Os modelos analíticos baseados em Mecânica dos Sólidos, quando aplicados a uma tubulação com espessura inferior à mínima requerida no projeto, indicam a capacidade da estrutura comprometida. Nesses casos, a utilização da tensão equivalente é importante para compreender os limites de segurança da estrutura. Além disso, com o intuito de evidenciar a

pressão máxima permitida por cada método para compará-las, será calculada qual a pressão através do método em questão. Portanto, partindo desse pressuposto, a análise pode ser iniciada por meio das hipóteses de paredes finas e grossas, considerando os carregamentos de pressão interna conforme o Capítulo 2 e utilizando os dados provenientes da Tabela 5, sendo considerada a menor espessura medida com o dano presente de 2,8 mm e um fator de segurança de 1,71, conforme a norma ASME B31.3, referente ao material de construção do tubo.

Em seguida, na hipótese de paredes finas, onde a tensão radial é desconsiderada, é possível calcular a tensão equivalente, pelo critério de falha de *von Mises*, a qual a tubulação está submetida. Para isto, a seguinte condição deve ser atendida, onde a razão entre o raio interno ( $r_i$ ) e a espessura ( $t$ ) deve ser maior do que 10.

Através do cálculo das tensões longitudinais e circunferenciais, por meio das equações (3) e (4), respectivamente, a tensão equivalente de *von Mises* é determinada, através da equação (5). A Tabela 8 representa os dados utilizados nos cálculos e os seus respectivos resultados.

**Tabela 8 - Resultados do modelo de paredes finas.**

$S_{adm}$	161	MPa
$t$	2,8	mm
$\sigma_l$	229,08	MPa
$\sigma_c$	458,17	MPa
$\sigma_{EQ}^{Tresca}$	458,17	MPa
$\sigma_{EQ}^{VM}$	396,79	MPa

Consequentemente, como foi descrito no item 2.1.1, a tensão equivalente calculada é comparada com a tensão admissível do material. Logo, conclui-se que a tensão admissível é menor do que a tensão equivalente de *von Mises* calculada, dessa maneira a tubulação é **reprovada** por meio dessa hipótese, sendo **396,79 MPa > 161 MPa**.

Posteriormente, a hipótese de paredes grossas é analisada, sendo desta vez considerada a tensão radial e seus efeitos, possibilitando calcular a tensão equivalente a qual a tubulação está submetida considerando o carregamento devido à pressão interna. Para isto, a seguinte condição deve ser atendida, onde o raio interno ( $r_i$ ) sobre a espessura ( $t$ ) deve ser menor ou igual a 10.

Em sequência, as tensões radiais, circunferenciais e longitudinais são calculadas, por meio das equações (6), (7) e (8), respectivamente, onde cabe ressaltar que, a tensão radial foi

calculada considerando o menor raio interno possível, pois é o valor que resulta na maior tensão radial. Analogia essa que também vale para a tensão circunferencial, ambas considerações sendo demonstradas no Capítulo 2. Desse modo, após as tensões serem calculadas, a tensão equivalente de *von Mises* do modelo de paredes grossas é determinada, através da equação (9). A Tabela 9 evidencia os resultados encontrados.

**Tabela 9 - Resultados do modelo de paredes grossas.**

$S_{adm}$	161	MPa
t	2,8	mm
$\sigma_r$	42,45	MPa
$\sigma_l$	197,23	MPa
$\sigma_c$	435,77	MPa
$\sigma_{EQ}^{Tresca}$	478,22	MPa
$\sigma_{EQ}^{VM}$	414,15	MPa

Como resultado, por meio do que foi descrito no item 2.1.2 deste trabalho, a tensão equivalente de *von Mises* calculada é comparada com a tensão admissível do material. Logo, conclui-se que a tensão admissível é menor do que a tensão equivalente calculada, dessa maneira a tubulação é, também, reprovada por meio dessa hipótese, sendo **414,15 MPa > 161 MPa**.

Em sequência, são calculadas as tensões devido aos carregamentos de peso próprio e de peso do fluido, para que posteriormente sejam somados aos carregamentos de pressão supracitados, caso sejam da mesma ordem de grandeza. Dessa forma, a modelagem é feita de duas maneiras, sendo viga bi apoiada e bi engastada, vistas no Capítulo 2, tendo como base os dados provenientes da Tabela 5. Em primeiro lugar, será analisado o modelo de viga bi apoiada.

Por meio das equações (12) e (17), os seguintes valores das tensões  $\sigma_x$  e  $\tau_{xy}$ , devido aos carregamentos mecânicos são obtidos, sendo esses respectivamente,  $\sigma_x = 2,57$  MPa e  $\tau_{xy} = 0,28$  MPa. Logo, após as tensões serem calculadas, a tensão equivalente de *von Mises* pode ser determinada, através da equação (19), sendo  $\sigma_{EQ}^{VM} = 2,62$  MPa, proveniente apenas dos carregamentos mecânicos de peso próprio e peso do fluido ao qual a tubulação está sujeita. A Tabela 10 evidencia as tensões encontradas para esse modelo.

**Tabela 10 - Resultados do modelo de viga bi apoiada.**

$\sigma_x$	2,57	MPa
$\tau_{xy}$	0,28	MPa
$\sigma_{EQ}^{VM}$	2,62	MPa

De modo similar, o modelo de viga bi engastada é analisado possibilitando, também, encontrar os valores das tensões  $\sigma_x$  e  $\tau_{xy}$  por meio das equações (24) e (25), respectivamente. Portanto, após as tensões serem calculadas, a tensão equivalente de *von Mises* pode ser determinada, através da equação (26), sendo  $\sigma_{EQ}^{VM} = 0,99$  MPa, proveniente apenas dos carregamentos mecânicos em que a tubulação está sujeita. A Tabela 11 representa as tensões encontradas para paredes grossas.

**Tabela 11 - Resultados do modelo de viga bi engastada.**

$\sigma_x$	0,86	MPa
$\tau_{xy}$	0,28	MPa
$\sigma_{EQ}^{VM}$	0,99	MPa

Por fim, após todas as hipóteses e modelos serem estabelecidos, pode-se determinar o modelo final a ser considerado através das maiores tensões encontradas, sendo assim, a hipótese de paredes grossas é a mais pertinente, por ter uma maior tensão equivalente e considerar as tensões ao longo da espessura do tubo, sendo um modelo mais preciso. Com isso, a Tabela 12 representa a razão dos raios internos sobre as espessuras nominal, mínima de projeto e da região do dano, evidenciando que todas as relações são menores que 10, ou seja, a hipótese mais adequada em todos os casos é a de paredes grossas, confirmando os resultados de tensões equivalentes das Tabelas 8 e 9.

**Tabela 12 - Relação do raio interno sobre espessura.**

$r_i$ (mm)	$t$ (mm)	$\frac{r_i}{t}$
19,05	11,1	1,72
22,85	7,3	3,13
27,35	2,8	9,77

Ao analisar os carregamentos mecânicos de peso próprio e peso do fluido, o modelo de viga bi apoiada é o que apresenta a maior tensão, porém, pelo valor da tensão equivalente encontrada para o modelo de viga bi apoiada ser mais de uma ordem de grandeza menor que a tensão equivalente gerada apenas pela pressão interna, para o cálculo de tensão equivalente com os carregamentos combinados se torna pouco influente, logo, pode ser desconsiderado no modelo final.

Portanto, é possível estabelecer que a tensão equivalente de *von Mises* a ser utilizada no modelo analítico é a encontrada na hipótese de paredes grossas, sendo  $\sigma_{EQ}^{VM} = 414,15$  MPa.

A Tabela 13 mostra os valores de tensão equivalente de *von Mises* encontrados para a espessura nominal, espessura mínima de projeto e a espessura encontrada com o dano presente, de acordo com a metodologia supracitada. Com isso, observa-se o aumento da tensão equivalente acompanhando o decaimento da espessura.

**Tabela 13 - Tensão Equivalente de *von Mises*.**

Espessura (mm)	$\sigma_{EQ}^{VM}$ (MPa)
11,1	122,10
7,3	172,34
2,8	414,15

Além disso, outro importante critério apresentado no Capítulo 2 é a tensão equivalente de Tresca, mostrado na equação (1), onde também é possível encontrar a tensão em questão utilizando os valores obtidos na hipótese de paredes grossas, utilizando  $\sigma_1 = \sigma_c$  e  $\sigma_3 = \sigma_r$ , encontra-se  $\sigma_{EQ}^{Tresca} = 478,22$  MPa.

De mesmo modo, a Tabela 14 mostra os valores de tensão equivalente de Tresca encontrados para a espessura nominal, espessura mínima de projeto e a espessura encontrada com o dano presente de acordo com a metodologia supracitada. Com isso, observa-se novamente o aumento da tensão equivalente acompanhando o decaimento da espessura.

Tabela 14 - Tensão Equivalente de Tresca

Espessura (mm)	$\sigma_{EQ}^{Tresca}$ (MPa)
11,1	140,98
7,3	199,01
2,8	478,22

Após os cálculos é possível concluir, conforme levantado no Capítulo 2, que o critério de Tresca é mais conservativo em sua metodologia do que o critério de *von Mises*.

A pressão máxima suportada por essa tubulação pode ser encontrada através da hipótese de paredes grossas, através da comparação da tensão admissível do material com o valor da tensão equivalente de *von Mises*. Por meio das equações (5), (6), (7) e (9), obtém-se um valor de 14,26 MPa de pressão máxima suportada por essa tubulação com as condições estabelecidas.

Entretanto, a pressão de projeto tem um valor de 42,55 MPa, logo, o **Método Analítico não permite a operação dessa tubulação, sendo 14,26 MPa < 42,55 MPa.**

A Tabela 15 mostra os valores de pressão máxima encontrados para a espessura nominal, espessura mínima de projeto e a espessura encontrada com o dano presente de acordo com a metodologia supracitada. Observa-se o decaimento da pressão máxima acompanhando o decaimento da espessura.

Tabela 15 - Pressão máxima modelo analítico.

Espessura (mm)	Pressão Máxima (MPa)
11,1	48,36
7,3	34,26
2,8	14,26

Portanto, após toda a análise reprovar a tubulação, serão utilizadas outras metodologias de avaliação da integridade da tubulação, de forma a comparar os resultados obtidos e a pressões máximas encontradas em cada avaliação.

#### 4.2.2 Normas

A utilização das normas de projeto de tubulação, como a ASME B31.3, é crucial para determinar a espessura mínima necessária em tubulações que operam sob pressão interna. Essas normas estabelecem diretrizes detalhadas para o projeto, construção, inspeção e manutenção de

sistemas de tubulação, considerando diversos fatores como material, pressão de operação, temperatura e fluido transportado. No entanto, em casos que a espessura da tubulação existente pode estar abaixo dos requisitos estabelecidos pelas normas, é essencial realizar uma análise para garantir a integridade estrutural do sistema. Este processo pode envolver a utilização de métodos como o API 579-1, que oferece diretrizes específicas para avaliação de integridade estrutural, permitindo determinar a espessura mínima necessária para garantir a segurança da tubulação. Integrar as normas de projeto, como a ASME B31.3, com análises detalhadas conforme o API 579-1 é fundamental para garantir a operação segura e confiável dos sistemas de tubulação.

O reconhecimento internacional da indústria evidencia a importância e relevância desses padrões, que desempenham um papel fundamental na garantia da integridade estrutural de tubulações em todo o mundo, proporcionando um ambiente de operação seguro e confiável para uma ampla gama de processos industriais. Além disso, essas normas passam por revisões e atualizações contínuas, com base em avanços tecnológicos e aprendizados adquiridos com a experiência prática, tal evolução tem contribuído para a validação e eficácia destes métodos.

#### 4.2.2.1 Cálculo de Espessura Mínima ASME B31.3

No projeto de tubulação presente no Capítulo 2 deste trabalho, a equação (36) é definida para calcular a espessura mínima requerida de parede do tubo, sendo determinada para suportar o carregamento equivalente devido à pressão interna, a qual está submetido. Para isso, alguns valores são necessários serem encontrados, o coeficiente de redução ( $Y$ ), calculado conforme equação (35), o fator de qualidade ( $E$ ) e a eficiência de solda ( $W$ ), que são iguais a 1, porque o tubo foi fabricado sem costura. Dessa forma, aplicando a equação supracitada com os dados fornecidos pela Tabela 5 encontra-se a espessura  $t = 7,22 \text{ mm}$ . A Tabela 16 apresenta as premissas utilizadas no cálculo de espessura mínima e o resultado encontrado.

Tabela 16 - Espessura mínima segundo ASME B31.3

$S_{adm}$	161	MPa
$p$	42,55	MPa
D	60,3	mm
Y	0,39	-
E	1	-
W	1	-
$t$	7,22	mm

Portanto, o cálculo via ASME B31.3 torna válida a espessura mínima de projeto de 7,3 mm, presente na Tabela 5, a qual foi fornecida pelo projetista da tubulação. Com isso, é possível calcular a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (*PMTA*), através da equação (40), a qual a tubulação suporta, considerando a espessura mínima requerida de projeto.

Para projeto da tubulação foi utilizada a espessura de  $t = 7,3 \text{ mm}$ , com esse arredondamento da espessura a pressão máxima que a tubulação resiste é de 43,05 MPa. Ademais, para fins de comparação, a Tabela 17 evidencia as pressões máximas para a espessura nominal, espessura mínima de projeto e a espessura encontrada com o dano presente. Com isso, novamente observa-se o decaimento da *PMTA* de acordo com a queda da espessura.

Tabela 17 - Pressão Máxima de Trabalho Admissível ASME B31.3.

Espessura (mm)	<i>PMTA</i> (MPa)
11,1	69,58
7,3	43,05
2,8	15,51

Por fim, como o valor da pressão máxima calculada para a espessura presente no dano é menor do que a pressão de projeto de 42,55 MPa, de forma que **essa avaliação também reprova a tubulação**, confirmando as premissas adotadas em projeto. Sendo assim, novamente serão utilizadas outras metodologias de avaliação da integridade da tubulação.

#### 4.2.2.2 FFS Nível 1

Após as análises anteriores, com o modelo analítico e o cálculo de espessura mínima de projeto reprovando a operação da tubulação danificada, torna-se necessária a utilização do método de adequação ao uso, o objetivo de estudo deste trabalho.

Com isso, para a utilização deste método definido por meio da norma API 579-1, é necessária a inspeção detalhada do dano, informando os dados de medições de espessura, comprimentos longitudinais e circunferenciais do dano, distância a descontinuidade geométrica mais próxima, taxas de corrosão na região do dano e próximo ao mesmo, além dos dados de projeto do equipamento. Os dados em questão são disponibilizados na Tabela 5 e 6, a partir daí podem ser utilizadas todas as definições e equacionamentos considerados no Capítulo 3.

Em primeiro lugar, é necessário seguir os passos de acordo com a norma, começando pela definição do *CTP*. O caso estudado é definido como LTA, traduzido como área de afinamento localizado, pois as dimensões longitudinais e circunferenciais do dano possuem a mesma ordem de grandeza.

Logo após, o valor da espessura de parede a ser utilizada ( $t_c$ ) na avaliação é calculado, de forma a considerar a perda de espessura uniforme da tubulação como um todo. Para obtenção desses dados é necessária a realização de medições de espessura em regiões fora do dano, fato que proporciona um panorama geral da estrutura.

Analisando a malha da Tabela 7, é perceptível que as colunas C1 e C10 e as linhas M1 e M10 apresentam espessura de 11,1 mm, ou seja, fora da região de anomalia não houve perda de espessura uniforme ao longo dos anos de operação do componente, esse fato possibilita a utilização do *LOSS* igual a zero.

Também é avaliada a abordagem de corrosão futura uniforme da tubulação (*FCA*), este valor considera o quanto de espessura será perdida no componente uniformemente dentro de um intervalo de tempo de operação do componente, ou seja, ao utilizá-lo é possível a avaliação futura do tubo, para isso é necessário conhecer a taxa de corrosão atuante, através de dados de processo e histórico de inspeções. Essa taxa é calculada acompanhando a espessura remanescente e a evolução da corrosão, externa ou interna, sendo assim, quando o componente possui um histórico de inspeções, é a taxa de corrosão é estipulada de forma mais precisa.

Caso o equipamento não possua histórico de monitoramento, o *FCA* não é preciso e desta maneira a análise futura do componente é limitada, nesses casos é possível utilizar o valor

do  $FCA$  de acordo com o adotado no projeto da tubulação, ou seja, o  $FCA = CA$  (sobre-espessura de corrosão).

No estudo de caso deste trabalho, o  $FCA$  será adotado como igual a zero, devido à falta de conhecimento da taxa de corrosão, desta maneira será feita avaliação atual da estrutura para descobrir se com as espessuras encontradas no relatório de inspeção o  $FFS$  nível 1 aprovará ou não a operação com pressão de projeto. Se a avaliação de nível 1 aprovar a estrutura com  $P_{FFS\ 1} > P_{projeto}$ , a abordagem adotada será utilizar o  $FCA$  e, posteriormente, o  $FCA_{ml}$  para determinar a espessura mínima para aprovação do componente. Esse método nos permite definir um limite de perda de material.

Com base nesses dados, é possível realizar um estudo de vida útil e elaborado um cronograma de inspeções, considerando a quantidade de material que a tubulação pode perder ao longo do tempo. Caso a estrutura seja reprovada ou aprovada com  $P_{FFS\ 1} \leq P_{projeto}$ , a tubulação se encontra na espessura mínima para operação, portanto não é possível o estudo de vida útil.

Feita a análise de espessura residual, esta premissa foi adotada como sendo  $t_c = 11,11$  mm, ou seja, o mesmo valor da espessura nominal, adotando a análise de forma atual, visto que os dados de histórico de monitoramento e as taxas de corrosão não são conhecidos.

Seguindo o procedimento, o valor da espessura mínima ( $t_{mm}$ ) na LTA é determinado, juntamente com as dimensões  $s$  e  $c$ , dados esses obtidos a partir do  $CTP$ . As primeiras premissas utilizadas nos cálculos de nível 1 são disponibilizadas na Tabela 18 abaixo.

**Tabela 18 - Premissas do nível 1.**

$LOSS$	0	mm
$FCA$	0	mm
$t_c$	11,1	mm
$s$	70	mm
$c$	90	mm

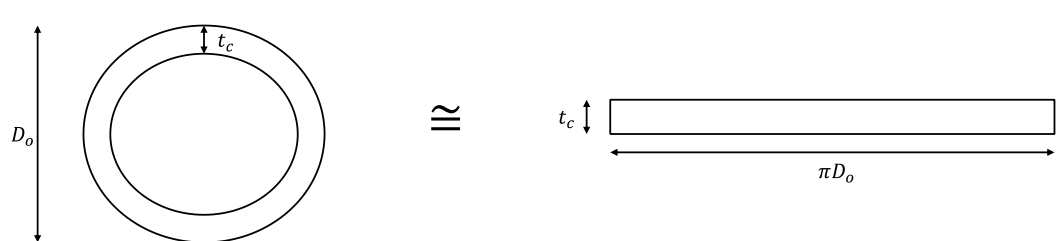
Seguidamente, a próxima avaliação se refere a razão de espessura remanescente ( $R_t$ ) segundo a avaliação de nível 1. Esse parâmetro é o definidor da resistência remanescente do componente, representando a porcentagem de integridade do mesmo, onde as premissas utilizadas são a menor espessura encontrada ( $t_{mm}$ ), a espessura calculada ( $t_c$ ) e a corrosão futura uniforme definida na região do dano ( $FCA_{ml}$ ), conforme representado na equação (44).

É importante ressaltar que o  $FCA_{ml}$  também é obtido através da taxa de corrosão, porém essa difere por ser medida apenas na região do dano.

Para casos de dano por corrosão externa, o processo corrosivo no dano pode ser mitigado através da aplicação de produtos de preservação e pintura da região. Nessa parte da avaliação, o  $FCA_{ml}$  também será adotado como zero, seguindo a mesma lógica do  $FCA$ .

Caso o valor de  $R_t$  represente uma porcentagem maior ou igual a 90%, a estrutura está aprovada, caso seja menor que 20% a utilização da avaliação de nível 1 é proibida, por fim, o valor entre 0,20 e 0,90 requer a utilização do gráfico representado na Figura 35. Esse método nos permite avaliar a profundidade do dano, e se ela é relevante para resistência, comparando-a com a espessura crítica.

O próximo parâmetro utilizado é o de comprimento longitudinal ( $\lambda$ ), o qual é definido na equação (47). Conforme citado em seu nome, essa propriedade caracteriza o comportamento da perda de espessura de acordo com o seu comprimento ( $s$ ). Analisando essa razão, é perceptível que o  $\lambda$  é adimensional, onde ele é utilizado na avaliação da porcentagem de área comprometida de seção transversal. Isto é possível porque, considerando a tubulação de paredes finas, é possível aproximar a área da seção como a área de um retângulo, conforme equação (56). A Figura 38 abaixo mostra essa aproximação.

$$\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} \cong \pi D_o t_c \quad (58)$$


**Figura 38 - Aproximação de área da seção. Fonte: Próprio autor.**

O cálculo do  $\lambda$  representa a avaliação do comportamento da anomalia de acordo com a área das seções críticas, onde quanto maior o comprimento do dano maior a área comprometida do componente, por conseguinte quanto maior a área de seção menor a porcentagem de área comprometida. No contexto deste trabalho, onde busca-se sempre a integridade da estrutura, quanto menor o valor de  $\lambda$  mais íntegro está o equipamento. Para a estrutura em estudo, a premissa de corrosão futura, e os valores de  $R_t$  e  $\lambda$ , estão descritos na Tabela 19.

**Tabela 19 - Valores de  $FCA_{ml}$ ,  $R_t$  e  $\lambda$ .**

$FCA_{ml}$	0	mm
$R_t$	0,25	-
$\lambda$	4,4	-

Prosseguindo a avaliação, agora é feita a verificação dos fatores limitantes do método utilizado no nível 1, o que requer que as equações do passo 5 sejam respeitadas. A primeira verificação é a respeito do  $R_t$ , onde é feita a limitação máxima de vinte por cento de espessura da estrutura, de maneira que não comprometa a resistência mecânica. A segunda verificação é a respeito da taxa de corrosão futura, onde independente do diâmetro do tubo é feita a limitação de 1,3 mm para a espessura mínima, evitando o componente de chegar ao seu limite estrutural. Por último, é feita verificação da distância a descontinuidade mais próxima do dano, onde é importante o dano não ser próximo a uma geometria complexa, porque o cálculo de nível 1 é baseado em modelos analíticos e nos equacionamentos de tubulação de paredes finas, conforme mostrado no Capítulo 2, de forma que o modelo é feito com base em geometrias cilíndricas e simples. Sendo assim, caso a geometria se torne complexa não é permitida a utilização das avaliações baseadas nesse método analítico. A validação do caso em estudo é feita através da Tabela 20.

**Tabela 20 - Validação do nível 1.**

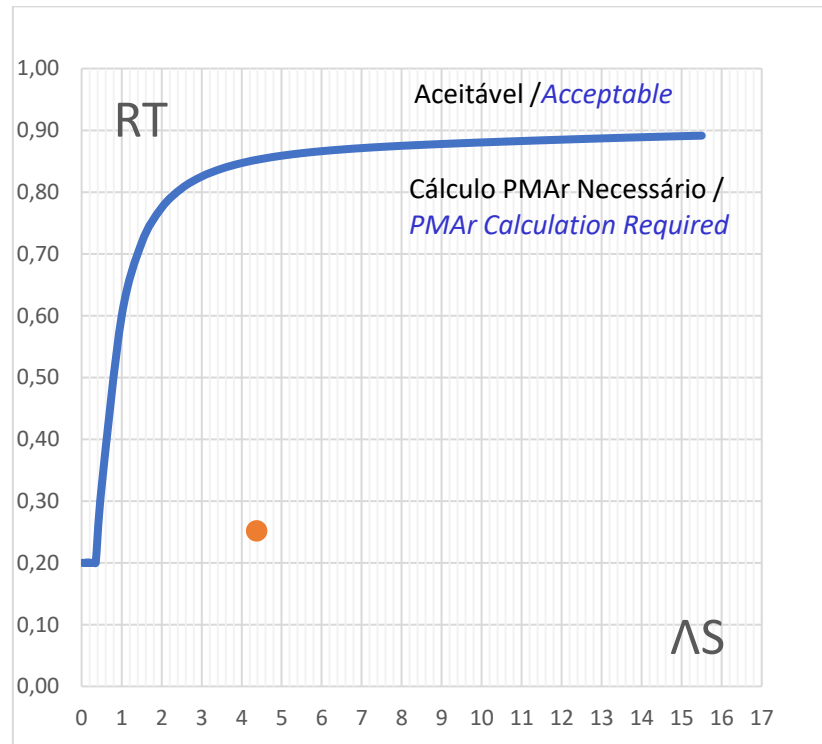
$R_t > 0,20$	$0,25 > 0,20$	Válido
$t_{mm} - FCA_{ml} > 1,3$	$2,80 \text{ mm} > 1,3 \text{ mm}$	Válido
$L_{msd} \geq 1,8 \sqrt{D \times t_c}$	$100 \text{ mm} \geq 46,6 \text{ mm}$	Válido

No próximo passo da avaliação, é feito o cálculo da *PMTA*, de acordo com a espessura de parede encontrada  $t_c$ , essa etapa é importante para definir o limite de pressão do componente em seu estado íntegro, sem considerar a anomalia em estudo, a partir daí ao finalizar o estudo, deve-se comparar a pressão limite da estrutura danificada com a *PMTA* inicial, caso seja necessário haverá uma redução da pressão máxima do equipamento. A equação (40) é novamente utilizada para o cálculo da pressão máxima de trabalho admissível, e o valor encontrado para a estrutura em estudo está listado na Tabela 21.

**Tabela 21 - *PMTA* calculada para *FFS* 1.**

<i>PMTA</i>	69,58	MPa
-------------	-------	-----

Tendo em mãos o valor da  $PMTA$ , é seguida a metodologia  $FFS$ , ao avaliar o gráfico da Figura 35, retornando a avaliar os parâmetros  $R_t$  e  $\lambda$ , onde o ponto traçado por essas variáveis deve estar acima da curva do gráfico, a qual é definida em função do  $RSF=0,90$ . Ao analisar a Figura 39, a qual mostra o ponto definido pelos dois parâmetros citados, percebe-se que a intersecção se encontra abaixo da curva do gráfico, fato que torna necessária uma reavaliação da resistência estrutural do componente, determinando o  $RSF$ .



**Figura 39 – Interseção dos valores de  $\lambda$  e  $R_t$ . Fonte: Próprio autor.**

Para calcular o  $RSF$  é utilizada a equação (49), parâmetro esse que varia de 0 a 1, representando a resistência estrutural do componente, onde é feita a comparação da resistência admissível e a atual da estrutura danificada. O  $RFS_a$  é igual a 90% da resistência total da estrutura, conforme definido na API 579-1, e este valor é considerado conservador. Ao avaliar a Figura 39, o  $RSF$  da tubulação tem de ser maior ou igual a 0,90, para manter a resistência estrutural. Caso isso não ocorra, é necessário reduzir a  $PMTA$  do tubo.

Para o cálculo da resistência remanescente do tubo, primeiro é encontrado o fator de Folias ( $M_t$ ), que varia de acordo com o  $\lambda$ . O parâmetro  $M_t$  é usado para representar a influência da deformação na região do defeito nas tensões circunferenciais, através de um polinômio do décimo grau em função de  $\lambda$ , conforme representado na equação (50). É importante ressaltar que, nas versões mais atuais da norma o valor do fator de Folias é tabelado, conforme Tabela 3.

O valor do fator de Folias e os fatores de resistência são apresentados na Tabela 22, de forma que é possível constatar a reprovação da utilização da *PMTA* atual de 69,58 MPa, porque  $RSF < RSF_a$ .

**Tabela 22 – Valores de  $M_t$ ,  $RSF$  e  $RSF_a$ .**

$M_t$	2,78
$RSF$	0,34
$RSF_a$	0,90

Uma nova pressão máxima admissível é determinada através da equação (51), de maneira a calcular a  $PMTA_r$  em função dos parâmetros  $RSF$ ,  $RSF_a$  e da própria  $PMTA$  do componente saudável. A fração de resistências, juntamente com a nova  $PMTA_r$  estão listadas na Tabela 23.

**Tabela 23 - Pressão máxima admissível reduzida.**

$\frac{RSF}{RSF_a}$	0,377	-
$PMTA_r$	26,64	MPa

Finalizando a metodologia dessa avaliação, é feita a verificação do parâmetro longitudinal, através do passo 9, onde a condição  $c \leq 2s \left(\frac{E_l}{E_c}\right)$ , deve ser respeitada. A Tabela 24, define os parâmetros  $c$ ,  $s$ ,  $E_l$  e  $E_c$ , evidenciando que a condição supracitada é respeitada.

**Tabela 24 - Verificação do passo 9 do nível 1.**

$c$	90	mm
$s$	70	mm
$E_l$	1	-
$E_c$	1	-
$c \leq 2s \left(\frac{E_l}{E_c}\right)$	$90 \leq 140$	Válido

Sendo assim, a avaliação de adequação ao uso de nível 1 demanda que a pressão máxima a qual o tubo pode ser submetido seja de **26,64 MPa**. Considerando que o fluido de processo

que a linha transporta tem de trabalhar na pressão de projeto, **esta avaliação reprova a estrutura para operar com pressão de projeto.**

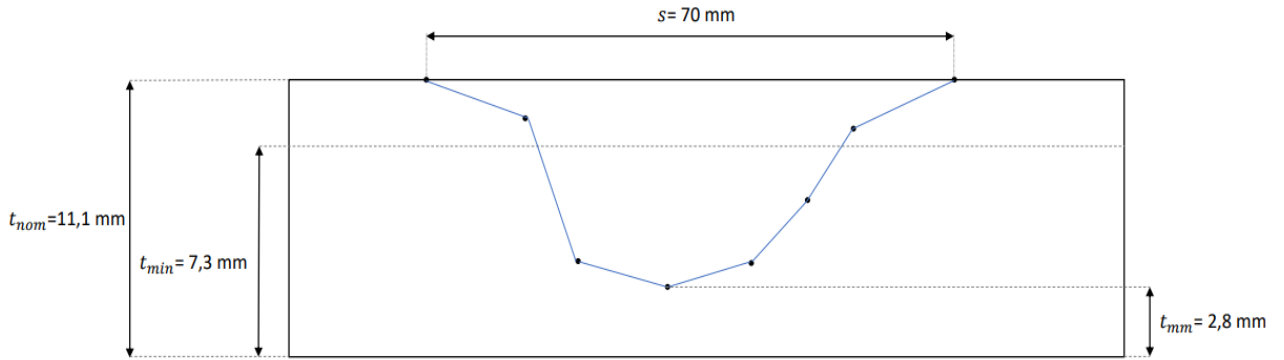
Caso a avaliação de nível 1 fosse a avaliação final, outras estratégias como a redução da pressão, aplicação de um reparo, ou a substituição do trecho devem ser adotadas de forma imediata. Nesse trabalho será realizada a análise de nível 2 para avaliar o componente, sendo esta a última metodologia a ser abordada, conforme item 3.2.1.6.

#### 4.2.2.3 FFS Nível 2

Após a reprovação da metodologia de *Fitness-For-Service* de nível 1, é feita a escolha de prosseguir para avaliação de nível 2, onde esse nível da avaliação depende do caso em estudo, dos recursos disponíveis, do tempo disponível para avaliação, da acessibilidade do componente para reparo ou substituição, de todos dados de inspeção requisitados estarem disponíveis e, por fim, do conhecimento do engenheiro que conduz a avaliação.

O caso abordado nesse trabalho apresenta, até o momento, a melhor solução como a redução de pressão máxima de operação para a linha continuar a operar. Ao analisar a pressão máxima determinada pelo nível 1, observa-se que o componente pode sofrer uma redução para 62% de sua capacidade de projeto, devido ao dano. Casos como esse, possuindo a malha conforme Tabela 7, é possível recorrer ao próximo nível da norma, pois existe a possibilidade de aprovação da estrutura, de maneira que o *RSF* recalculado no nível 2 pode aumentar, devido a consideração do perfil de espessura *CTP*. Para a pressão de 42,55 MPa ser mantida, um aumento de 62% da resistência remanescente é necessário.

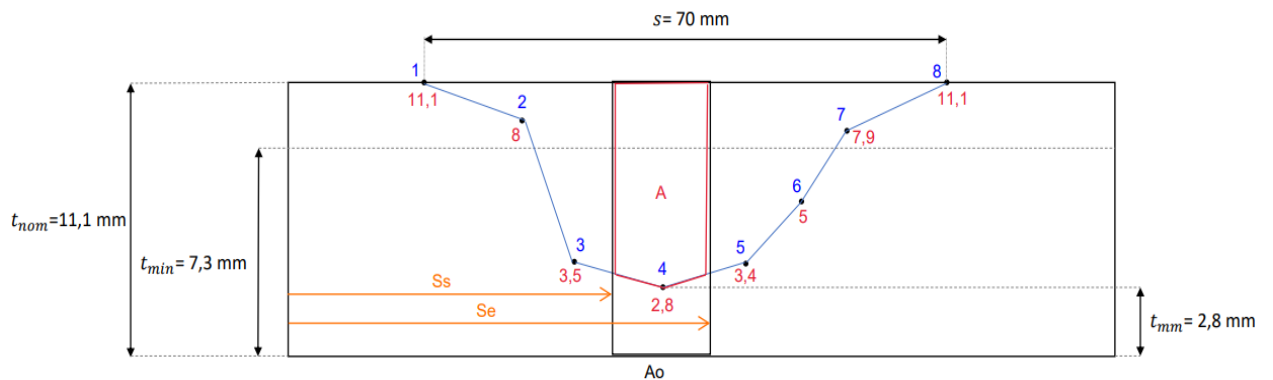
Avaliando o *CTP* longitudinal, representado na Figura 40, observa-se que o perfil de espessura não é uniforme, de forma que as espessuras medidas ao lado de  $t_{mm}$  aumentam gradativamente. A equação (57) evidencia que o *RSF* recalculado depende da razão de áreas das subseções do *CTP* representando análises localizadas da anomalia, conforme Figura 36, ou seja, quanto menor a região de perda de metal, maior se torna a resistência remanescente da estrutura. Devido a esses fatos, justifica-se a análise de nível 2.



**Figura 40 - CTP longitudinal do dano em estudo. Fonte: Próprio autor.**

A análise de nível 2 segue o mesmo viés que o primeiro nível, onde os passos de 1 a 5 de ambos é igual, é importante ressaltar que as limitações desses dois níveis é a mesma, ou seja, o nível 2 também possui equacionamentos baseados em modelos analíticos. Desta forma, os dados das Tabelas 18 a 21 podem ser utilizados nessa fase do estudo.

A mudança surge a partir da utilização dos dados provenientes do CTP da Figura 40, onde é iniciada a análise a partir do elo mais fraco da região de perda de espessura, isto é, o próprio  $t_{mm}$ , representado pelo ponto 4 no CTP. Utilizando inicialmente esse ponto como referência, é selecionada uma subseção a partir do 2,8 mm, onde o ponto 4 é centralizado. A Figura 41 representa a subseção definida.



**Figura 41 - Subseção definida ao redor do ponto inicial. Fonte: Próprio autor.**

Para o cálculo da resistência remanescente desse trecho do dano, são utilizadas as áreas  $A_o$  e  $A$ , delimitadas respectivamente em preto e vermelho, e as distâncias  $s_s$  e  $s_e$ , destacadas em laranja. Essa subseção é apenas a primeira a ser analisada, portanto os parâmetros serão calculados para cada subseção, conforme Figura 41. O  $A_o$  é definido na equação (57), já o valor de  $A$  é encontrado ao somar a área dos trapézios, os quais unidos formam o polígono em

vermelho. O  $s_s$  e o  $s_e$  são os comprimentos medidos a partir do ponto 1 do *CTP*. Os valores desses parâmetros são encontrados na Tabela 25.

**Tabela 25 - Parâmetros da primeira subseção, definida ao redor do ponto 4.**

$s_s^1$	25	<i>mm</i>
$s_e^1$	35	<i>mm</i>
$A_0^1$	111,00	$mm^2$
$A_1$	81,37	$mm^2$

Conforme passo a passo definido no Capítulo 3 desse trabalho, agora é necessário calcular esses parâmetros para as outras subseções, sempre expandindo as áreas  $A_o$  e  $A$  de modo a preencher toda a região da anomalia em estudo. Ao expandirmos as áreas, são encontrados os dados da Tabela 26.

**Tabela 26 - Parâmetros de todas as subseções, definidas ao redor do ponto 4.**

<b>Dados para avaliação do ponto 4 - Espessura 2,8</b>						
	t	ss	se	s	Ao	A
1	2,8	25	35	10	111,00	81,375
2	2,8	20	40	20	222,00	159,5
3	2,8	15	45	30	333,00	228,38
4	2,8	10	50	40	444,00	282
5	2,8	5	55	50	555,00	320,50
6	2,8	0	60	60	666,00	344
7	2,8	0	65	65	721,50	356
8	2,8	0	70	70	777,00	360

Na Tabela 26, é determinado o valor de  $s$ , onde este é definido por meio da subtração de  $s_e$  por  $s_s$ , conforme equação (58). Esse valor é o comprimento das seções 1 a 8 em análise, e deve ser definido de acordo com o engenheiro responsável pelo estudo de *FFS*. O comprimento da seção pode ser tão pequeno quanto se queira, porém, ao definir essa dimensão, o engenheiro deve selecionar o grau de refinamento da análise, pois, embora seja possível subdividir infinitesimalmente a seção, existe um limite para os resultados de *RSF*, onde, ao

alcançar esse limite, a redução da seção não afetará o valor de resistência. Para o dano em estudo, foi definido o comprimento  $s = 10 \text{ mm}$ , onde esse valor se mostrou satisfatório para o cálculo de resistência remanescente.

$$s = s_e - s_s \quad (58)$$

Ao prosseguir a avaliação, é necessário encontrar os parâmetros  $\lambda$ ,  $M_t$  e o  $RSF$ , onde esse último representa o nosso maior interesse. O  $\lambda$  é novamente calculado através da equação (47), onde a diferença no segundo nível da análise é a utilização de um parâmetro de comprimento longitudinal para cada seção, sendo esses  $\lambda_1$  a  $\lambda_6$ ; já o Fator de Folias ( $M_t$ ) é calculado através da equação (50), seguindo a mesma premissa de ser calculado para cada subseção de 1 a 6. A variável de interesse da análise, o  $RSF$ , também é calculado para as seções, utilizando a equação (57). A Tabela 27 apresenta os valores calculados dessas variáveis.

**Tabela 27 – Cálculo do  $RSF$  para todas as subseções definidas a partir do ponto 4.**

Dados para avaliação do ponto 4 - Espessura 2,8									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	2,7	25	35	10	111,00	81,375	0,6249	1,0851	0,8228
2	2,7	20	40	20	222,00	159,5	1,2497	1,2921	0,6342
3	2,7	15	45	30	333,00	228,38	1,8746	1,5602	0,5606
4	2,7	10	50	40	444,00	282	2,4994	1,8565	0,5546
5	2,7	5	55	50	555,00	320,50	3,1243	2,1644	0,5763
6	2,7	0	60	60	666,00	344	3,7491	2,4753	0,6110
7	2,7	0	65	65	721,50	356	4,0616	2,6305	0,6235
8	2,7	0	70	70	777,00	360	4,3740	2,7848	0,6438

Ao analisar os fatores de resistência remanescente  $RFS_1$  a  $RFS_8$ , verifica-se que o menor dentre esses é o  $RFS_4$ , pertencente a linha 4. De acordo com o passo 8 dessa avaliação, o procedimento deve ser repetido iniciando a divisão de subseções a partir de cada ponto do *CTP*. Esse procedimento visa definir qual será o menor fator de resistência dentre todas as calculadas

dentre os oito pontos em estudo. As Tabelas de 28 a 32 representam os *RSF* calculados para os pontos 5, 3, 6, 7 e 2 respectivamente.

**Tabela 28 - Cálculo do *RSF* para todas as subseções definidas a partir do ponto 5.**

Dados para avaliação do ponto 5 - Espessura 3,4									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	3,4	35	45	10	111,00	75,875	0,62485	1,0851	0,85513
2	3,4	30	50	20	222,00	149,5	1,24971	1,2921	0,68206
3	3,4	25	55	30	333,00	217,38	1,87456	1,5602	0,59701
4	3,4	20	60	40	444,00	276	2,49942	1,8565	0,56885
5	3,4	15	65	50	555,00	320,38	3,12427	2,1644	0,5765
6	3,4	10	70	60	666,00	345,5	3,74913	2,4753	0,60883
7	3,4	5	70	65	721,50	357,125	4,06156	2,6305	0,62208
8	3,4	0	70	70	777,00	361	4,37398	2,7848	0,6426

**Tabela 29 - Cálculo do *RSF* para todas as subseções definidas a partir do ponto 3.**

Dados para avaliação do ponto 3 - Espessura 3,5									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	3,5	15	25	10	111,00	71,375	0,62485	1,0851	0,87622
2	3,5	10	30	20	222,00	133,5	1,24971	1,2921	0,74571
3	3,5	5	35	30	333,00	186,25	1,87456	1,5602	0,68696
4	3,5	0	40	40	444,00	229,5	2,49942	1,8565	0,66951
5	3,5	0	45	45	499,50	266,00	2,81185	2,0097	0,636
6	3,5	0	50	50	555,00	298,5	3,12427	2,1644	0,61498
7	3,5	0	55	55	610,50	325,375	3,4367	2,3198	0,60634
8	3,5	0	60	60	666,00	345	3,74913	2,4753	0,60954
9	3,5	0	65	65	721,50	357	4,06156	2,6305	0,62225
10	3,5	0	70	70	777,00	361	4,37398	2,7848	0,6426

Tabela 30 - Cálculo do RSF para todas as subseções definidas a partir do ponto 6.

Dados para avaliação do ponto 6 - Espessura 5 mm									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	5	45	55	10	111,00	59,375	0,62485	1,0851	0,91727
2	5	40	60	20	222,00	115,5	1,24971	1,2921	0,80311
3	5	35	65	30	333,00	166,875	1,87456	1,5602	0,73494
4	5	30	70	40	444,00	212	2,49942	1,8565	0,70344
5	5	25	70	45	499,50	253	2,81185	2,0097	0,65978
6	5	20	70	50	555,00	292	3,12427	2,1644	0,62606
7	5	15	70	55	610,50	324,375	3,4367	2,3198	0,60791
8	5	10	70	60	666,00	345,5	3,74913	2,4753	0,60883
9	5	5	70	65	721,50	357,125	4,06156	2,6305	0,62208
10	5	0	70	70	777,00	361	4,37398	2,7848	0,6426

Tabela 31 - Cálculo do RSF para todas as subseções definidas a partir do ponto 7.

Dados para avaliação do ponto7 - Espessura 7,9 mm									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	7,9	55	65	10	111,00	31,625	0,62485	1,0851	0,9697
2	7,9	50	70	20	222,00	62,5	1,24971	1,2921	0,91863
3	7,9	45	70	25	277,50	95,00	1,56214	1,4210	0,86638
4	7,9	40	70	30	333,00	131,5	1,87456	1,5602	0,81017
5	7,9	35	70	35	388,50	170,875	2,18699	1,7061	0,75474
6	7,9	30	70	40	444,00	212,00	2,49942	1,8565	0,70344
7	7,9	25	70	45	499,50	253	2,81185	2,0097	0,65978
8	7,9	20	70	50	555,00	292	3,12427	2,1644	0,62606
9	7,9	15	70	55	610,50	324,38	3,4367	2,3198	0,60791
10	7,9	10	70	60	666,00	345,5	3,74913	2,4753	0,60883
10	7,9	5	70	65	721,50	357,125	4,06156	2,6305	0,62208
10	7,9	0	70	70	777,00	361	4,37398	2,7848	0,6426

Tabela 32 - Cálculo do RSF para todas as subseções definidas a partir do ponto 2.

Dados para avaliação do ponto 2 - Espessura 8 mm									
	t	ss	se	s	Ao	A	$\lambda$	Mt	RSF
1	8	5	15	10	111,00	32,75	0,49669	1,0551	0,97862
2	8	0	20	20	222,00	69	0,99337	1,1971	0,93088
3	8	0	25	25	277,50	108,00	1,24172	1,2890	0,87502
4	8	0	30	30	333,00	149	1,49006	1,3902	0,81479
5	8	0	35	35	388,50	190,125	1,73841	1,4985	0,75824
6	8	0	40	40	444,00	229,50	1,98675	1,6119	0,71115
7	8	0	45	45	499,50	266	2,23509	1,7290	0,67552
8	8	0	50	50	555,00	298,5	2,48344	1,8488	0,65178
9	8	0	55	55	610,50	325,38	2,73178	1,9702	0,64022
10	8	0	60	60	666,00	345	2,98012	2,0929	0,64052
10	8	0	65	65	721,50	357	3,22847	2,2162	0,65041
10	8	0	70	70	777,00	361	3,47681	2,3398	0,66804

Sendo assim, tendo em mãos todos os menores valores de  $RSF$  é possível compará-los, de acordo com o passo 8 do Capítulo 3 desse trabalho, onde devemos escolher o menor de todos. Ao juntar todos os fatores de resistência na Tabela 33, é escolhido o valor de 0,5546 referente ao ponto inicial da análise, o ponto 4.

**Tabela 33- Escolha de  $RSF$  mínimo do dano, destacado em vermelho.**

$RSF_{ponto\ 4}$	0,5546
$RSF_{ponto\ 5}$	0,5688
$RSF_{ponto\ 3}$	0,6063
$RSF_{ponto\ 6}$	0,6079
$RSF_{ponto\ 7}$	0,6079
$RSF_{ponto\ 2}$	0,6402

Este valor refere-se à subseção centralizada no ponto mais crítico do dano, sendo este o de espessura 2,8 mm, o fato desse ponto concentrar a menor fração da resistência faz sentido, pois esse é o que mais compromete o componente. Nota-se também que, a subseção 4 do ponto 4 foi a com o menor  $RSF$ , a explicação desse fato é devido a distribuição dos pontos e a razão das áreas; ambos os fatores determinantes na equação (57) do  $RSF$ , além da distribuição dos pontos no  $CTP$  da Figura 40 a qual evidencia que as regiões com espessura maior possuem a menor área  $A^i$ , fato que aumenta o  $RSF$ .

Finalizando a avaliação de nível 2, é feito o cálculo da nova  $PMTA$  reduzida da estrutura, através da equação (51), da mesma maneira do nível 1. Realizado novamente, cálculo da nova fração de resistências é verificado agora um aumento na pressão máxima do componente, de 26,64 para 42,83 MPa. A Tabela 34 representa a  $PMTA_r$  e a fração de resistências remanescente.

**Tabela 34 - Nova  $PMTA$  reduzida a partir do nível 2.**

$\frac{RSF}{RFS_a}$	0,616	-
$PMTA_r$	42,83	MPa

A partir dos resultados obtidos, o trecho da tubulação danificada em estudo está **aprovado** para operar na pressão a qual ele foi projetado, porque **42,83 MPa > 42,55 MPa**, ou

seja, a avaliação de nível 2 mostra-se adequada e contém uma avaliação rigorosa que permite a operação mantendo a pressão de projeto.

Ademais, é notório que a estrutura danificada em estudo está no seu limite, onde a  $PMTA_r$  é bem próxima a pressão de projeto. Nesse caso, conforme mencionado no item 4.2.2.2, não é possível uma análise de vida residual do componente, tendo em vista que qualquer perda de espessura na região do dano acarretaria a reprovação da estrutura para operar com 42,55 MPa. Desta forma, recomenda-se o monitoramento desse dano em curtos intervalos de tempo, porque o dano não pode apresentar mais perda de material devido a corrosão atmosférica. Caso ao longo do tempo o dano não apresente taxa de corrosão atuante, o componente pode operar com a pressão de projeto, caso exista taxa de corrosão atuante no trecho em estudo, é necessário um planejamento para substituição ou reparo da tubulação no momento mais oportuno.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são abordados os resultados provenientes das análises desenvolvidas nos Capítulos 3 e 4, referentes, respectivamente, à Norma de Adequação ao Uso e à Análise da Integridade Estrutural.

### 5.1 COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS

O item Projeto de Tubulações, 2.1, que se trata do cálculo da tensão equivalente em um tubo de paredes finas e de paredes grossas, apresenta a metodologia que retorna o valor da tensão equivalente por meio da relação com os carregamentos simultâneos que ocorrem no tubo, por meio dos critérios de Tresca e von Mises. Sendo assim, após a obtenção dos resultados, é possível avaliar a diferença das metodologias e como um critério é mais conservador do que o outro.

O item Metodologia, 4.2, calcula a pressão máxima permitida em cada método de estudo deste trabalho. Desse modo, pode-se observar que cada método, de acordo com suas particularidades ou limitações, determina um valor para que seja possível compará-los e verificar o critério de aceitação para uma tubulação com defeito de corrosão no caso analisado.

### 5.2 RESULTADOS ALCANÇADOS

Por meio do critério de falha *von Mises* e de Tresca, utilizando-se dos dados provenientes das tabelas apresentadas no Capítulo 4 (Tabela 8 e 9, para paredes finas e grossas, respectivamente), obtém-se os valores das tensões equivalentes para os dois critérios de falha.

Uma análise gráfica é desenvolvida para entender os efeitos de cada método comparativamente e como cada um se comporta em relação ao estudo de caso. A Figura 42 apresenta a tensão equivalente de *von Mises* de acordo com a espessura nominal, a espessura mínima de projeto e a espessura medida na tubulação e, também, exibe a tensão admissível do material. Dessa forma, é possível observar a região onde a tubulação é aprovada de acordo com o critério de *von Mises*. De mesmo modo, a Figura 43 apresenta a tensão equivalente de Tresca de acordo com a espessura nominal, a espessura mínima de projeto e a espessura medida na

tubulação e, também, exibe a tensão admissível do material. Novamente, é possível observar a região onde a tubulação é aprovada de acordo com o critério de Tresca.

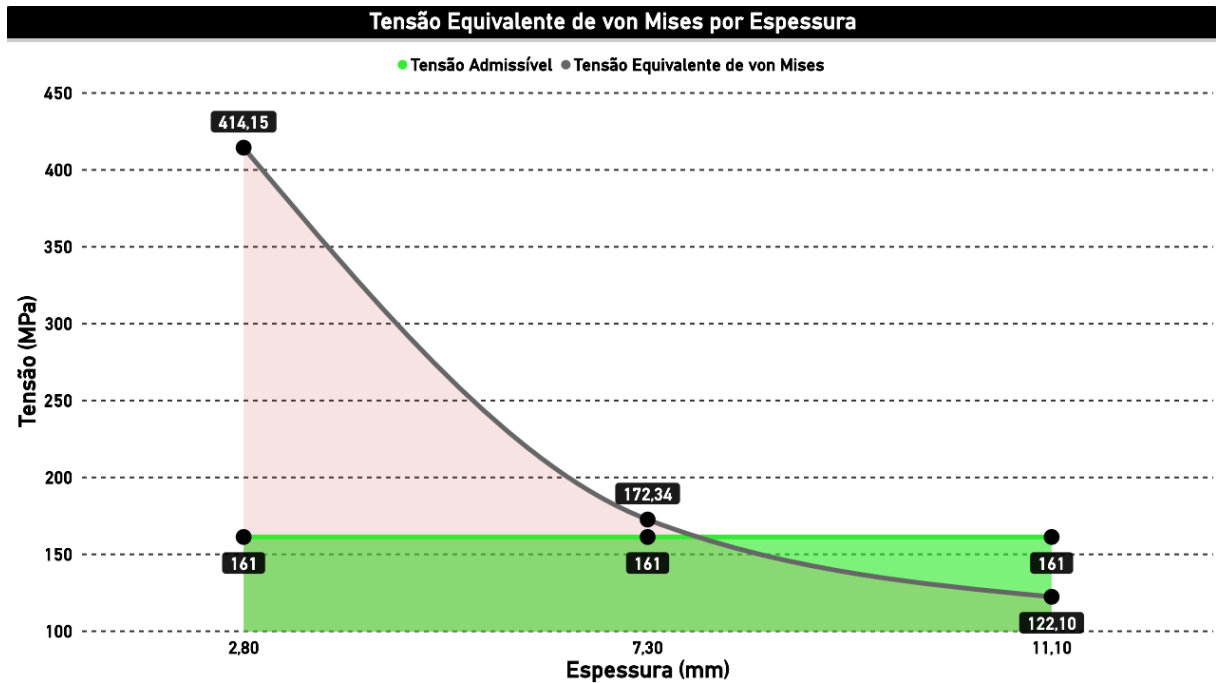


Figura 42 – Gráfico de tensão equivalente de *von Mises* (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor.

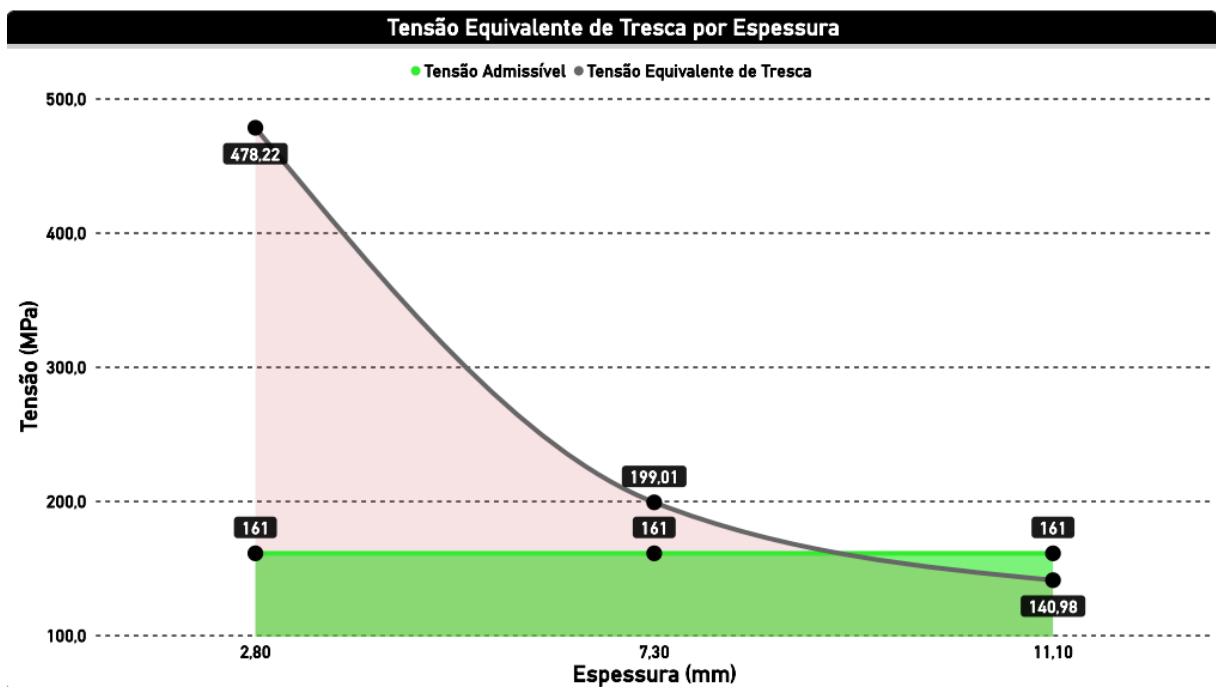


Figura 43 - Gráfico de tensão equivalente de Tresca (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor.

Portanto, pode-se concluir que os valores obtidos pelo critério de Tresca para  $\sigma_{eq}$  são maiores que os obtidos pelo critério de *von Mises*, pelo fato de a abordagem ser mais conservativa. Dessa forma, cabe destacar o ponto em ambos os gráficos onde a espessura tem o valor de 7,3 mm. O gráfico da Figura 42 mostra que o critério de falha de *von Mises* aprova esta condição, conforme mostra a região hachurada em verde. Por outro lado, no gráfico da Figura 43, o critério de falha de Tresca reprova a operação com a espessura mínima de projeto, conforme mostra a região hachurada em vermelho, indicando que o critério em questão é mais conservador conforme citado anteriormente.

Seguindo a comparação de resultados, é realizada a avaliação das pressões máximas permitidas utilizando a metodologia de *von Mises*, conforme representado no gráfico da Figura 44. Observa-se que quanto menor a espessura de parede utilizada, conseqüentemente menor é a pressão máxima permitida. Esse método permite uma pressão de 34,26 MPa para a espessura mínima de projeto, sendo inferior à utilizada na fase de projeto do tubo. Esse fato ocorre devido à utilização do uso do modelo para vasos de pressão de paredes grossas, o qual considera as tensões radiais. A combinação dessa tensão juntamente com as tensões longitudinais e circunferenciais, resulta em uma pressão calculada nesse método menor do que a prevista no código de construção do tubo. Dessa forma, a pressão supracitada se encontra na região vermelha do gráfico de pressões apresentado.

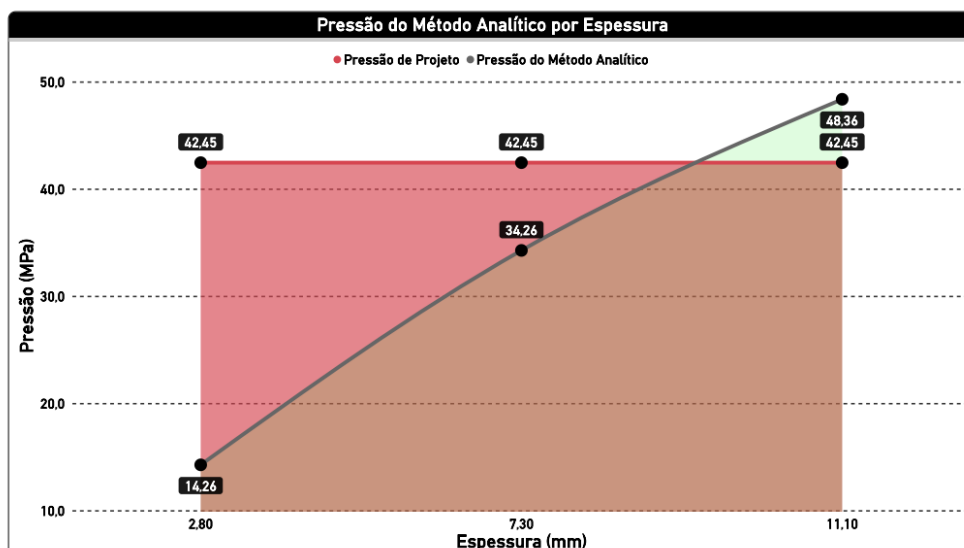


Figura 44 – Modelo Analítico para o critério de falha de *von Mises* de Pressão máxima (MPa) x Espessura (mm). Fonte: Próprio autor.

Prosseguindo a análise de *PMTA* do componente, são utilizados os dados da Tabela 16 para plotar o gráfico da Figura 45, comparando novamente a evolução da pressão com a espessura, observando um comportamento semelhante ao gráfico da Figura 44, onde conforme a espessura diminui, a *PMTA* também é reduzida.

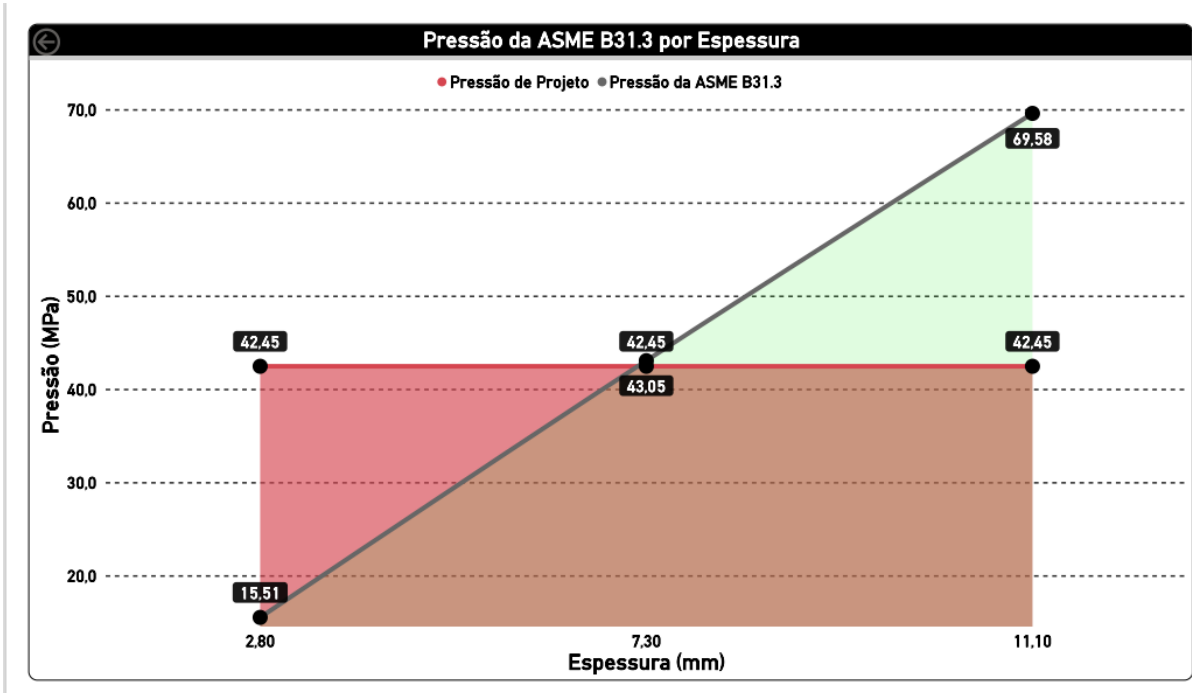


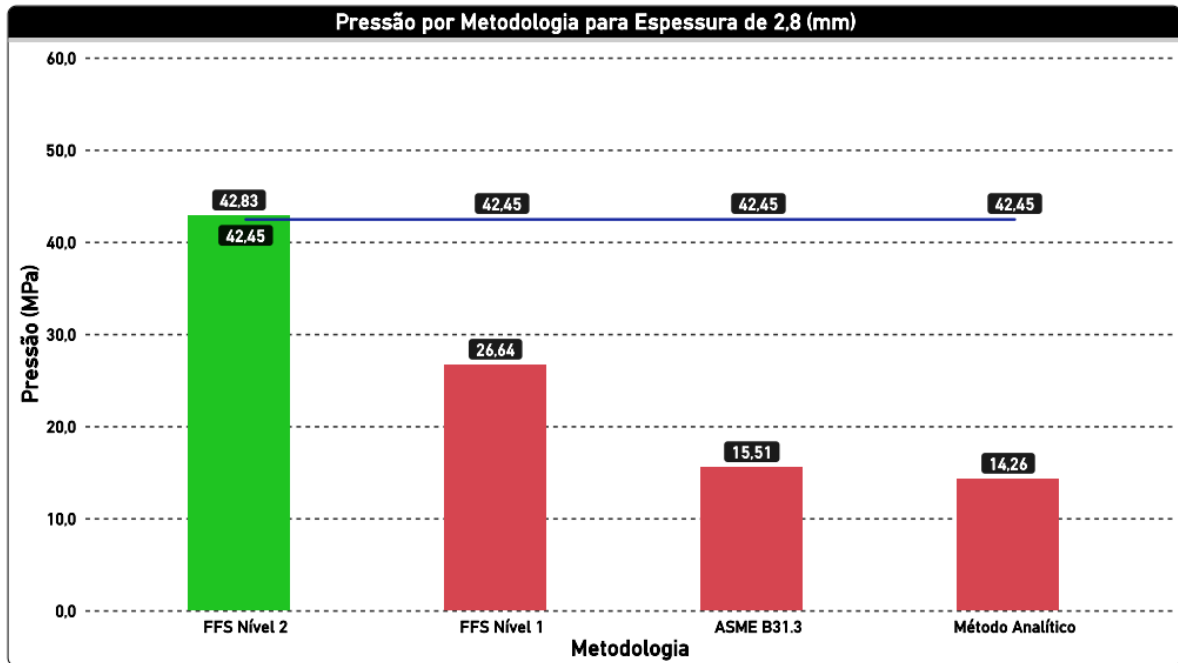
Figura 45 – *PMTA* (MPa) x Espessura (mm) segundo ASME B31.3. Fonte: Próprio autor.

Além disso, cabe destacar que o ponto de 7,3 mm na Figura 45, possui uma *PMTA* maior do que a metodologia analítica representada na Figura 44, pois o equacionamento da ASME B31.3, evidenciado na equação (36), é baseado na hipótese de paredes finas em conjunto com a utilização da tensão equivalente de Tresca. Essa metodologia do código ASME é adequada devido à consideração de fatores como coeficientes de redução e eficiência de junta, sendo que essa combinação resulta numa *PMTA* sempre maior do que a obtida via modelo analítico.

Analogamente, ao avaliar o ponto de menor espessura, 2,8 mm, é possível observar que as metodologias provenientes dos modelos analíticos e da norma ASME B31.3 **reprovam** a operação da tubulação na **pressão de projeto**, pelo fato de suas pressões se localizarem na região vermelha de ambas as Figuras 44 e 45. Além disso, como visto anteriormente no Capítulo 4, os cálculos oriundos da norma API 579-1 de nível 1 também **reprovam** a tubulação para operar na **pressão de projeto**.

Em virtude disso, todas as avaliações supracitadas não são suficientes para aprovar a estrutura, conforme explicado no Capítulo 4 desse trabalho, onde foi necessária a avaliação de Adequação ao Uso de nível 2, para posteriormente ser alcançado o objetivo da manutenção da

pressão de projeto. Nesse sentido, o gráfico presente na Figura 46 representa uma análise comparativa de todas as metodologias aplicadas para essa tubulação, sendo estas: Método Analítico, ASME B31.3, *FFS* 1 e *FFS* 2, todos utilizando a espessura mínima encontrada de 2,8 mm.



**Figura 46 – Gráfico de PMTA (MPa) para espessura de 2,8 mm, de acordo com todas as metodologias. Fonte: Próprio autor.**

Diante do exposto, o gráfico de barras da Figura 46 apresenta os valores reprovados representados em vermelho e os valores aprovados representados em verde. Com isso, observa-se que a única metodologia aplicada que atinge o patamar da pressão de projeto é o *FFS* 2, comprovando sua aplicabilidade para casos críticos com espessuras muito abaixo da mínima de projeto. Além disso, ao comparar as pressões máximas nota-se que neste caso o *FFS* 2 apresenta um ganho alto quando comparado a norma de projeto, sendo  $PMTA_{FFS\ 2} \cong 2\ PMTA_{B31.3}$ .

Por fim, a Figura 47 representa em forma de indicadores o quão próximas estão as pressões máximas de trabalho das metodologias em relação a pressão de projeto, onde novamente a única que atinge o objetivo é a *FFS* 2, destacada em verde.

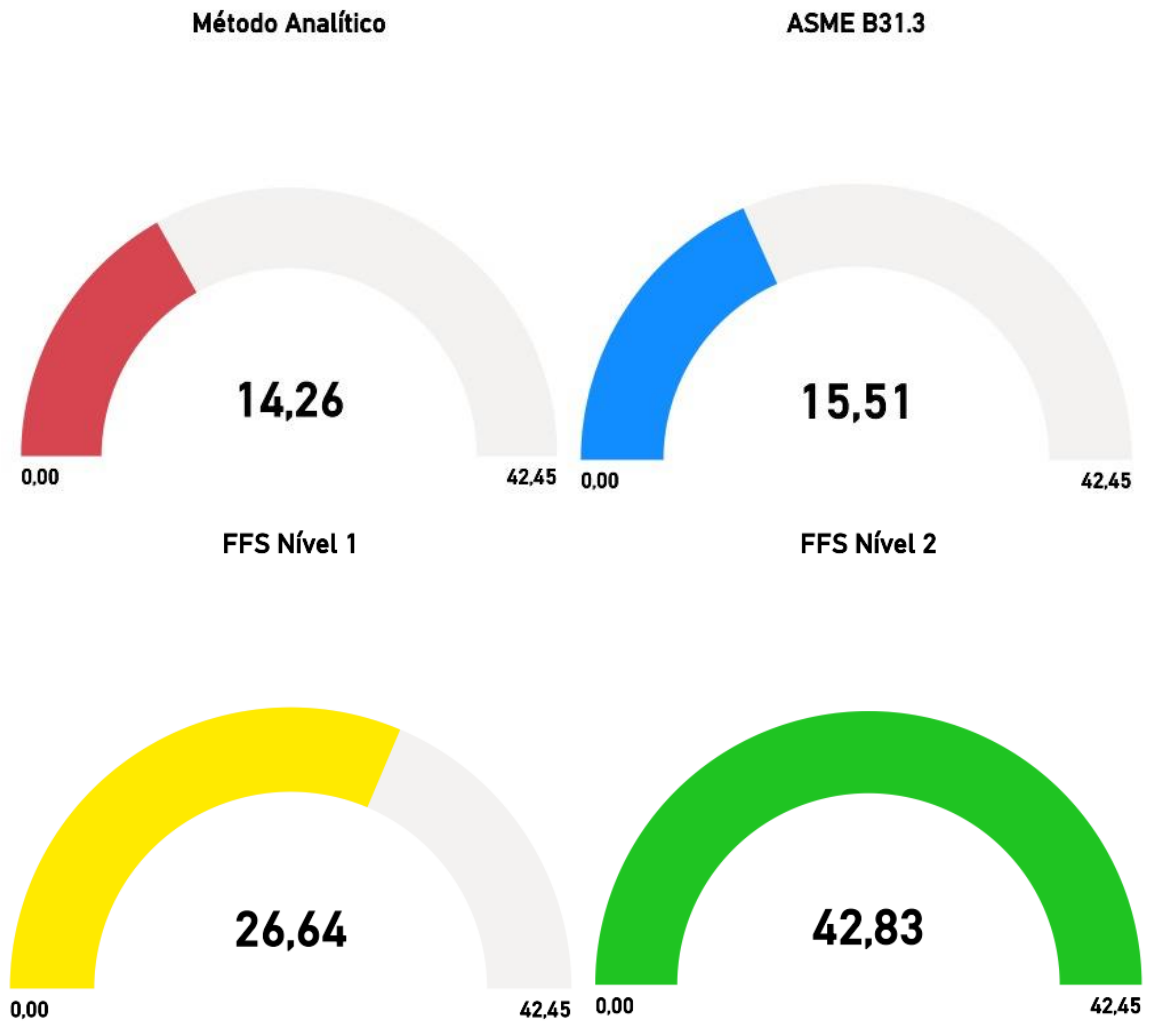


Figura 47 - Indicadores de pressão. Fonte: Próprio autor.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas quatro metodologias para avaliação de um trecho de tubulação com um dano de perda de espessura localizada, onde essas metodologias foram explicadas e comparadas de acordo com seus resultados de pressões máximas. Onde um exemplo de trecho de tubulação com dano de corrosão é analisado através das quatro metodologias apresentadas. Para o caso analisado, somente a metodologia de adequação ao uso de nível 2 da parte 5 da norma API 579-1, aprova a operação da tubulação, com perda de espessura localizada, para a condição da pressão de projeto. Cabe ressaltar que ainda que o trecho com dano tenha sido aprovado, se encontra na espessura limite definida pelo *FFS 2*. Desta forma, recomenda-se que o trecho em estudo seja inspecionado em pequenos intervalos de tempo, buscando garantir que não exista mais perda de material por corrosão externa. Além disso deve ser feito um planejamento para reparo ou substituição do trecho no momento mais oportuno.

Para trabalhos futuros, sugere-se aprofundar a análise da estrutura danificada através da avaliação de nível 3 da API 579-1, onde é necessário o desenvolvimento de análises numéricas baseadas no método de elementos finitos. Essa metodologia fornece resultados mais precisos de cálculo de *PMTA*. Acredita-se que através dessa metodologia seja possível chegar a espessuras menores do que  $t_{mm} = 2,8 \text{ mm}$  e, assim, definir uma nova espessura crítica para pressão de projeto. Ao utilizar o nível 3 torna-se possível realizar um novo cálculo de vida útil do componente, e postergar ainda mais a substituição ou reparo do trecho em estudo.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Jayann Ismar Lira; RODRIGUES, Marcelo Cavalcanti; MISHINA, Koje Daniel Vasconcelos. Modeling and level 3 fitness-for-service assessment of a cylindrical pressure vessel with general metal loss in conjunction with the numerical thermal transient analysis. *International Journal of Mechanics and Applications*, v. 4, p. 80-93, 2014.

AMEH, Enefolo S. Fitness for service assessment of ageing pressure vessel experiencing external corrosion: a case study. *The International Journal of Engineering and Science*, v. 6, n. 2, p. 12-16, 2017.

American Petroleum Institute (API) / American Society of Mechanical Engineers (ASME). API; ASME. API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-For-Service. 3. ed. Washington: API, 2021.

American Society of Mechanical Engineers (ASME). ASME B31.3: Process Piping. New York: ASME, 2018.

American Society of Mechanical Engineers (ASME). ASME B36.10: Welded and Seamless Wrought Steel Pipe. New York: ASME, 2022.

American Society of Mechanical Engineers (ASME). ASME B36.19M: Stainless Steel Pipe. New York: ASME, 2018.

American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII: Rules for Construction of Pressure Vessels. New York: ASME, 2019.

ANTAKI, George A.; FAULKNER, Lynn. Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair. New York: Marcel Dekker, 2003.

AZEVEDO, Cristiano Baierle de. Avaliação da integridade estrutural de um vaso de pressão com defeito do tipo trinca planar de acordo com a norma API 579-1. 2016.

BEER, Ferdinand; JOHNSTON, E. Russel. Mecânica dos Materiais. 7. ed. AMGH Editora, 2015.

BUDYNAS, Richard G.; NISBET, J. Keith. Elementos de máquinas de Shigley. 8. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2011

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. Materiais e Ciência da Engenharia: Uma Introdução. 8º Ed. São Paulo: LTC, 2012

CARNEIRO, William Nunes. Exploração e produção de petróleo e gás natural em áreas offshore: desafios e oportunidades. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Petróleo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

CHEN, Qishi; KHOO, Heng; CHENG, J.J. Local Buckling of Corroded Pipelines. 2009, Milan.

DIMENSIONS OF GAS PIPES: ELECTROWELDED STEEL PIPELINE. Homele. Disponível em: <https://homele.ru/en/sewerage/dimensions-of-gas-pipes-electrowelded-steel-pipeline/>. Acesso em: 5 out. 2023.

GERE, James M. Mecânica dos Materiais. São Paulo: Cengage Learning, 2003.

GONÇALVES, Cristiano Piccard. Análise de tensões pelo Método dos Elementos Finitos em projeto de vasos de pressão: estudo de caso do setor sucoenergético. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

Jawad and Farr, Structural Analysis and Design of Process Equipment, 1984, editora: John Wiley and sons, Inc.

LEAL JÚNIOR, Jerry Amorim. Estudo das patologias em estruturas metálicas. 2023. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

LEET, Kenneth; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne. Fundamentals of Structural Analysis. 4. ed. McGraw-Hill, 2011.

LU, Yen-Ju; WANG, Chen-Hua. Effects of geometry of a local thin area defect on remaining strength and fitness of pressure equipment. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 65, 2020.

MENEGATTI, Franco Dufloth. Avaliação de defeitos em um vaso de pressão utilizando a API-579. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, 2010.

MOHITPOUR, Mo; GOLSHAN, Hossein; MURRAY, Alan. Pipeline Design and Construction: A Practical Approach. 2. ed. ASME Press, 2000.

MOSS, Dennis; BASIC, Michael. Pressure Vessel Design Manual. 4. ed. Butterworth - Heinemann, 2012.

MOTTA, André. Arquivo Petrobras. 2021. Link para acesso: <https://infonet.com.br/noticias/economia/petrobras-tera-unidade-flutuante-para-explorar-aguas-profundas-em-se/>. Acesso em: 9 jul. 2024.

OLIVEIRA, José. O Pré-Sal Brasileiro e o Problema da Corrosão por CO<sub>2</sub>. Faculdade do Centro Leste, Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo & Gás Natural, 2015.

PASTOUKHOV, Viktor A. Introdução à mecânica da integridade estrutural. UNESP, 2010.

PRESSURE VESSEL NOZZLE WELDING. Arc Machines. Disponível em: <https://resources.arcmachines.com/pressure-vessel-nozzle-welding-lp/>. Acesso em: 5 out. 2023.

PROBLEMAS DE CORROSÃO DOS CANOS E COMPONENTES HIDRÁULICOS. Encanador Porto Alegre. Disponível em: <https://encanadorportoalegre.com.br/problemas-de-corrosao-dos-canos-e-componentes-hidraulicos/>. Acesso em: 5 out. 2023.

REVIE, R. Winston. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. 4. ed. John Wiley & Sons, 2008.

RICHTER, Bruno Jenisch. Análise de integridade mecânica em vaso de pressão: Estudo de caso com uso da norma FFS (Fitness-for-service) para ASME e API. 2022.

SILVA, Vinicius Galdino da. Análise de vida residual em vaso acumulador de condensado por corrosão uniforme. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. Tubulações Industriais: Cálculo. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 381 p.

UO, Yun; JIANG, Wenchun; ZHANG, Weiya; WEI, Zhiqian; ZHANG, Qian; WAN, Yu; WANG, Y.J. Experimental and Numerical Study on the Reduction of Residual Stress in the Fillet Weld by Overlay Welding and Cutting Method. Journal of Pressure Vessel Technology, 2016.

ZANGENEH, Sh. Fitness-for-service assessment of local thin area in a line pipe. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 21, n. 3, p. 1085-1095, 2021.