



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DIEGO JORGE MAIA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM VASO DE PRESSÃO NA
PRESENÇA DE CORROSÃO POR PITE SEGUNDO A API 579**

**Recife
2018**

DIEGO JORGE MAIA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM VASO DE PRESSÃO NA
PRESENÇA DE CORROSÃO POR PITE SEGUNDO A API 579**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como exigência para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo

Co-orientador: Prof. Msc. Ricardo Aurélio Fragoso de Sousa

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

S725a Sousa, Diego Jorge Maia de.

Avaliação de integridade estrutural de um vaso de pressão na presença de corrosão por pite segundo a API 579 / Diego Jorge Maia de Sousa - 2018.

73folhas, Il.; Tabs.; Abr. e Sig.; Simbs.

Orientador: Prof. Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. API 579-1/ASME FFS-1. 3. Vasos de pressão. 4. Corrosão. 5. Integridade estrutural. I. Jácomo, Justo Emilio Alvarez.(Orientador).

DIEGO JORGE MAIA DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM VASO DE PRESSÃO NA
PRESENÇA DE CORROSÃO POR PITE SEGUNDO A API 579**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como exigência para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 13/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof.º Dr. Justo Emilio Alvarez Jácomo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.º Dr. Jorge Antônio Palma Carrasco (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng.º Maurício Fonsêca de Aguiar (Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Cristiane Maia, por todo apoio, compreensão, e ensinamentos não só durante essa etapa, mas durante toda minha vida.

Ao meu pai, Ricardo Aurélio, por toda a disponibilidade, esforço, e por ser o exemplo de profissional que almejo ser.

Aos meus amigos de graduação, pela troca de conhecimento e convivência durante esses anos, e que sempre estiveram presentes e dispostos a ajudar.

Ao professor Justo Emilio, pela confiança e sugestões e orientação na elaboração deste trabalho.

A Raphael Sant'Anna pelos ensinamentos e disponibilidade para discutir dificuldades encontradas.

Aos professores do DEMEC, por todos os ensinamentos durante a graduação.

RESUMO

No presente trabalho foi executada uma avaliação da integridade estrutural com o objetivo de determinar a adequação ao serviço de um vaso de pressão sob presença de descontinuidades do tipo corrosão alveolar, segundo os critérios estabelecidos pela norma API 579-1/ASME FFS-1, seção 4, que trata da perda de metal generalizada em um componente. Para proceder o estudo de caso, um vaso de pressão cilíndrico foi submetido a ensaio não destrutivo do tipo ultrassom, para determinação da espessura da área analisada. Com os resultados, foi desenvolvida uma planilha de cálculos capaz de retornar os parâmetros necessários para a determinação dos critérios de aceitação descritos pela norma, seguindo níveis decrescentes de conservadorismo. Após obtenção dos resultados analíticos, foi desenvolvido um modelo 3D da região do equipamento com presença da descontinuidade. A esse modelo, foram aplicadas condições de contorno e realizadas análises numéricas com o objetivo de comparar os resultados àqueles obtidos analiticamente.

Palavras chave: API 579-1/ASME FFS-1. vasos de pressão. Corrosão. integridade estrutural. adequação ao serviço. análise numérica.

ABSTRACT

In the present work a structural integrity assessment was performed to determine the fitness-for-service of a pressure vessel subjected to pitting corrosion discontinuity according to the standards of the API 579-1/ASME FFS-1 part 4, that addresses general metal loss on a component. To proceed with the case study, a cylindrical pressure vessel was subjected to an ultrasonic non-destructive testing to determine the wall thickness of the corroded region. Using the obtained data, a calculation spreadsheet able to return the necessary parameters to evaluate the acceptance criteria described by the standard was developed, following decreasing levels of conservatism. Using the acquired analytical results, a 3D model of the equipment region subjected to discontinuity was developed. Boundary conditions were applied to said model and numerical analysis were performed in order to compare the results with those obtained analytically.

Keywords: API 579-1/ASME FFS-1. pressure vessel. Corrosion. structural integrity. fitness-for-service. numerical analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Vaso de pressão em um caminhão-tanque.....	16
Figura 2 –	Principais tipos e posições de instalação para vasos de pressão.....	21
Figura 3 –	Corrosão alveolar em um tubo de aço carbono.....	24
Figura 4 –	Imagem ampliada de uma região com corrosão alveolar em um vaso de pressão.....	24
Figura 5 –	Geometria típica de corrosão por pite.....	25
Figura 6 –	Gráfico utilizado para caracterização de pite.....	26
Figura 7 –	Detalhe da região com presença de corrosão por pite.....	43
Figura 8 –	Instrumento de medição de espessura utilizado.....	45
Figura 9 –	Procedimento para modelagem do vaso de pressão.....	48
Figura 10 –	Desenho do anel com corrosão (a), detalhe da região corroída (b).....	49
Figura 11 –	Resultado das tensões de Von Mises circunferenciais (a), longitudinais (b) e para o anel sem corrosão (c).....	51
Figura 12 –	Perfil de espessura crítica longitudinal.....	55
Figura 13 –	Perfil de espessura crítica circunferencial.....	55
Figura 14 –	Detalhe do caminho criado para linearização de tensões na região corroída.....	60
Figura 15 –	Posicionamento do caminho 2 para determinação da P_m (a). Detalhe do caminho.....	60
Figura 16 –	Resultado da linearização da tensão na região de menor espessura.....	61
Figura 17 –	Gráfico da Tensão Linearizada x Espessura na região corroída.....	61
Figura 18 –	Resultado da linearização da tensão na região sem corrosão.....	62
Figura 19 –	Gráfico da tensão linearizada x espessura na região sem corrosão.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de mecanismos de dano e parte correspondente na norma API 579-1/ASME FFS-1.....	30
Tabela 2 – Critérios de aceitação baseados no Nível 1 de avaliação.....	36
Tabela 3 – Critérios de aceitação baseados no Nível 2 de avaliação.....	38
Tabela 4 – Critérios de aceitação com base na categorização de tensões, considerando pressões de projeto.....	41
Tabela 5 – Critérios de aceitação com base na categorização de tensões, considerando pressões de operação.....	41
Tabela 6 – Dados do vaso analisado.....	44
Tabela 7 – Valores relativos a medição de espessura, e CTPs calculados.....	45
Tabela 8 – Parâmetros do problema-exemplo do manual da API 579.....	46
Tabela 9 – Comparação de resultados para validação da planilha de cálculos.....	46
Tabela 10 – Comparação de resultados para validação do modelo numérico.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS

AD	Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CODAP	Code de construction des Appareils a Pression, Division 1 et Division 2
CTP	Perfis de Espessura Crítica
EN	European Standard
FFS	Fitness for servisse
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HIC	Hydrogen Induced Cracking
MEF	Método dos Elementos Finitos
MFH	Altura Máxima de Preenchimento
MPC	Material Properties Council
NR	Norma Regulamentadora
PTR	Leitura de Espessuras Pontuais
SOHIC	Stress Oriented HIC

LISTA DE SÍMBOLOS

t_{rd}	Espessura Uniforme Longe da Região de Perda de Metal	[mm]
t_{mm}	Espessura mínima medida	[mm]
FCA	Taxa de Corrosão Futura Admissível	[mm]
COV	Coefficiente de Variação	[-]
t_{ml}	Espessura nominal na região corroída	[mm]
D_{ml}	Diâmetro interno do vaso de pressão incluindo a FCA	[mm]
D	Diâmetro interno do vaso de pressão	[mm]
t_{nom}	Espessura nominal do vaso de pressão incluindo a FCA	[mm]
R_t	Taxa de espessura remanescente	-
L	Comprimento da espessura média	[mm]
t_{am}	Espessura medida média	[mm]
t_{am}^c	Espessura medida média longitudinal	[mm]
t_{am}^s	Espessura medida média circunferencial	[mm]
t_{min}	Espessura mínima requerida para o componente	[mm]
R	Raio interno do vaso de pressão	[mm]
P	Pressão interna de projeto	[MPa]
S	Tensão admissível	[MPa]
E	Eficiência de solda	-
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível	[MPa]
t_{rr}	Espessura medida média excluindo a FCA	[mm]
RSF_a	Fator de Força Restante	-
L_{DC}	Carga de ruptura do componente danificado	[MPa]
L_{UC}	Carga de ruptura para o componente sem falhas	[MPa]
t_{min}	Espessura mínima requerida para o componente	[mm]
t_{lim}	Espessura limitante	[mm]
Pm	Tensão Primárias de Membrana Gerais	[MPa]
Pl	Tensão Primárias de Membrana Locais	[MPa]
Pb	Tensões Primárias de Flexão	[MPa]
Q	Tensões Secundárias	[MPa]
F	Tensões de Pico	[MPa]
α	Ângulo de rotação de cada espaçamento de espessuras	[°]

Z	Espaçamento entre medições de espessura	[mm]
σ_{circ}	Tensão circunferencial	[MPa]
σ_{long}	Tensão longitudinal	[MPa]
σ_{vm}	Tensão de Von Mises	[MPa]
R_c	Raio interno do vaso de pressão acrescido a FCA	[mm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	VASOS DE PRESSÃO	18
2.1.1	Generalidades	18
2.1.2	Histórico	19
2.1.3	Características geométricas	20
2.2	CORROSÃO	21
2.2.1	Conceitos básicos	21
2.2.2	Formas de corrosão	23
2.2.3	Taxa de corrosão	27
2.2.4	Corrosão e integridade estrutural	28
2.3	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS PARA AVALIAR A INTEGRIDADE ESTRUTURAL	28
2.3.1	Conceitos	28
2.3.2	Histórico e aplicações do procedimento	29
2.3.3	API 579-1/ASME FFS-1 - Organização e avaliação	30
2.3.4	API 579-1/ASME FFS-1 Parte 4 – Perda geral de metal.....	31

2.3.4.1	Generalidades do método	31
2.3.4.2	Tipos de componentes	32
2.3.4.3	Dados necessários	33
2.3.4.4	Técnicas de avaliação e critérios de aceitação	34
2.3.5	Análise numérica	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	ESTUDO DE CASO	43
3.2	MÉTODO	44
3.3	MODELAGEM DO VASO DE PRESSÃO	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1	AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL SEGUNDO A API 579-1/ASME FFS-1.....	53
4.2	ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 1	56
4.3	ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 2	57
4.4	ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 3	59
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA	70
	ANEXO A – PARÂMETROS PARA CALCULAR O COMPRIMENTO DE ESPESSURA MÉDIA, L	71

**ANEXO B – FLUXOGRAMA PARA REALIZAÇÃO DE
AVALIAÇÃO ESTRUTURAL72**

**ANEXO C – EXEMPLOS DE CATEGORIZAÇÃO DE
TENSÕES EM COSTADOS CONFORME A ASME (2015)
.....73**

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Vasos de pressão são definidos genericamente como todo recipiente estanque, de qualquer tipo, dimensão, formato ou finalidade, capaz de conter fluido pressurizado (TELLES, 1996). Decorrente destas características, bem como à extensiva utilização de fluidos como meios de transporte e armazenamento de energia, os vasos de pressão representam uma fatia significativa no investimento financeiro e custos operacionais nas indústrias, com destaque para a de processos petroquímicos.

É comum encontrar vasos de pressão com pressões internas variando desde o vácuo absoluto até cerca de 400MPa, e desde próximo ao zero absoluto até temperaturas da ordem de 1500°C (TELLES, 1996). Essa versatilidade, associada à presença de defeitos nesses equipamentos, pode acarretar na perda da integridade estrutural, tendo como resultado a possibilidade de riscos de acidentes ao trabalhador, ao meio ambiente ou comunidades circunvizinhas variando desde vazamento de fluidos não tóxicos, até a possibilidade de incêndios e explosões para fluidos inflamáveis. Conforme a norma da PETROBRAS N-0253, a vida útil mínima de um vaso de pressão em unidades petroquímicas é de 15 anos. Sendo assim, durante a fase de projeto desses equipamentos, os materiais que compõem o vaso são superdimensionados no que diz respeito à sua espessura, o que acarreta em um grande investimento inicial.

Os vasos de pressão que são instalados em caminhões de abastecimento de GLP (gás liquefeito de petróleo), como o da Figura 1, estão expostos à vários ambientes, resultando na possibilidade de ocorrência de corrosão atmosférica devido a diversos fatores, dentre os quais podem ser citados: umidade relativa, substâncias poluentes, oscilação de temperatura, etc.

Figura 1 – Vaso de pressão em um caminhão-tanque



Fonte: Site da Nitrotec¹

Uma forma de corrosão observada em vasos de pressão é a corrosão alveolar, que ocorre na superfície metálica do vaso e corresponde à presença de sulcos ou escavações, semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro. (GENTIL, 2011).

Estudos de viabilidade estrutural apontam três cenários possíveis para os vasos de pressão que possuem discontinuidades. O primeiro é a substituição do vaso por outro, que pode representar uma solução economicamente inviável com impactos na continuidade operacional da indústria. O segundo cenário é a retirada de serviço do equipamento, sendo este submetido a reparos. Essa solução tem como objetivo estender a vida útil do vaso, tendo como consequência o gasto com o serviço de reparo, que envolve custos de projeto da manutenção, execução da manutenção, testes e inspeções, além da perda econômica devido a paralização do equipamento. O terceiro é manter o equipamento em operação, sem efetuar reparos, porém com acompanhamento das suas condições de integridade. Neste caso, não há impacto negativo financeiro imediato, visto que não há manutenção nem tempo de indisponibilidade do equipamento.

Com o intuito de se estabelecer um padrão e prezar pela segurança, várias normas foram desenvolvidas por órgãos competentes, a nível nacional e internacional, para

¹ Disponível em: <<http://nitrotec.com.br/site/produtos/caminhao-mod-mpg-p-transp-de-ulp>> Acesso em out. 2018

definir e padronizar inspeções técnicas nesses equipamentos. Nacionalmente, foi instituída pelo Ministério do Trabalho a Norma Regulamentadora nº13 (NR-13), que entre outras coisas classifica os vasos de pressão com respeito a classe de fluido armazenado e ao potencial de risco, e estabelece os critérios para inspeções periódicas dos mesmos. A nível internacional, existem diversos códigos estabelecidos por órgãos competentes, tais como a britânica *British Standard* (BS) 7910, ou da *American Petroleum Institute* (API) 579, que focam no conceito de *fitness for service*, isto é, um método de avaliação estrutural de um vaso de pressão na presença de descontinuidades, com o intuito de extrapolar a condição atual do equipamento, para estimar a vida útil remanescente em condições seguras de operação, bem como prover diretrizes para operar, reparar ou substituir componentes envelhecidos ou com defeitos (SHEKARI et al., 2015).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar através de um estudo de caso um vaso de pressão de GLP com ocorrência de corrosão alveolar localizada, com base na norma API 579-1/ ASME FFS-1 parte 4, para determinação da possibilidade de continuação em serviço do componente sem parada para reparos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar os procedimentos de cálculos analíticos para avaliação da integridade estrutura conforme níveis 1 e 2 da API 579-1/ ASME FFS-1 parte 4.
- Desenvolver a modelagem do vaso de pressão com região corroída, incluindo condições de carregamento e fixação.
- Avaliar numericamente o vaso de pressão com base na teoria dos elementos finitos.
- Comparar e discutir os critérios e graus de conservadorismo para cada nível de avaliação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na presente seção serão feitas as apresentações dos conceitos fundamentais pertinentes ao estudo da análise estrutural de vasos de pressão. Inicialmente será exposto um breve histórico da utilização de vasos de pressão na indústria, suas características estruturais principais e os tipos de tensões esperadas em serviço normal. Em relação à corrosão, serão apresentados o conceito, tipos de corrosão, causas, mecanismos de evolução e taxa de corrosão. Será apresentado um breve histórico do estudo da análise estrutural de equipamentos de processo, bem como procedimentos técnicos normatizados à nível nacional e internacional para adequação ao serviço desses equipamentos. Finalmente, serão expostos os princípios teóricos e de aplicação prática do método dos elementos finitos (MEF).

2.1 VASOS DE PRESSÃO

2.1.1 Generalidades

Denominam-se equipamentos de processo aqueles que são utilizados nas indústrias de processo, nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas ou químicas, ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos. Dentre essas indústrias podemos citar: refinarias de petróleo, as indústrias químicas e petroquímicas, grande parte das indústrias alimentares e farmacêuticas, a parte térmica das centrais termoelétricas, os terminais de armazenagem e de distribuição de produtos de petróleo e/ou gás natural, em terra ou no mar. (TELLES,1996).

Como características dessas indústrias pode-se destacar a grande gama de fluidos com propriedades distintas que podem ser armazenadas em um vaso, bem como diferenças no que diz respeito ao espaço hábil disponível para a fixação desses equipamentos e *layout* das instalações industriais. Essa grande variação de possibilidades de uso faz com que os vasos de pressão possam ser considerados equipamentos de grande risco, especialmente caso um fluido inflamável seja armazenado ou esteja presente no ambiente em que o vaso se encontre em operação. O projeto de um vaso de pressão é, em

geral, feito sob medida para uma determinada aplicação, o que significa que estes não são geralmente produtos de linhas de produção.

Devido às características de funcionamento das indústrias de processo, muitas vezes esses equipamentos estão submetidos a utilização em regime contínuo sem paradas, podendo ser submetidos a regimes severos de serviço, e em cadeia contínua. Por isso, a paralização de serviço de um único equipamento pode representar a parada de grande parte ou toda a planta.

2.1.2 Histórico

Os tópicos abordados justificam a preocupação da análise feita em relação às condições de fabricação e utilização desses equipamentos. Surge, movido principalmente ao histórico de acidentes envolvendo equipamentos de processo, a necessidade de unificar e normalizar o projeto de equipamentos de processo.

Uma explosão em Londres, em 1815, deu origem a uma investigação, pelo parlamento britânico. Chegou-se à conclusão de que o acidente aconteceu devido à má construção, a materiais não adequados e à pressão excessiva nas caldeiras. Foi exigido então que as caldeiras fossem construídas em ferro forjado, com tampos hemisféricos e com duas válvulas de segurança. Essas imposições, que hoje podem parecer sem sentido, devem, entretanto, ter representado na época um grande avanço tecnológico. (TELLES, 1996).

Depois de uma terrível explosão em Brockton, Massachusetts (EUA), em 1905, que causou 58 mortos e 117 feridos, foi elaborada a primeira norma americana, de uso legal obrigatório, que incluía exigências de projeto, materiais, fabricação e inspeção de caldeiras estacionárias. Essa norma, denominada *Massachusetts Rules* publicada em 1907, foi o princípio do futuro código ASME: fixava um coeficiente de segurança de 4,5 em relação ao limite de resistência do material. (TELLES, 1996).

Fundada em 1880 como a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, a ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) é uma organização profissional sem fins lucrativos que permite a colaboração, partilha de conhecimentos e desenvolvimento de habilidades em todas as disciplinas de engenharia mecânica. O código ASME foi

criado em 1911, ainda como Comitê de Caldeiras do ASME, com a publicação da primeira edição do Código em 1914-1915, exclusivamente para caldeiras estacionárias (Seção I). Em 1924 foi publicada a Seção VIII, referente a vasos de pressão não sujeitos a chama. (SILVA, 2015).

Dentre os tópicos contemplados pelo código ASME, podem-se destacar os critérios de projeto que fixam a máxima pressão de trabalho admissível (PMTA), baseada na tensão admissível do material utilizado.

O código ASME é o mais conhecido, e por isso, o que serve como referência para projetos de vasos de pressão no mundo todo. Entretanto, é importante destacar a presença de outros códigos internacionais que abordam esse tema, como o inglês PD 5500 (BS 5500), a norma europeia EN- 13445, o alemão AD-Merkblätter e o francês CODAP – *Code de construction des Appareils a Pression, Division 1 et Division 2*. (FALCÃO, 2008).

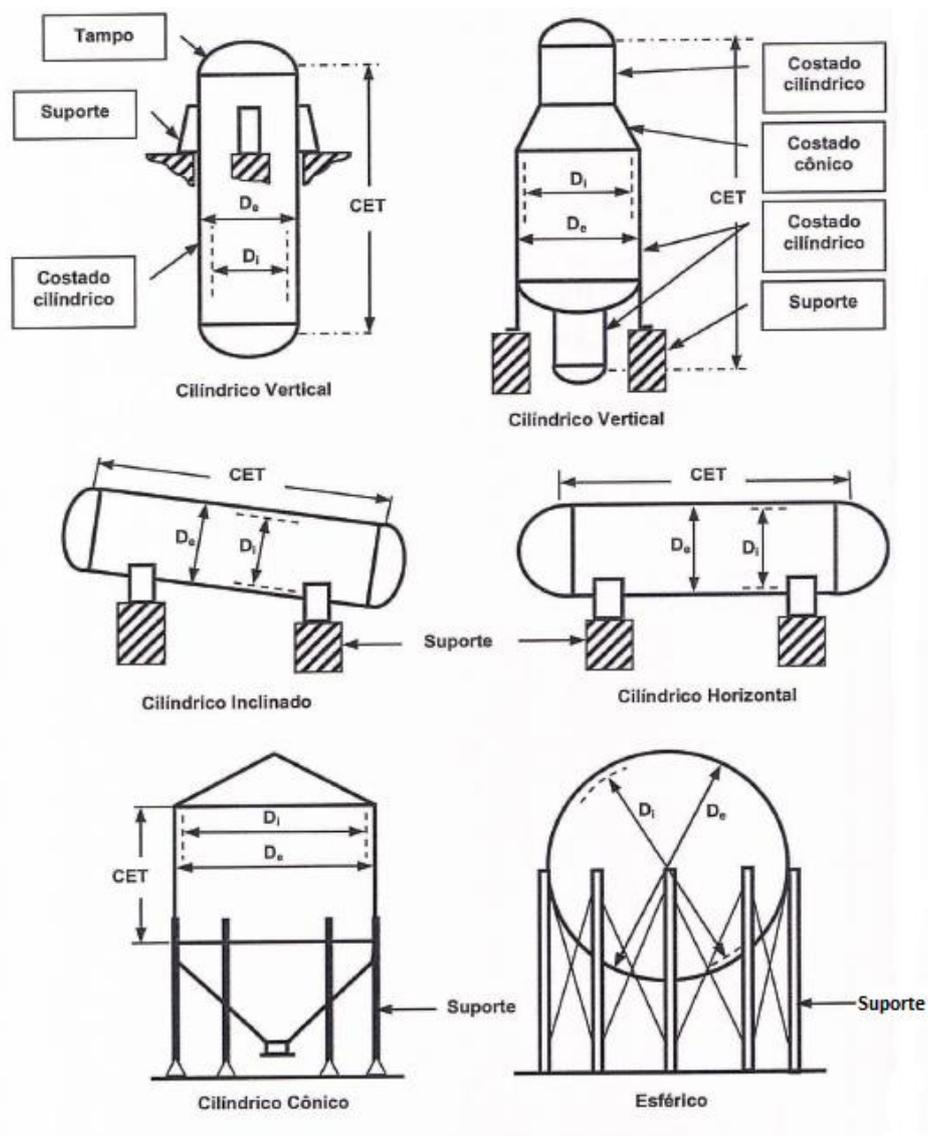
No Brasil, a regulamentação de vasos de pressão, caldeiras e tubulações foi instituída pelo Ministério do Trabalho sob forma da Norma Regulamentadora nº13 (NR-13), aprovada pela portaria Nº 3.214 de 8 de junho de 1978, com atualização mais recente em setembro de 2017. Essa norma estabelece como os vasos de pressão devem ser classificados, e a partir dessa classificação, estabelece procedimentos obrigatórios para garantia da segurança do trabalho.

2.1.3 Características geométricas

Ao longo deste trabalho serão discutidos diversos aspectos e variáveis que possuem relação de dependência direta com o tipo de geometria do vaso, portanto o esclarecimento dos formatos e características geométricas usuais de vaso de pressão é de grande importância.

Segundo Telles (1996), a parede de um vaso de pressão é composta do casco (costado) do vaso (*shell*), e dos tampos de fechamento (*heads*). O costado tem sempre o formato de uma superfície de revolução e possui, salvo raras exceções, formatos cilíndricos, cônicos, esféricos ou combinações destes. Quanto às posições de instalação, estas podem ser horizontais, verticais ou inclinados. A Figura 2 ilustra alguns tipos de geometrias e posições de instalação comuns de vasos de pressão.

Figura 2 – Principais tipos e posições de instalação para vasos de pressão



Fonte: DONATO; VILLAS BOAS, 2012.

2.2 CORROSÃO

2.2.1 Conceitos básicos

Pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. É um processo em geral espontâneo, e está constantemente transformando materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. (GENTIL, 2011).

Entre as perdas econômicas que podem ser observadas na indústria devido a esse tipo de descontinuidade, podemos destacar:

- a) Custos Diretos: Relacionados aos custos que envolvem a manutenção dos equipamentos, mão de obra para realização de serviços, e gastos relativos a inibidores de corrosões como recobrimentos, pinturas, etc.
- b) Custos Indiretos: Estão relacionados indiretamente ao processo corrosivo, sendo relativamente difícil de mesurar. Exemplos típicos: Paradas não programadas para substituição de componentes ou limpeza dos mesmos, perda de produto devido a incrustação de produtos nas tubulações, perda de insumos devido a contaminação, necessidade de maior investimento inicial devido a necessidade de superdimensionar equipamentos para compensar corrosão.

Além de perdas econômicas, a falta de atenção em relação a corrosão em ambientes que possuem fluidos de risco, como fluidos inflamáveis, pode culminar em acidentes envolvendo perdas humanas, ambientais e etc.

Considerando-se como oxidação-redução todas as reações químicas que consistem em ceder ou receber elétrons, pode-se considerar os processos de corrosão como reações de oxidação-redução dos metais, isto é, o metal age como redutor, cedendo elétrons que são recebidos por uma substância, o oxidante, existente no meio corrosivo. Logo, a corrosão é um modo de destruição do metal, progredindo através da sua superfície. (GENTIL, 2011).

De acordo com Lombardi (1993), algumas definições eletroquímicas devem ser feitas:

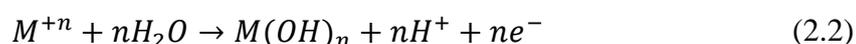
- Ânodo: metal ou região do metal que corrói, onde a corrente deixa o metal.
- Cátodo: metal ou região do metal para onde a corrente se dirige.
- Eletrólito: solução através da qual a corrente é conduzida na forma de íons.

As reações de oxidação ocorrem em locais anódicos, ou seja, no ânodo de uma célula eletroquímica. As reações anódicas para o caso geral de um metal qualquer, M , serão então:

- Dissolução do metal para formar cátions:



- Dissolução do metal para formar produtos de corrosão sólidos:



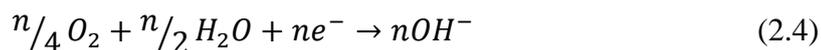
As reações de redução ocorrem em locais catódicos, ou seja, no cátodo de uma célula eletroquímica. As reações catódicas mais comuns são:

- Redução do íon H^+ em meio ácido:

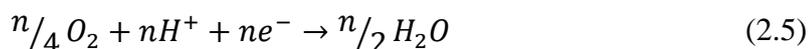


- Redução do oxigênio:

Para meios neutros e básicos:



Para meios ácidos:



2.2.2 Formas de corrosão

Lombardi (1993) divide os tipos de corrosão em dois grandes grupos:

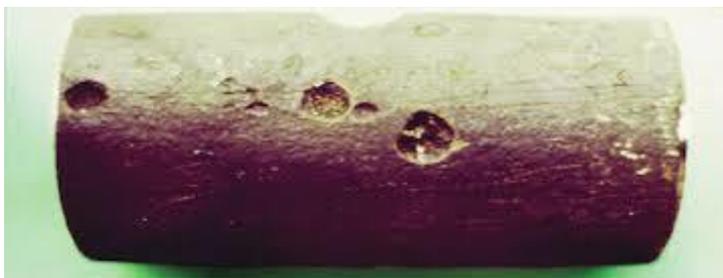
- Corrosão generalizada: Corrosão que ataca uniformemente toda a extensão da superfície do metal. Nesse tipo de corrosão, as regiões anódicas e catódicas são, em geral, fisicamente inseparáveis. Também é conhecida como corrosão uniforme.
- Corrosão localizada: Corrosão que ocorre de maneira seletiva, atacando apenas áreas pequenas sobre a superfície do metal, de forma que grande parte da superfície do material permanece intacta. Nesse tipo de corrosão, as regiões anódicas e catódicas são bem distintas e separadas.

Dentre os tipos de corrosão localizada, destacam-se as seguintes formas de corrosão, definidas por Gentil (2011):

- a) Por placas: a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações.
- b) Alveolar: a corrosão se processa na superfície metálica produzindo escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro.
- c) Puntiforme ou por pite: a corrosão se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que seu diâmetro.

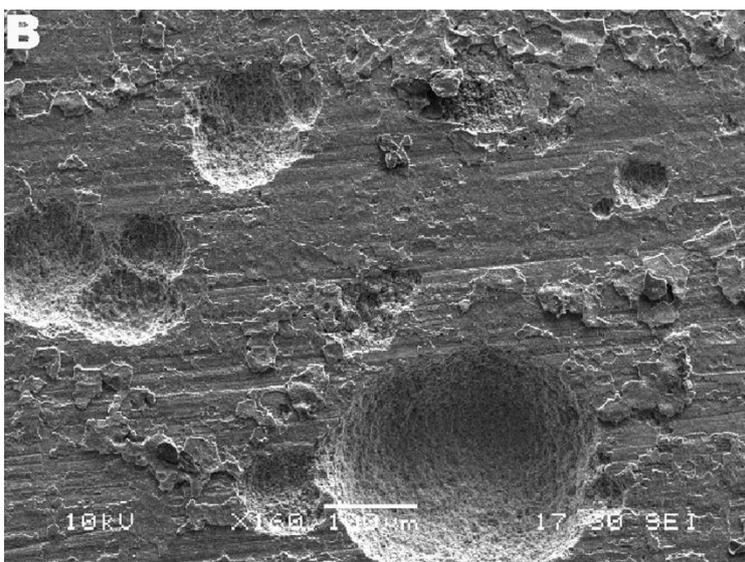
Nas Figuras 3 e 4, observam-se dois exemplos de corrosão alveolar: em um tubo de aço carbono, e uma vista ampliada em um vaso de pressão, respectivamente.

Figura 3 – Corrosão alveolar em um tubo de aço carbono



Fonte: GENTIL, 2011.

Figura 4 – Imagem ampliada de uma região com corrosão alveolar em um vaso de pressão

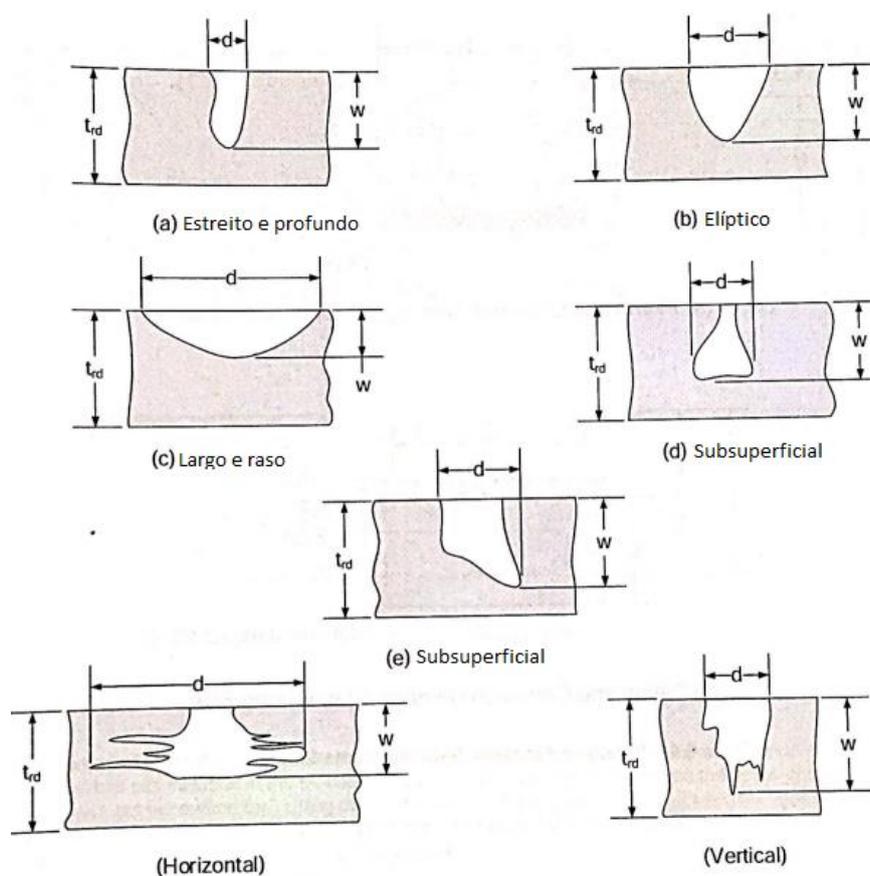


Fonte: Site da Materials Performance²

No caso de publicações internacionais, tais como as normas API 579 e BS 7910, bem como a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) ASTM G46-94, as três formas de corrosão descritas acima são chamadas de *pitting corrosion* (corrosão por pite). Desta forma, na continuação do presente trabalho tratar-se-á apenas por corrosão por pite, ao se referir a qualquer uma das formas mencionadas. Alguns exemplos de discontinuidades do tipo pite estão expostos na Figura 5.

² Disponível em: <<http://www.materialsperformance.com/articles/coating-linings/2015/12/pitting-repairs-for-high-temperature-high-pressure-process-vessels>> Acesso em out. 2018.

Figura 5 – Geometria típica de corrosão por pite



Fonte: Adaptado de API/ASME, 2016.

Corrosão por pite é a forma mais comum de corrosão localizada e é considerada mais perigosa que a corrosão uniforme, graças a dificuldade para detectar, prever, e projetar visando a prevenção. (ROBERGE, 2008). Devido a suas características geométricas, um pite com diâmetro pequeno e profundidade grande pode não ser detectado através de uma inspeção visual, e, caso chegue a atravessar a parede interna de um vaso de pressão poderá causar falha no equipamento.

Segundo Roberge (2008), os seguintes fatores contribuem para a iniciação e propagação da corrosão por pite:

- Danos localizados mecânicos ou químicos em um filme óxido protetor.
- Fatores químicos da água que possam causar degradação de uma camada passivadora, como acidez, baixas concentrações de oxigênio dissolvido, que tendem a tornar um filme óxido protetor menos estável, e altas concentrações de cloreto.

- Dano localizado referente a má aplicação de revestimentos.
- Presença de não-uniformidades na estrutura do metal, como por exemplo inclusões não metálicas.

A corrosão por pite é avaliada de acordo com suas características geométricas. Para isso, define-se como parâmetros para a caracterização do pite: Densidade (quantidade de pites por unidade de área), a profundidade e o diâmetro dos pites. Estes parâmetros podem ser estimados durante a inspeção visual, com o auxílio de instrumentos como paquímetros, ou utilizando gráficos como o exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico utilizado para caracterização de pite.

	Densidade	Tamanho	Profundidade
1	 2,500/m ²	 0.5 mm ²	 0.4 mm
2	 10,000/m ²	 2.0 mm ²	 0.8 mm
3	 50,000/m ²	 8.0 mm ²	 1.6 mm
4	 100,000/m ²	 12.5 mm ²	 3.2 mm
5	 500,000/m ²	 24.5 mm ²	 6.4 mm

Fonte: ROBERGE, 2008.

Um fator relevante que afeta a corrosão por pite é a relação entre a pequena área do ânodo e grande área do cátodo. Quanto maior a quantidade de pites ou quanto maior os pites sobre a superfície, menor será a velocidade de penetração. Isso ocorre porque

pites adjacentes têm que partilhar o mesmo cátodo disponível, reduzindo, portanto, a corrente disponível para o crescimento do pite. (LOMBARDI,1993).

2.2.3 Taxa de corrosão

O embasamento teórico para relacionar a agressividade da corrosão à deterioração de uma superfície metálica, e, portanto, de grande utilidade para se fazer a estimativa da vida útil de um vaso de pressão, é fornecido através da taxa de corrosão, ou velocidade de corrosão.

A velocidade média de corrosão pode ser obtida pela medida da diferença de peso apresentada pelo material metálico ou pela determinação da concentração de íons metálicos em solução durante intervalos de tempo de exposição ao meio corrosivo. (GENTIL, 2011).

O monitoramento da corrosão pode ser definido como uma forma sistemática de medição da corrosão ou da degradação de um determinado componente de um equipamento, com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e das suas consequências. (HMSO, 1978).

Segundo Almeida (2012), são três as unidades comumente utilizadas para expressar a taxa de corrosão, relacionando-as à variação de massa.

- Miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia, *mdd*.
- Polegadas de penetração por ano, *ipy*.
- Milésimo de polegada de penetração por ano, *mpy*

Em que,

$$mpy = \frac{\textit{perda de peso} \cdot 534}{\textit{área} \cdot \textit{tempo} \cdot \textit{densidade do metal}} \quad (2.6)$$

As relações entre essas unidades são:

$$\begin{aligned} ipy &= mdd \cdot \frac{0,00144}{d} \\ mdd &= 694 \cdot d \cdot ipy \\ mpy &= \frac{mdd \cdot 1,44}{d} \end{aligned}$$

Onde *d* é a densidade do material em gramas por centímetro cúbico.

2.2.4 Corrosão e integridade estrutural

As causas mais comuns no que se refere a danos e falhas envolvendo armazenamento e transporte de combustíveis são interferência externa, causada por dano mecânico, e corrosão. (COSHAM; MACDONALD, 2007). Justifica-se, então, o desenvolvimento de um método de avaliação da integridade estrutural para equipamentos de processo submetidos a esses tipos de mecanismos de falha.

2.3 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS PARA AVALIAR A INTEGRIDADE ESTRUTURAL

2.3.1 Conceitos

Conforme já discutido anteriormente, eram corriqueiros os acidentes envolvendo equipamentos de processo, como máquinas a vapor no início da revolução industrial, século XIX, ou vasos de pressão e caldeiras no século XX. Como não havia um consenso técnico para diretrizes de projeto desses equipamentos, geralmente não se empregava o material ideal, ou utilizavam-se materiais com defeitos de fabricação. Iniciou-se então o desenvolvimento de códigos de projeto de vasos de pressão e caldeiras por comissões especializadas, buscando mitigar os erros discutidos.

De acordo com Anderson e Osage (2001), os códigos e normas de projeto de equipamentos, como o código ASME VIII, contemplam procedimentos de projeto, fabricação, inspeção e testes de vasos de pressão. Não estão abordados o fato de que esses equipamentos degradam conforme o tempo de serviço, e, conseqüentemente, descontinuidades devido a degradação podem ser observadas em inspeções subseqüentes.

Donato (2008) diz que os critérios de aceitação das normas de projeto são definidos de modo arbitrário, e que no caso de equipamentos novos, apenas comparam as dimensões das descontinuidades encontradas com os limites adotados. Além disso, os códigos de vasos de pressão não reconhecem danos como a redução de espessura localizada causada por processos corrosivos, estando reconhecidos apenas corrosão uniforme, fratura frágil, fadiga e fluência.

Muitas das ocorrências consideradas inaceitáveis pelos códigos de projeto são, na verdade, irrelevantes para a integridade do equipamento, podendo permanecer no equipamento sem a necessidade de realização de reparos. (MARTINS, 2009).

É no sentido de analisar a integridade estrutural do equipamento que surgem as normas de adequação ao serviço, ou *fitness for service (FFS)*. Para Janelle (2005), os objetivos dos métodos de adequação ao serviço são de garantir a aceitação de um nível de confiabilidade, prover uma previsão precisa da vida útil remanescente e ajudar a otimizar a manutenção e inspeção de equipamentos com presença de descontinuidades que ainda estão em serviço.

Segundo Coelho (2018, apud MILNE; DOWLING, 2003), independentemente do método, um estudo crítico de engenharia deve se basear em:

- Identificar o tipo de defeito.
- Estabelecer os dados essenciais do equipamento (tais como propriedades do material, condições de carregamento, condições de operação).
- Caracterizar a descontinuidade por classe, tamanho, forma e distribuição.
- Avaliar os mecanismos de deterioração do componente, e a taxa de crescimento da descontinuidade.
- Estimar consequências de uma possível falha.
- Realizar análises sensitivas.

2.3.2 Histórico e aplicações do procedimento

De acordo com Anderson e Osage (2001), o ímpeto de desenvolver uma prática de adequação ao serviço que pudesse ser referenciado pela *American Petroleum Institute (API)* foi provido por um comitê industrial administrado pelo *Material Properties Council (MPC)*. A metodologia, aliada aos códigos de inspeção da API, deveria garantir a integridade do equipamento quando este estivesse operando com descontinuidades, e deveria estar em conformidade com os órgãos governamentais americanos que tratam da segurança do trabalho.

Uma revisão das práticas já utilizadas foi feita pelo MPC em 1991 como marco inicial para o desenvolvimento da nova prática. Constatou-se que, na época, muitas empresas possuíam suas metodologias próprias, nenhuma reconhecida pelos órgãos

públicos americanos, e que muitos tipos de descontinuidades não estavam sendo cobertos. Assim, em 2000 foi publicada a primeira edição da norma API 579. Em 2007, após diversas revisões e a entrada do comitê da ASME, a norma passou a ser denominada API 579-1/ ASME FFS-1, cuja revisão mais atualizada foi publicada em 2016.

A aplicação desse método de avaliação de adequação ao serviço deve ser utilizada para avaliar equipamentos fabricados seguindo os seguintes códigos de projeto (OSAGE; JANELLE., 2008):

- ASME B &P, Seção VIII, Divisão 1
- ASME B &P, Seção VIII, Divisão 2
- ASME B &P, Seção I
- ASME B31.1 Piping Code
- ASME B31.3 Piping Code
- ASME B31.4 Piping Code
- ASME B31.8 Piping Code
- ASME B31.12 Piping Code
- API 650
- API 620
- API 530

2.3.3 API 579-1/ASME FFS-1 - Organização e avaliação

A norma API 579-1/ASME FFS-1 está estruturada em quatorze partes, sendo as duas primeiras partes referentes a introdução e procedimentos. A partir da terceira parte, são descritos os procedimentos de avaliação com base nas descontinuidades comumente encontradas em vasos de pressão. Conforme Tabela 1, são eles:

Tabela 1 – Tipos de mecanismos de dano e parte correspondente na norma API 579.

TIPO DE MECANISMO DE DANO	PARTE CORRESPONDENTE NA API 579
Fratura Frágil	Parte 3
Perda Geral de Metal	Parte 4
Perda Localizada de Metal	Parte 5
Corrosão Por Pite	Parte 6

(Continua)

(Continuação)

TIPO DE MECANISMO DE DANO	PARTE CORRESPONDENTE NA API 579
Bolhas de Hidrogênio e Danos Associados a HIC e SOHIC	Parte 7
Desalinhamento de Solda e Distorções no Casco	Parte 8
Falha Tipo Trinca	Parte 9
Componentes na Região de Fadiga	Parte 10
Dano por Incêndio	Parte 11
Entalhe e Entalhe-Goiva	Parte 12
Laminações	Parte 13
Dano por Fadiga	Parte 14

Fonte: Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1, 2016.

Para cada tipo de descontinuidade são apresentados três níveis de avaliação. Em geral, cada nível de avaliação fornece um balanço entre conservadorismo, quantidade de informações necessárias para avaliação, habilidade requerida para o profissional avaliador e complexidade de análise. (ANDERSON; OSAGE, 2001).

Também é observado que a complexidade e a quantidade de dados necessários aumentam com base nos níveis de avaliação, enquanto que o conservadorismo diminui. O fluxograma no Anexo B descreve o procedimento recomendado para a avaliação de um vaso de pressão sujeito a perda geral de metal.

2.3.4 API 579-1/ASME FFS-1 Parte 4 – Perda geral de metal

2.3.4.1 Generalidades do método

Para Almeida (2012), a avaliação correspondente a parte 4 da API 579-1/ASME FFS-1 pode ser usada para todas as formas de perda de metal em geral (uniforme ou local) que excedam, ou que estejam previstos para exceder a margem de corrosão antes da próxima inspeção programada, sendo esta perda na região interna ou externa do componente. O procedimento de avaliação utilizado leva em consideração os tipos de dados relativos as espessuras disponíveis (leituras de espessuras pontuais ou perfis de espessura), o tipo de perda de metal (uniforme ou local), a espessura de parede mínima

exigida e o grau de conservadorismo exigido. Como condição para a aplicação desta parte, o componente não poderá estar operando na faixa de fluência do material e deve possuir temperatura de projeto abaixo da faixa de fluência.

Segundo a API 579-1/ASME FFS-1 (2016), o procedimento presente na parte quatro da norma contempla componentes pressurizados submetidos a perda geral de metal, resultado de um processo de corrosão, erosão, ou ambos, e pode ser usado para qualificar o componente para operação continuada, caso os critérios de aceitação sejam satisfeitos, ou para reclassificação (estabelecimento de uma Pressão Máxima de Trabalho Admissível, PMTA, reduzida), caso os critérios de aceitação não sejam satisfeitos.

Nesse último caso, para componentes pressurizados, como vasos de pressão, serão fornecidos métodos de cálculo para uma PMTA reduzida e temperatura coincidente. No caso de componentes de armazenamento, como tanques, serão fornecidos métodos de cálculo para uma nova Altura Máxima de Preenchimento (MFH) e temperatura coincidente.

2.3.4.2 Tipos de componentes

Conforme exposto pela API 579-1/ASME FFS-1 (2016), para efeito de aplicação desta parte, os componentes são divididos em tipos:

- a) Tipo A: São componentes que possuem equações de projeto que relacionam especificamente a pressão e carregamentos suplementares a espessuras de parede requeridas, e que a combinação da pressão com os carregamentos suplementares não seja fator determinante para a espessura de parede requerida, isto é, que a espessura de parede seja baseada apenas na pressão.
- b) Tipo B, Classe 1: São componentes que possuem mesma geometria e condições de carregamento que os do Tipo A, porém a combinação de cargas suplementares com a pressão pode ser fator determinante para a espessura de parede requerida.
- c) Tipo B, Classe 2: São componentes que não possuem uma equação de projeto que especificamente relacione a pressão e/ou carregamentos a uma espessura de parede requerida. Esses componentes possuem um código de projeto para determinar uma configuração aceitável.

- d) Tipo C: São componentes que não possuem uma equação de projeto que especificamente relacione a pressão e/ou carregamentos a uma espessura de parede requerida, e, além disso não possuem código de projeto para determinar tensões locais.

O nível 1 de avaliação pode ser utilizado para componentes do Tipo A, sujeitos a pressão interna ou externa. O nível 2 pode ser utilizado para componentes Tipo A e Tipo B, sujeitos a pressão interna, externa, carregamentos suplementares, e suas combinações. O nível 3 de avaliação pode ser utilizado quando os níveis 1 e 2 não são aplicáveis ou quando os níveis anteriores fornecerem resultados excessivamente conservativos.

2.3.4.3 Dados necessários

De acordo com a API 579-1/ASME FFS-1 (2016), é necessário fazer o levantamento do histórico de manutenção e operação do equipamento, e dos dados de projeto do equipamento original, tais como material de fabricação, tensão admissível, pressão e temperatura de projeto, diâmetro interno, espessura nominal, tolerância futura de corrosão, eficiência da solda. Além dessas informações, serão necessárias as leituras de espessura na região onde a perda de metal ocorreu. Essas, podem ser feitas de duas maneiras:

- a) Leitura de Espessuras Pontuais (PTR): Podem ser utilizadas para caracterizar a perda de metal no componente se não houver diferenças significativas nos valores encontrados.
- b) Perfis de espessura: Devem ser utilizados quando houver variação significativa nos valores encontrados. Nesse caso, a perda de metal pode ser localizada e os perfis de espessura (leituras de espessuras em uma grade prescrita) devem ser utilizados para caracterizar a espessura restante e o tamanho da região de perda de metal.

As quantidades de espessuras utilizadas nessa parte para a avaliação da perda de metal são a média aritmética e os valores mínimos das espessuras medidas. Caso as leituras das espessuras indiquem que a perda de metal é geral, os procedimentos dessa parte fornecerão avaliações adequadas. Se a perda de metal for localizada e os perfis de

espessura forem encontrados, os procedimentos desta parte podem fornecer resultados conservativos, e a aplicação da Parte 5 fornecerá resultados mais adequados.

Caso leituras pontuais sejam utilizadas para a avaliação, a suposição de perda uniforme de metal deve ser confirmada. Um mínimo de 15 leituras de espessura devem ser feitas a menos que o nível do ensaio não destrutivo utilizado possa ser usado para confirmar que a perda de metal é geral. Leituras adicionais podem ser requeridas, baseado no tamanho e detalhes de construção do componente, e natureza do ambiente.

Caso perfis de espessura sejam utilizados para a avaliação, o seguinte procedimento deverá ser feito para determinação dos Perfis de Espessura Crítica (CTPs):

- a) Determinar e marcar localização, orientação e comprimento dos planos de inspeção em função das regiões de perda de metal. No caso de cascos de vasos de pressão, os planos de inspeção críticos são meridionais (longitudinais) caso as tensões circunferenciais sejam predominantes, e circunferenciais caso tensões longitudinais sejam predominantes.
- b) Determinar a Espessura Uniforme Longe da Região de Perda de Metal t_{rd} .
- c) Medir e registrar as leituras de espessura nos intervalos ao longo de cada plano de inspeção e determinar a espessura mínima medida (t_{mm}). O espaçamento entre leituras de espessuras deve permitir uma caracterização precisa do perfil de espessura.
- d) Determinar os CTPs nas direções meridionais e circunferenciais. Isto é feito projetando a espessura mínima remanescente para cada posição ao longo de todos os planos de inspeção paralelos em um plano comum. O comprimento do perfil é estabelecido pela determinação dos pontos finais onde a espessura de parede é maior que t_{rd} nas direções meridional e circunferencial.

2.3.4.4 Técnicas de avaliação e critérios de aceitação

Conforme a API 579-1/ASME FFS-1 (2016), caso a perda de metal seja menor do que tolerância especificada de corrosão/erosão e uma espessura adequada esteja disponível para a Taxa de Corrosão Futura Admissível (FCA), não há necessidade de outra ação a não ser o registro das informações e dos dados levantados. Caso contrário, uma avaliação será necessária, de acordo com os níveis de avaliação.

A avaliação de nível 1 para caracterizar a perda de metal se inicia com a determinação da espessura mínima, t_{mm} , da espessura medida média, t_{am} , e o Coeficiente de Variação (COV), que é calculado da seguinte forma:

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left(\frac{S}{N-1} \right)^{0,5} \quad (2.7)$$

Onde,

$$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i} \quad (2.8)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (t_{rd,i} - t_{am})^2 \quad (2.9)$$

Em que $t_{rd,i}$ são as N leituras de espessuras pontuais (PTR). Caso o valor do COV seja menor ou igual a 0,1 então a aceitabilidade para a continuação de operação sem parada para reparos do vaso de pressão pode ser estabelecida conforme os critérios expostos adiante.

Para casos em que o COV seja maior que 0,1 deverá ser considerada a avaliação segundo perfis de espessura, que devem ser definidos conforme descrito no item 2.3.4.3., juntamente com os CTPs. Após definição dos perfis, deve-se obter os valores de espessura de parede, t_{ml} , e diâmetro interno do vaso de pressão incluindo a FCA, D_{ml} , segundo equações:

$$t_{ml} = t_{nom} - FCA \quad (2.10)$$

$$D_{ml} = D + 2 \cdot FCA \quad (\text{para FCA interno}) \quad (2.11)$$

$$D_{ml} = D \quad (\text{para FCA externo}) \quad (2.12)$$

Onde D é o diâmetro interno do vaso de pressão e t_{nom} é a espessura nominal.

Deve-se calcular a taxa de espessura remanescente, R_t , e o comprimento da espessura média L , usando as equações:

$$R_t = \left(\frac{t_{mm} - FCA}{t_{ml}} \right) \quad (2.13)$$

$$L = Q \sqrt{D_{ml} \cdot t_{ml}} \quad (2.14)$$

Onde a determinação do parâmetro Q encontra-se no Anexo A.

Determina-se então as espessuras medidas médias, t_{am} , baseadas no parâmetro L , e sendo t_{am}^s também baseada no CTP longitudinal e t_{am}^c também baseada no CTP circunferencial. Com base nesses valores a continuação sem parada para reparos do vaso de pressão pode ser garantida, caso atenda os seguintes critérios, apresentado na Tabela 2:

Tabela 2 – Critérios de aceitação baseados no Nível 1 de avaliação.

PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
Espessura média medida utilizando leituras pontuais de espessura (PRT)	$t_{am} - FCA \geq t_{min}^c$
Espessura média medida utilizando perfis críticos de espessura (CTP)	$t_{am}^s - FCA > t_{min}^c$ $t_{am}^c - FCA > t_{min}^L$
Espessura medida mínima	$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5t_{min}; t_{lim}]$ $t_{min} = \max[t_{min}^c; t_{min}^L]$ $t_{lim} = \max[0,2t_{nom}; 2,5mm]$

Fonte: Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1, 2016.

Onde t_{min}^c é a espessura mínima requerida do casco baseada em tensões circunferenciais, R é o raio interno do componente, P é a pressão interna S a tensão admissível do material do vaso, e E a eficiência de solda.

Para $P \leq 0,385 \cdot SE$

$$t_{min}^c = \frac{PR}{SE - 0,6P} \quad (2.15)$$

Caso contrário,

$$t_{min}^c = R \left[\exp\left(\frac{P}{SE}\right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

Na eventual possibilidade de o equipamento não atender os critérios de aceitação, deve-se executar a avaliação segundo o Nível 2, ou opta-se por reclassificar, reparar ou substituir o vaso de pressão.

No caso de reclassificação, para garantir a continuidade de funcionamento seguro do vaso de pressão, recomenda-se a redução da PMTA, para um valor $PMTA_r$, onde o índice r indica a redução, e o índice 1 indica de nível 1.

Caso $P \leq 0,385 \cdot SE$:

$$PMTA_{r,1} = \frac{SE t_{rr}}{R + 0,6 t_{rr}} \quad (2.17)$$

Caso $P > 0,385 \cdot SE$:

$$PMTA_{r,1} = SE \cdot \ln \left[\frac{R + t_{rr}}{R} \right] \quad (2.18)$$

Onde $t_{rr} = t_{am}^s - FCA$ para uma nova PMTA baseada nos perfis de espessura circunferenciais, ou $t_{rr} = t_{am}^c - FCA$ caso a PMTA seja baseada nos perfis de espessura longitudinais.

A avaliação de nível 2 introduz um novo parâmetro, o Fator de Força Restante, RSF_a . Esse fator é definido como:

$$RSF_a = \frac{L_{DC}}{L_{UC}} \quad (2.19)$$

Onde L_{DC} é a carga de ruptura do componente danificado (com falhas), e L_{UC} é a carga de ruptura para o componente sem falhas.

Para efeito de cálculo, a API 579-1/ASME FFS-1 (2016) recomenda o valor do RSF_a como 0,9. Utilizando esse fator, a continuação sem parada para reparos do vaso de pressão pode ser garantida, caso atenda os seguintes critérios, mostrados na Tabela 3, que são análogos ao do nível 1.

Tabela 3 – Critérios de aceitação baseados no Nível 2 de avaliação.

PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
Espessura média medida utilizando leituras pontuais de espessura (PRT)	$t_{am} - FCA \geq \max[t_{min}^C, t_{min}^L]$
Espessura média medida utilizando perfis críticos de espessura (CTP)	$t_{am}^S - FCA > t_{min}^C$ $t_{am}^C - FCA > t_{min}^L$
Espessura medida mínima	$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5t_{min}; t_{lim}]$ $t_{min} = \max[t_{min}^C; t_{min}^L]$ $t_{lim} = \max[0,2t_{nom}; 2,5mm]$

Fonte: Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1, 2016.

Onde,

Para $P \leq 0,385 \cdot SE$

$$t_{min}^C = \frac{PR \cdot RSF_a}{SE - 0,6P} \quad (2.20)$$

Caso contrário,

$$t_{min}^C = R \left(\exp \left[\frac{P \cdot RSF_a}{SE} \right] - 1 \right) \quad (2.21)$$

Analogamente ao nível 1, caso o equipamento não atenda os critérios de aceitação, pode-se reclassificar o vaso fazendo uma nova redução da PMTA, reparar, ou substituir o equipamento, ou fazer a avaliação conforme o nível 3.

Para efetuar o cálculo da PMTA reduzida, utiliza-se a seguinte equação:

Caso $P \leq 0,385 \cdot SE$:

$$PMTA_{r,2} = \frac{SE \cdot t_{rr} / RSF_a}{R + 0,6 \cdot t_{rr} / RSF_a} \quad (2.22)$$

Caso $P > 0,385 \cdot SE$:

$$PMTA_{r,2} = SE \cdot \ln \left[\frac{R + t_{rr}/RSF_a}{R} \right] \quad (2.23)$$

A avaliação de nível 3 envolve análise numérica utilizando simulação computacional. Segundo ALMEIDA (2012), os métodos utilizados para calcular tensões em um componente incluem método dos elementos finitos, elementos de contorno, método das diferenças finitas ou manuais de solução, sendo a primeira tipicamente usada.

A API 579-1/ASME FFS-1 não determina qual método deverá ser utilizado, deixando à critério do profissional responsável pela análise. No presente trabalho, a análise computacional utilizada no presente trabalho será com base no Método dos Elementos Finitos (MEF), que de acordo com Kim e Sankar (2011) se baseia na discretização do domínio em subdomínios, que são conectados por nós e que recebem uma função de interpolação. O procedimento para a análise numérica de um vaso de pressão de acordo com a API 579-1/ASME FFS-1 será detalhado na seção seguinte.

2.3.5 Análise numérica

Os procedimentos de análises presentes na API 579-1/ASME FFS-1 contemplam os seguintes modos de falha:

- Colapso Plástico
- Falha Local
- Colapso por Flambagem

Toda a análise é feita com base na norma ASME PV&B Seção VIII Divisão 2 Parte 5, que tem como tema o projeto de vasos de pressão a partir de análise numérica.

No presente trabalho a avaliação será feita conforme o modo de falha de colapso plástico, já que este contempla a falha esperada para o equipamento, é em geral o mais rigoroso e o que necessita menor quantidade de dados adicionais. De acordo com ASME (2015), a proteção contra o colapso plástico pode ser avaliada conforme três métodos de análise, descritos como:

- a) Método da tensão elástica: Nesse método, as tensões são calculadas usando uma análise elástica, classificadas em categorias e limitadas de acordo com a tensão admissível do material de forma que não ocorra colapso plástico.

- b) Método da carga-limite: É efetuado um cálculo para determinar um limite inferior de uma carga-limite de um componente. A carga admissível deste componente é estabelecida pela aplicação de fatores de projeto à carga-limite de tal modo que deformações plásticas brutas não ocorram.
- c) Método da tensão elastoplástica: Uma carga de colapso é obtida de uma análise elastoplástica considerando a carga aplicada e as características de deformação do componente. A carga admissível no componente é estabelecida pela aplicação de fatores de projeto à carga de colapso plástico.

O método escolhido para a análise foi o da tensão elástica. Conforme descrito anteriormente, para avaliar o equipamento segundo esse método, os resultados linearizados em relação a seção transversal das tensões elásticas do componente devem ser classificados e comparados com um valor definido como critério de aceitação (PRUETER; BROWN, 2015). As classificações das tensões são as seguintes, conforme ASME (2015):

- a) Tensão Primárias de Membrana Gerais (Pm): Tensões primárias médias em relação a seção transversal produzidas por esforços mecânicos. Excluem-se concentrações e descontinuidades.
- b) Tensão Primárias de Membrana Locais (Pl): Tensões médias em relação a seção transversal produzidos por esforços mecânicos. Considera-se descontinuidades e excluem-se concentrações.
- c) Tensões Primárias de Flexão (Pb): Componente da tensão primária proporcional à distância do centroide do sólido, produzida por esforços mecânicos. Excluem-se descontinuidades e concentrações.
- d) Tensões Secundárias (Q): Tensão de equilíbrio necessária para garantir a continuidade da estrutura. Ocorre em descontinuidades estruturais. Podem ser causadas por esforços mecânicos ou expansão térmica diferencial. Exclui concentração de tensões.
- e) Tensões de Pico (F): Incremento adicionado às tensões primárias e secundárias devido a concentrações.

Segundo Telles (1996), as tensões primárias são necessárias para satisfazer o equilíbrio estático entre forças e momentos internos e externos ao material, e tensões secundárias são resultantes de restrições geométricas do próprio vaso, em decorrência do

fato de as diversas partes do vaso não serem inteiramente livres para se deformar ou dilatar. Além disso, quando um componente tem um diâmetro muito grande em relação a espessura, as tensões de flexão são pequenas, e considera-se a tensão máxima na parede como a tensão de membrana. A tabela presente no Anexo C apresenta alguns exemplos de classificação, de acordo com a ASME, e será usada para classificar as tensões no estudo de caso.

Os critérios de aceitação definidos pela ASME (2015), onde S é a tensão admissível, podem ser vistos nas Tabelas 4 e 5, a seguir.

Tabela 4 – Critérios de aceitação com base na categorização de tensões, considerando pressões de projeto.

CATEGORIA DE TENSÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
Primária de Membrana Geral (P_m)	$P_m < S$
Primária de Membrana Local (P_l)	$P_l < 1,5S$
Primárias de Membrana + Flexão ($P_l + P_b$)	$P_l + P_b < 1,5S$

Fonte: Adaptado de ASME, 2015.

Tabela 5 – Critérios de aceitação com base na categorização de tensões, considerando pressões de operação.

CATEGORIA DE TENSÃO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
Primárias e Secundárias ($P_l + P_b + Q$)	$P_l + P_b + Q < 3S$

Fonte: Adaptado de ASME, 2015.

Conforme observado nos critérios de aceitação estabelecidos pela ASME, para uma análise considerando o modo de falha de colapso plástico, as tensões de pico, F , não são consideradas. Telles (1996) afirma que embora essas tensões possam atingir valores elevados, em geral não são perigosas pelo fato de atuarem em áreas muito pequenas, portanto, as deformações causadas por estas podem ser desprezadas para análise de falhas estáticas. É importante salientar, porém, que essas tensões de pico são consideradas

quando a análise é feita com base no modo de falha por fadiga, visto que essas tensões podem dar origem a trincas por fadiga. Apesar do modo de falha por fadiga ser contemplado pela ASME Seção VIII Divisão 2 Parte 5, está não é abordada na Parte 4 da API 579-1/ASME FFS-1, e, portanto, não será discutida.

3 METODOLOGIA

3.1 ESTUDO DE CASO

Para proceder com a avaliação estrutural é preciso definir o equipamento que será estudado, bem como o tipo de descontinuidade observado. O procedimento básico para proceder com a metodologia pode ser consultado no Apêndice A. Nesse trabalho, o objeto de estudo é um vaso de pressão cilíndrico de uma indústria de combustíveis, que apresenta descontinuidade do tipo corrosão por pite na região externa do costado, conforme a Figura 7, a seguir:

Figura 7 – Detalhe da região com presença de corrosão por pite.



Fonte: Autor, 2018.

Foi realizado um levantamento das informações relevantes pertinentes ao vaso, tais como características geométricas, propriedades mecânicas do material do costado, etc. Esses dados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados do vaso analisado.

PARÂMETRO	VALOR
TAG	ATQ 107
Material de fabricação	ASTM A516 Gr 65
Código de projeto	ASME Seção VIII Div 1
Fluido de trabalho	GLP
Temperatura de projeto	100 °C
Tensão Admissível, S (Conforme ASME)	128 MPa
Diâmetro interno	2000 mm
Espessura do costado	10,0 mm
FCA	2,0 mm
Pressão de projeto	10 kgf/cm ² = 0,98 MPa
PMTA	17,2 kgf/cm ² = 1,69 MPa

Fonte: Autor, 2018.

3.2 MÉTODO

Conforme sugerido pela norma API 579-1/ASME FFS-1, foi utilizada a técnica de ultrassom para realizar as medições de espessura na parede do costado do vaso de pressão. Para isto, empregou-se o medidor de espessura da *Krautkramer* modelo DM4 DL, como o da Figura 8, devidamente calibrado. Como a perda de metal por corrosão se localiza na área externa do costado do vaso de pressão, o ensaio de ultrassom foi realizado na região interna do vaso, a fim de garantir o acoplamento do cabeçote do instrumento. Por exigência da NR 33, o operador de ultrassom deve ter qualificação para trabalho em espaços confinados.

Figura 8 – Instrumento de medição de espessura utilizado.



Fonte: Autor, 2018.

Para definir os pontos de medição de espessura na região de perda de metal do vaso, foi definida uma grade com espaçamento de 15 mm tanto na direção longitudinal, como na circunferencial. Essa grade será utilizada para realização do CTP do vaso de pressão. Os valores medidos encontram-se na Tabela 7, a seguir. As medições com valor de 10 mm representam a espessura nominal.

Tabela 7 – Valores relativos a medição de espessura, e CTPs calculados.

Planos de Inspeção Longitudinais	PLANOS DE INSPEÇÃO CIRCUNFERENCIAIS								CTP Circunferencial
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
M1	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10
M2	10,00	9,81	9,60	9,50	9,95	10,00	10,00	10,00	9,50
M3	10,00	9,14	8,75	9,52	9,87	10,00	10,00	10,00	8,75
M4	10,00	9,72	9,40	9,48	8,64	9,69	10,00	10,00	8,64
M5	10,00	9,93	9,43	8,81	9,04	9,48	9,55	10,00	8,81
M6	10,00	10,00	9,88	9,82	9,53	9,87	10,00	10,00	9,53
M7	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,92	10,00	10,00	9,92
M8	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
CTP Longitudinal	10,00	9,14	8,75	8,81	8,64	9,48	9,55	10,00	

Fonte: Autor, 2018.

Para realizar a avaliação da integridade estrutural conforme a norma API 579-1/ASME FFS-1, foi desenvolvida uma planilha em *Excel* capaz de calcular todos os parâmetros necessários a partir dos dados do material e das condições de operação, conforme descrito na seção 2.3.4.3. A validação da planilha foi feita comparando-se os resultados obtidos com os do exemplo 2 da seção 4 do manual de problemas da API 579-1/ASME FFS-1, os parâmetros podem ser vistos na Tabela 8, conforme API 579-2/ASME FFS-2 (2009), e os resultados obtidos na Tabela 9:

Tabela 8 – Parâmetros do problema-exemplo do manual da API 579

PARÂMETRO DO EXEMPLO	VALOR
Material de fabricação	AS-516 Gr 70
Temperatura de projeto	350 °F
Tensão Admissível, S	20000 psi
Diâmetro interno	48 in
Espessura do costado	0,75 in
FCA	0,1 in
Pressão de projeto	300 psi

Fonte: Adaptado de API 579-2/ASME FFS-2, 2009.

Tabela 9 – Comparação de resultados para validação da planilha de cálculos

PARÂMETRO	VALOR DE REFERÊNCIA	VALOR ENCONTRADO	ERRO (%)
R_c [in]	24,1	24,1	0
t_{min}^c [in]	0,43	0,43	0
t_{min}^L [in]	0,212	0,212	0
t_{min} [in]	0,43	0,43	0
t_{ml} [in]	0,65	0,65	0
R_t [–]	0,4	0,4	0
Q [–]	0,4581	0,4581	0
L [in]	2,564	2,559	0,195
Área 1 [in ²]	1,093	1,090	0,274
Área 2 [in ²]	1,093	1,090	0,274
t_{am}^c [in]	0,426	0,426	0
t_{am}^s [in]	0,426	0,426	0

(Continua)

(Continuação)

PARÂMETRO	VALOR DE REFERÊNCIA	VALOR ENCONTRADO	ERRO (%)
$t_{lim} [in]$	0,15	0,15	0
$\max[0,5t_{min}; t_{lim}] [in]$	0,215	0,215	0
$t_{min}^L [in]$	0,212	0,212	0

Fonte: Autor, 2018.

Baseando-se nos valores baixos dos erros encontrados, pode-se considerar que a planilha retorna resultados confiáveis, e, portanto, será utilizada para obter os resultados do caso em estudo.

3.3 MODELAGEM DO VASO DE PRESSÃO

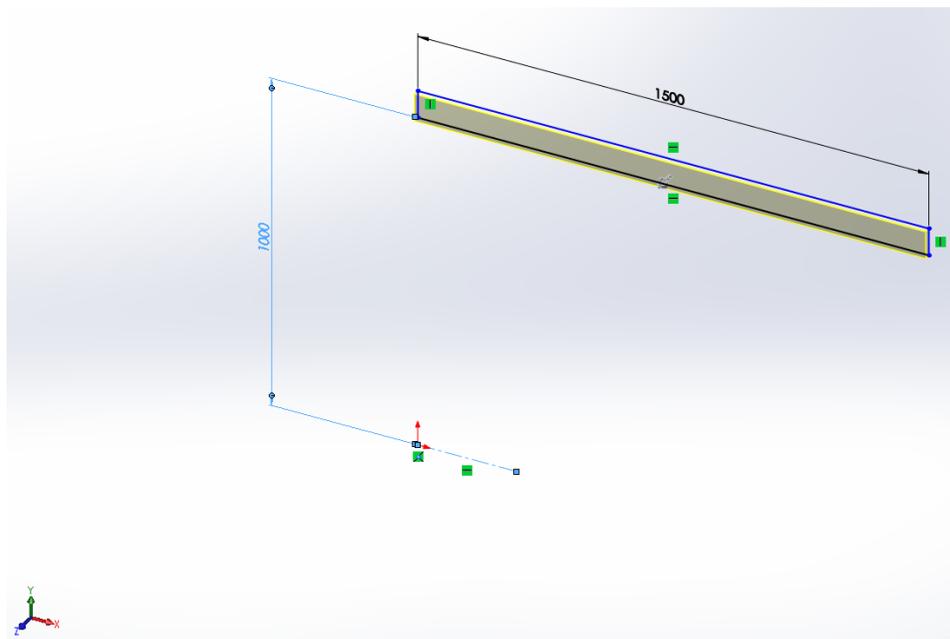
Para desenvolver o modelo para efetuar a análise numérica do equipamento, foi utilizado o *software* SolidWorks para fazer o desenho 3D do anel que representa o vaso de pressão. Inicialmente desenhou-se um retângulo, correspondendo a seção transversal da linha M1 da Tabela 5, a uma distância igual ao raio interno, 1000 mm, com altura igual a espessura do costado, 10 mm, e largura de 1500 mm, escolhida para que as tensões obtidas na região do meio do anel não sofram influência das tensões de fixação, de acordo com o princípio de Saint-Venant. Esse retângulo foi então submetido a função “ressalto revolucionado” do SolidWorks, tendo como referência de revolução o eixo X, conforme Figura 9, de um ângulo correspondente ao espaçamento entre medições de espessura, 15 mm, conforme descrito na seção 3.2. Para obter o ângulo que representa esse espaçamento, utilizou-se a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{Z}{R} \quad (3.1)$$

Onde Z é o espaçamento entre medições de espessura, e R o raio interno do vaso, de forma que:

$$\alpha = \frac{Z}{R} = \frac{15}{1000} = 0,015 \text{ rad} \approx 1^\circ$$

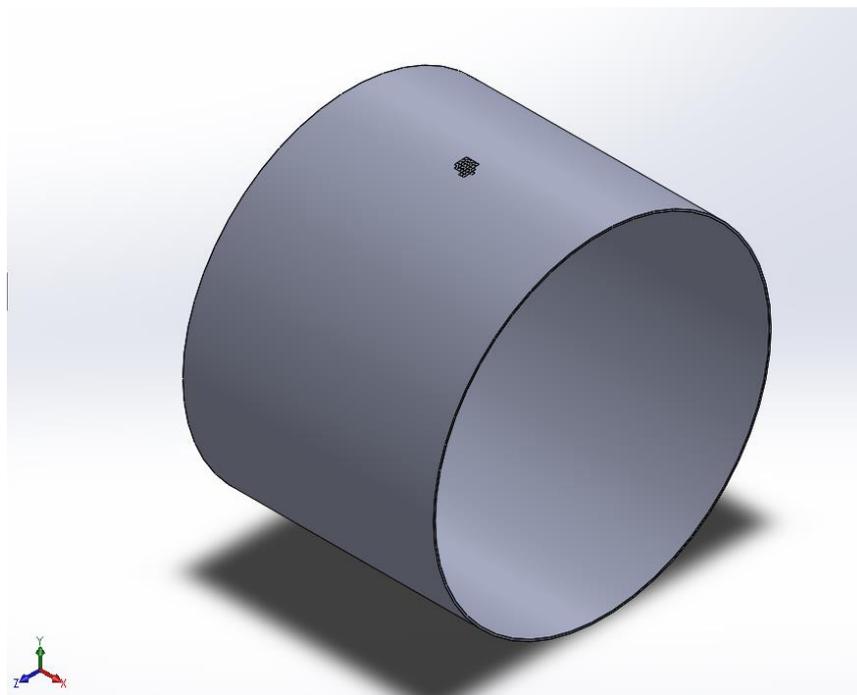
Figura 9 – Procedimento para modelagem do vaso de pressão.



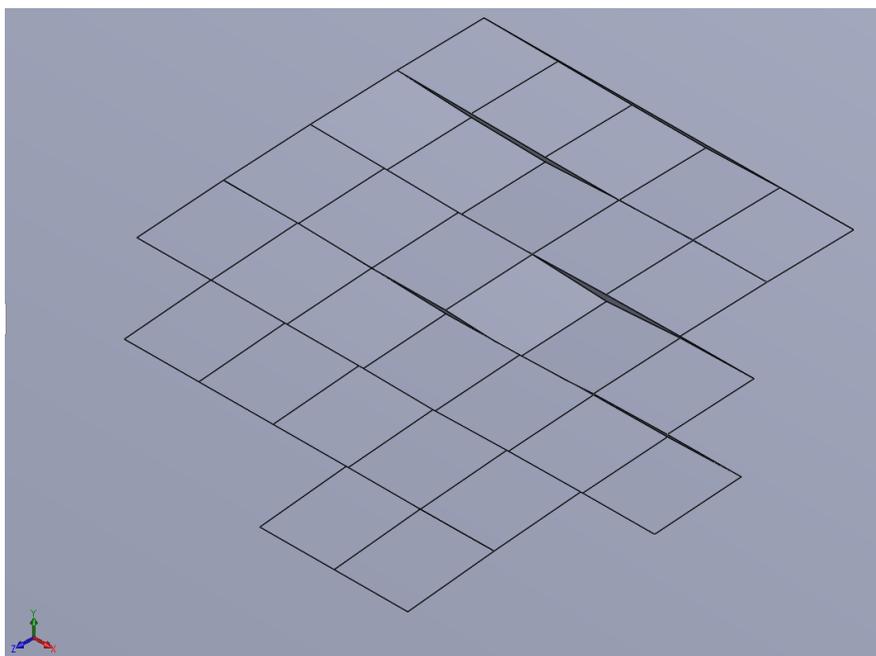
Fonte: Autor, 2018.

Em seguida, iniciou-se a modelagem da região com corrosão. Para isso, desenhou-se a seção transversal do primeiro plano de inspeção da região corroída correspondendo a linha M2 da Tabela 5, adjacente ao sólido revolucionado da Figura 9, que de maneira semelhante foi rotacionada em 1° em relação ao eixo X. Esse procedimento foi repetido até a modelagem de todo o anel do vaso de pressão. O resultado final pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Desenho do anel com corrosão (a), detalhe da região corroída (b).



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2018.

Esse modelo foi transferido para o *software* ANSYS, para proceder a análise numérica. A fixação do anel foi feita colocando um suporte em uma das extremidades do

anel, e um esforço de tampo do outro lado, com objetivo de garantir que o modelo esteja estaticamente determinado. Esse esforço é calculado da seguinte forma:

$$F_{tampo} = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.2)$$

$$F_{tampo} = 0,98 \cdot \frac{\pi \cdot 2^2}{4} = 3,08 \text{ MPa}$$

Foi então aplicada a pressão interna. Para verificar a validade do modelo desenvolvido, foi feita uma simulação com o vaso na condição sem corrosão, pressão interna de operação de 0,98 MPa, e os resultados foram comparados com cálculos analíticos para vasos de pressão de paredes finas (HIBBELER, 2010; HUDA; AJANI, 2015), que seguem:

$$\sigma_1 = \sigma_{circ} = \frac{p \cdot R}{t} \quad (3.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,98 \cdot 1000}{10} = 98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \sigma_{long} = \frac{p \cdot R}{2t} \quad (3.4)$$

$$\sigma_2 = \frac{0,98 \cdot 1000}{2 \cdot 10} = 49 \text{ MPa}$$

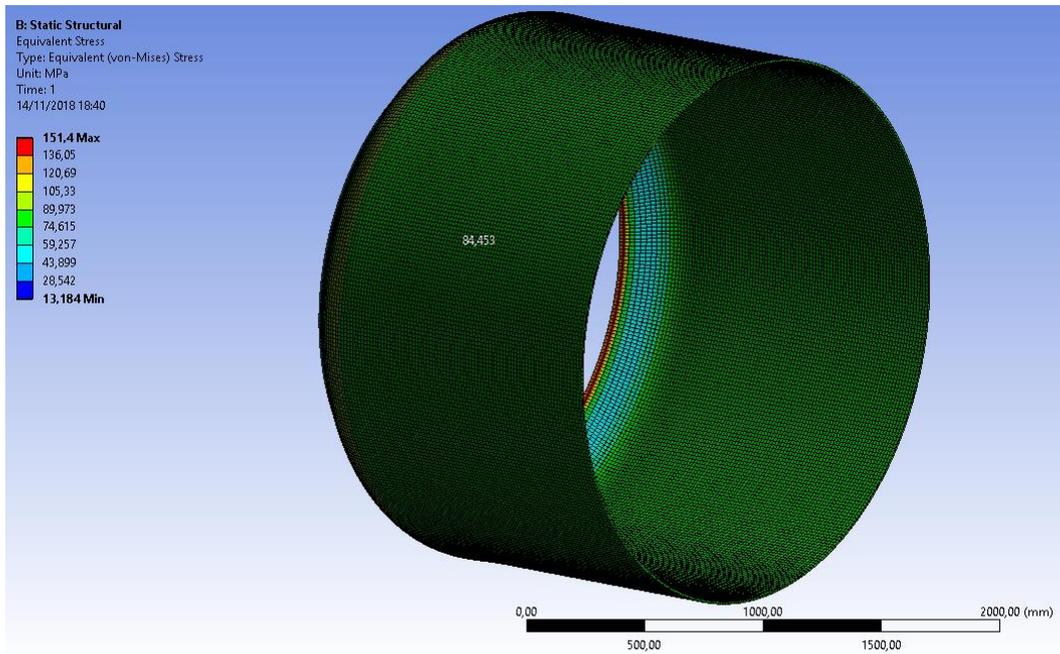
Onde p é a pressão de operação, R o raio interno e t a espessura do vaso. A tensão de Von Mises é, então:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.5)$$

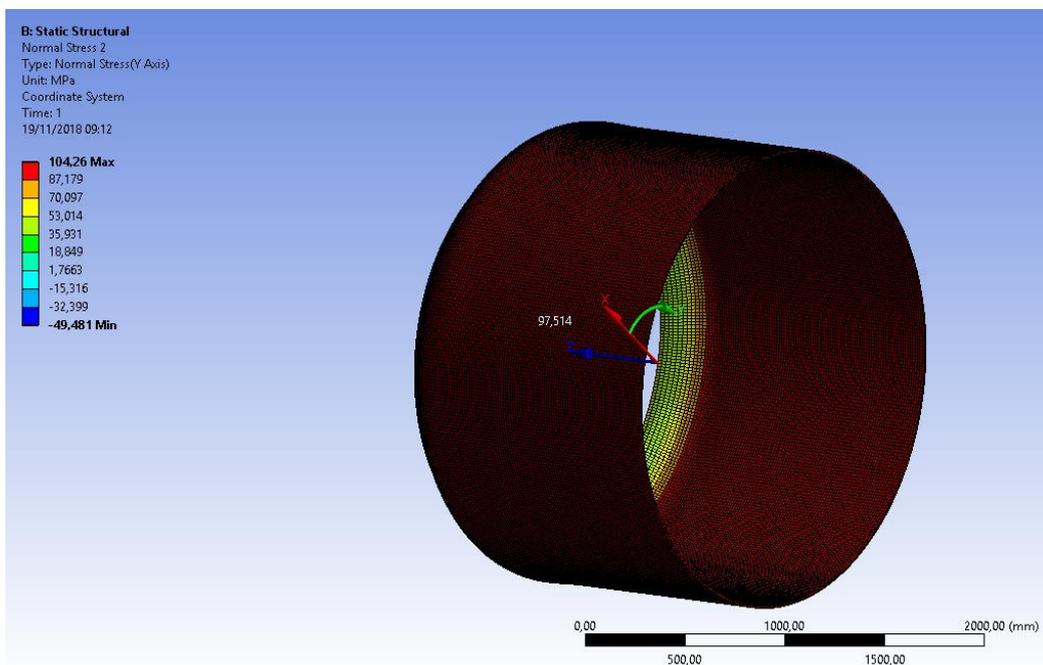
$$\sigma_{vm} = 84,87 \text{ MPa}$$

Os resultados da simulação podem ser vistos na Figura 11, a seguir.

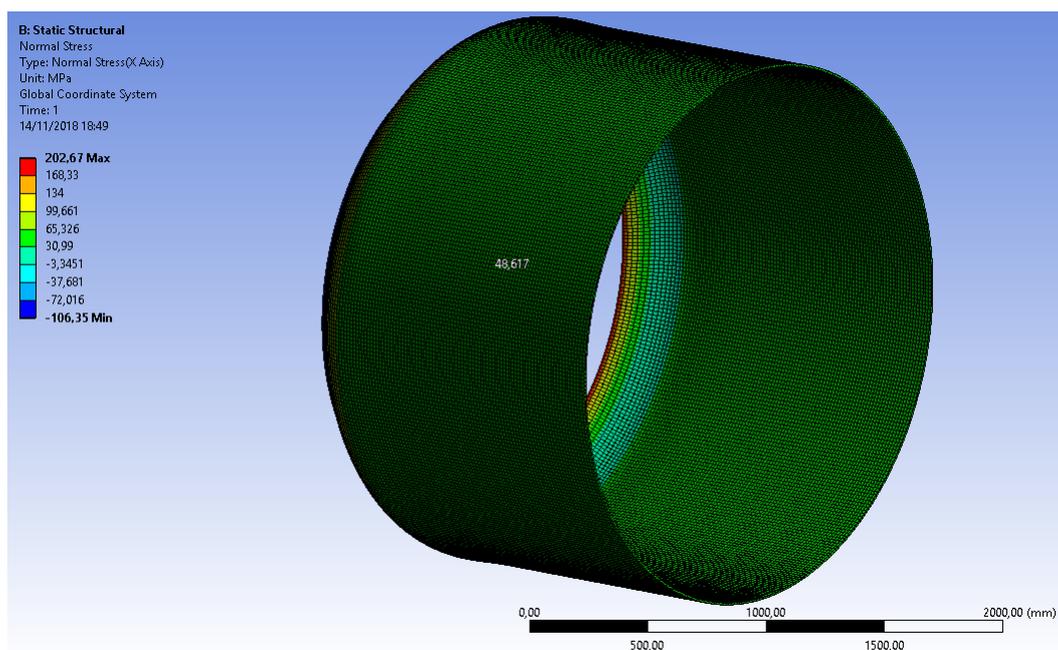
Figura 11 – Resultado das tensões de Von Mises circunferenciais (a), longitudinais (b) e para o anel sem corrosão (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor, 2018.

Como pode ser observado, em um ponto no meio do anel, as tensões de Von Mises encontradas foram da ordem de 84,45 MPa, as circunferenciais na ordem de 97,5 MPa e as longitudinais na ordem de 48,6 MPa. Conforme visto na Tabela 10, comparando-se os valores obtidos na simulação aos calculados analiticamente, é possível observar um baixo valor de erro, e, portanto, considera-se o modelo válido.

Tabela 20 – Comparação de resultados para validação do modelo numérico.

PARÂMETRO	VALOR DE REFERÊNCIA	VALOR ENCONTRADO	ERRO (%)
σ_{circ} [MPa]	98	97,5	0,5
σ_{long} [MPa]	49	48,6	0,8
σ_{vm} [MPa]	84,87	84,45	0,5

Fonte: Autor, 2018.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL SEGUNDO A API 579-1/ASME FFS-1

Considerando os dados citados na Tabela 7, é possível executar a avaliação da integridade estrutural do vaso de pressão, com base na API 579-1/ASME FFS-1. Seguindo a metodologia proposta, o estudo será iniciado pelo nível 1, de maior conservadorismo. É importante salientar que, para o caso do vaso em estudo, o equipamento nunca foi submetido a operação na faixa de fluência.

Inicia-se a análise pela obtenção do coeficiente de variação (COV). Com base nos dados obtidos pelo ensaio de ultrassom, e de acordo com as equações 2.8 e 2.9, discutidas no capítulo 2, tem-se:

$$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i} = 9,82 \text{ mm}$$

$$S = \sum_{i=1}^N (t_{rd,i} - t_{am})^2 = 6,96 \text{ mm}^2$$

E, da equação 2.7:

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left(\frac{S}{N-1} \right)^{0,5} = 0,03$$

O valor do COV é, portanto, menor que 0,1. Os critérios de aceitabilidade da norma API 579-1/ASME FFS-1 são válidos para avaliação da integridade estrutural. Como as medições de espessura foram feitas baseadas em planos de inspeção longitudinais e circunferenciais, obtiveram-se perfis de espessura e a avaliação será feita com base nos critérios de espessura média medida utilizando perfis críticos de espessura (CTP) e espessura medida mínima, como visto nas Tabelas 2 e 3.

Prossegue-se, então, os cálculos da espessura mínima requerida, de acordo com a norma ASME VIII Div I, utilizando as informações do fabricante do vaso, descritas anteriormente. Aqui, se considera a eficiência de solda $E = 0,85$.

Para definir qual conjunto de equações utilizar, confere-se o resultado da inequação:

$$P \leq 0,385 \cdot SE$$

$$0,98 \leq 41,89 \text{ (Verdadeira)}$$

Logo,

$$t_{min}^C = \frac{PR_c}{SE - 0,6P}$$

Onde:

$$R_c = R + FCA = 1000 + 2 = 1002 \text{ mm}$$

Substituindo os valores,

$$t_{min}^C = \frac{0,98 \cdot 1002}{128 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,98} = 9,07 \text{ mm}$$

De forma semelhante,

$$t_{min}^L = \frac{PR_c}{2SE + 0,4P} = 4,50 \text{ mm}$$

Com esses dois resultados, utilizaremos o de maior valor, de forma que:

$$t_{min} = \max[t_{min}^C; t_{min}^L] = 9,07 \text{ mm}$$

Do perfil de espessura mostrado na Tabela 5, obtém-se o valor da espessura mínima medida:

$$t_{mm} = 8,64 \text{ mm}$$

A espessura nominal computando a FCA é:

$$t_{ml} = t_{nom} - FCA = 10 - 2 = 8 \text{ mm}$$

Calcula-se a taxa de espessura remanescente:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{ml}}$$

$$R_t = \frac{8,64 - 2}{8} = 0,830$$

Para encontrar o comprimento de espessura média, calcula-se primeiro o fator Q :

$$Q = 1,123 \left[\left(\frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{0,5}$$

Seguindo as diretrizes da norma API 579-1/ASME FFS-1, para um Fator de Força Restante Permissível (RSF_a) desconhecido, recomenda-se utilizar o valor 0,9 que é considerado conservativo. Desta forma,

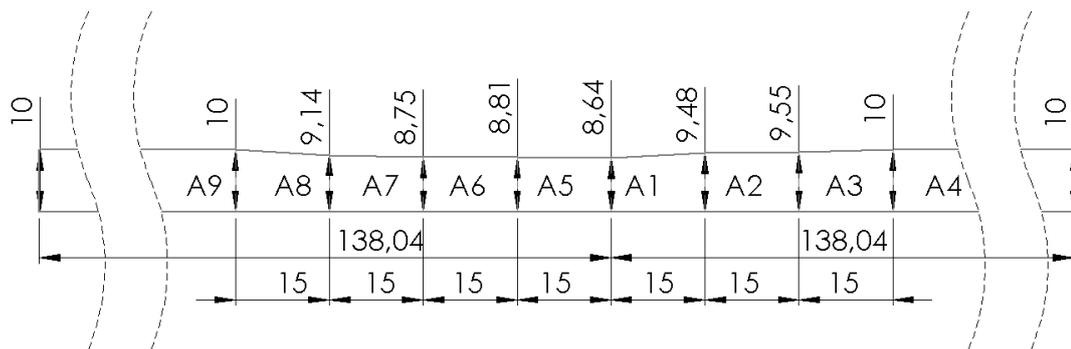
$$Q = 1,123 \left[\left(\frac{1 - 0,83}{1 - 0,83/0,9} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} = 2,18$$

O comprimento de espessura média é, então:

$$L = Q \cdot \sqrt{D \cdot t_{ml}} = 2,18 \cdot \sqrt{2000 \cdot 8} = 276,08 \text{ mm}$$

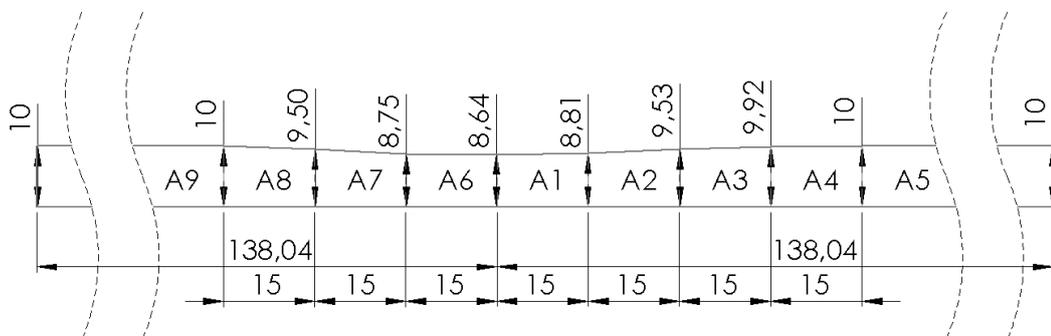
Utilizando esse valor, é possível determinar a média das espessuras mínimas mensuradas, t_{am}^s para o caso dos perfis críticos de espessura longitudinais, e t_{am}^c para os perfis críticos de espessura circunferenciais. Para isso, faz-se uma média ponderada das áreas obtidas a partir das projeções dos valores mínimos de espessura mensurados ao longo de todos os planos de inspeção, longitudinais e circunferenciais, em um plano comum, como pode ser visto nas Figuras 12 e 13. Então divide-se em relação ao comprimento de espessura média.

Figura 12 – Perfil de espessura crítica longitudinal.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 13 – Perfil de espessura crítica circunferencial.



Fonte: Autor, 2018

Para os valores de espessura circunferenciais, a soma das áreas é:

$$\sum_{i=1}^9 A_i^c = 2688,04 \text{ mm}^2$$

Logo,

$$t_{am}^c = \frac{2688,04}{276,08} = 9,74 \text{ mm}$$

De forma semelhante, para os valores de espessura longitudinais:

$$\sum_{i=1}^9 A_i^l = 2676,34 \text{ mm}^2$$

$$t_{am}^s = \frac{2676,34}{276,08} = 9,69 \text{ mm}$$

Tento como base os critérios de aceitação descritos no capítulo 2, agora é possível realizar a avaliação da integridade estrutural do vaso de pressão com base nos níveis 1 e 2 da API 579-1/ASME FFS-1.

Inicia-se a avaliação realizando a avaliação segundo o critério da espessura medida mínima.

$$t_{lim} = \max[0,2t_{nom}; 2,5\text{mm}] = 2,5 \text{ mm}$$

$$\max[0,5t_{min}; t_{lim}] = 4,54 \text{ mm}$$

$$t_{mm} - FCA = 8,64 - 2 = 6,64 \text{ mm}$$

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5t_{min}; t_{lim}] \rightarrow \textit{Verdadeiro}$$

4.2 ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 1

Para os perfis de espessura circunferenciais, realiza-se a avaliação conforme nível 1 da norma API 579-1/ASME FFS-1:

$$t_{am}^c - FCA = 9,74 - 2 = 7,74 \text{ mm}$$

$$t_{min}^L = 4,50 \text{ mm}$$

$$t_{am}^c - FCA > t_{min}^L \rightarrow \textit{Verdadeiro}$$

Para os perfis de espessura longitudinais, tem-se:

$$t_{am}^s - FCA = 9,69 - 2 = 7,69 \text{ mm}$$

$$t_{min}^c = 9,07 \text{ mm}$$

$$t_{am}^s - FCA > t_{min}^c \rightarrow \text{Falso}$$

Como a inequação que avalia os perfis de espessura longitudinais é falsa, o vaso não é aprovado pelos critérios determinados pela API 579-1/ASME FFS-1. Para esse vaso, então, pode-se optar pela parada para manutenção, ou continuação em serviço com uma PMTA reduzida. Para isto, utilizamos a seguinte equação:

$$PMTA_{r,1} = \frac{SEt_{rr}}{R_c + 0,6t_{rr}}$$

Aqui não será necessário avaliar utilizando os perfis de espessura circunferenciais, visto que na avaliação de nível 1 a integridade estrutural já foi garantida. Portanto, para o caso de medidas longitudinais $t_{rr} = t_{am}^c - FCA = 7,74 \text{ mm}$, e, portanto:

$$PMTA_{r,1} = 0,83 \text{ MPa}$$

Esse novo valor de pressão garante, de acordo com o nível 1 da API 579-1/ASME FFS-1, a continuação da operação com segurança do vaso de pressão estudado.

4.3 ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 2

Realiza-se agora a avaliação da conforme o nível 2 da API 579-1/ASME FFS-1. Aqui, as equações e critérios de avaliação são análogos ao do nível 1, diferenciando-se pela utilização do fator de força restante permissível RSF_a , e conforme discutido anteriormente será atribuído o valor de 0,9 a fim de se obter resultados conservadores. Logo, temos:

$$t_{am}^s - FCA = 9,69 - 2 = 7,69 \text{ mm}$$

$$t_{min}^c \cdot RSF_a = 9,07 \cdot 0,9 = 8,17 \text{ mm}$$

$$t_{am}^s - FCA > t_{min}^c \cdot RSF_a \rightarrow \text{Falso}$$

Portanto, assim como foi observado na avaliação de nível 1, o vaso de pressão não está aprovado para serviço com as atuais variáveis de operação. Conforme esperado, ressalta-se que a utilização do nível 2 proporcionou um resultado mais próximo da condição de aceitação, caracterizando uma redução no grau de conservadorismo.

De forma análoga a seção anterior, pode-se calcular uma PMTA reduzida:

$$PMTA_{r,2} = \frac{SE^{t_{rr}}/RSF_a}{R_C + 0,6 \cdot t_{rr}/RSF_a}$$

Onde $t_{rr} = t_{am}^c - FCA = 7,74 \text{ mm}$.

$$PMTA_{r,2} = 0,92 \text{ MPa}$$

Conforme é observado, a introdução do RSF_a resulta em uma PMTA de valor maior, confirmando um resultado menos conservador.

Como fica claro, em comparação ao nível 1, o nível 2 utiliza-se apenas do RSF_a para reavaliar o componente. O cálculo é feito de maneira simples, uma vez que se optou pela utilização do RSF_a recomendado pela API 579-1/ASME FFS-1 com base em testes de ruptura e margens de projeto de várias normas internacionais de construção de vasos de pressão. Além disso a API 579-1/ASME FFS-1 menciona que, caso utilize-se um valor do RSF_a menor que 0,9 para a avaliação, deva-se incluir as hipóteses e embasamentos técnicos. Por esse motivo, não serão considerados outros valores do RSF_a . Alternativamente, a tabela presente no Anexo A lista possíveis valores para o RSF_a e sua influência nos outros parâmetros de avaliação.

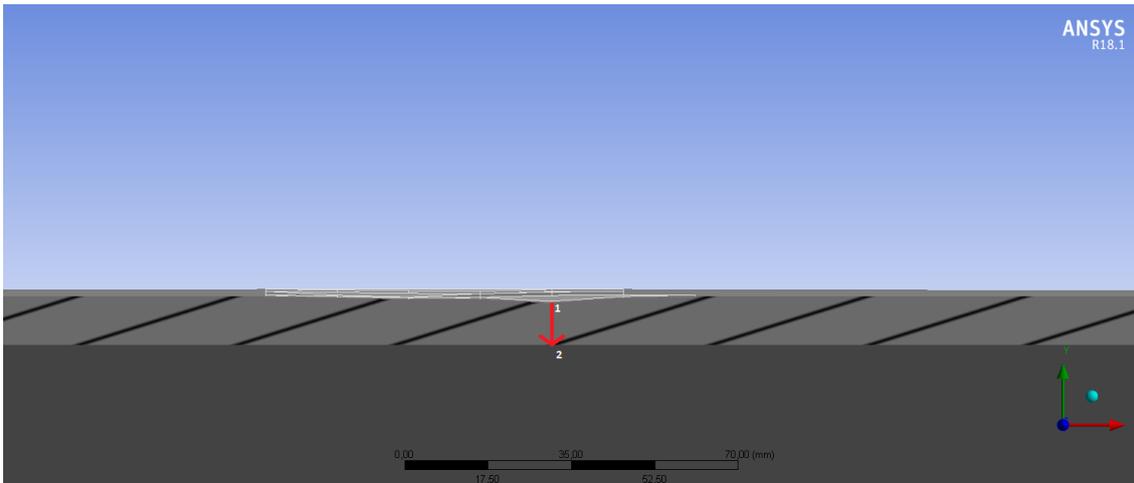
4.4 ACEITAÇÃO CONFORME NÍVEL 3

Após a determinação do modelo numérico do vaso, como discutido no item 3.3, é feita a escolha dos resultados a serem calculados pelo *software* ANSYS. Como o critério de avaliação é baseado na teoria de Von Mises, foi selecionado o cálculo das tensões equivalentes linearizadas de Von Mises. Os critérios de aceitação das Tabelas 4 e 5 utilizam pressões de projeto e pressões de operação, respectivamente. Para simular um caso extremo, visto que representa a condição de maior severidade de serviço que o vaso poderia chegar em teoria, ambos os critérios de avaliação irão considerar a pressão de projeto.

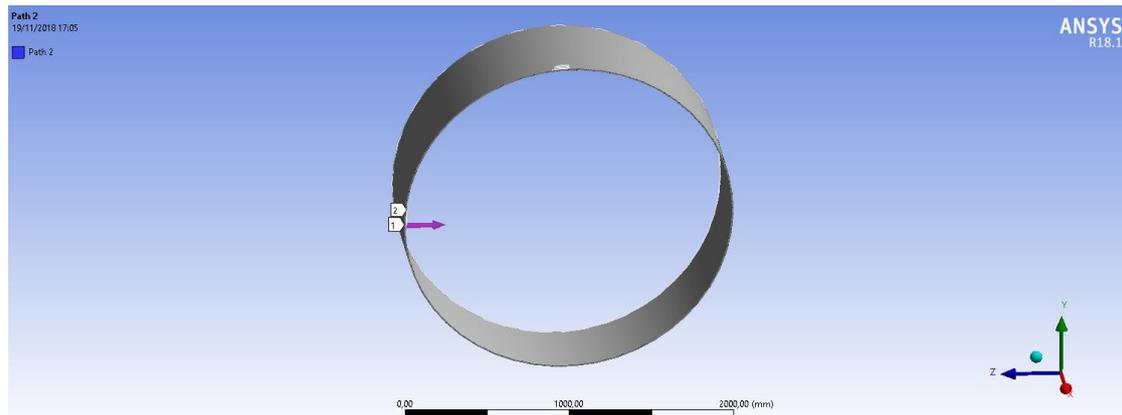
Conforme discutido previamente, a obtenção das componentes de membrana e flexão das tensões atuantes, necessárias para a categorização de tensões da avaliação de nível 3, são obtidas a partir da linearização dos esforços mecânicos. Para isso, no *software* ANSYS é necessário criar um *path* (caminho) na região com corrosão. A fim de obter a condição crítica de tensões nessa região, o caminho é feito tendo como ponto inicial o menor valor de espessura medida, e como ponto final o ponto na direção radial que encontra o diâmetro interno, conforme Figura 14.

Como a região com presença de corrosão não representa o vaso como um todo, a tensão de membrana calculada é considerada como uma tensão primária de membrana local (P_l). Para a obtenção da tensão primária de membrana geral (P_m), o cálculo deve ser feito numa região afastada da corrosão. Nesse sentido, foi definido um segundo *path*, seguindo os mesmos critérios de criação, para o cálculo da componente de tensão de membrana geral, conforme Figura 15 que mostra o local de definição do segundo caminho.

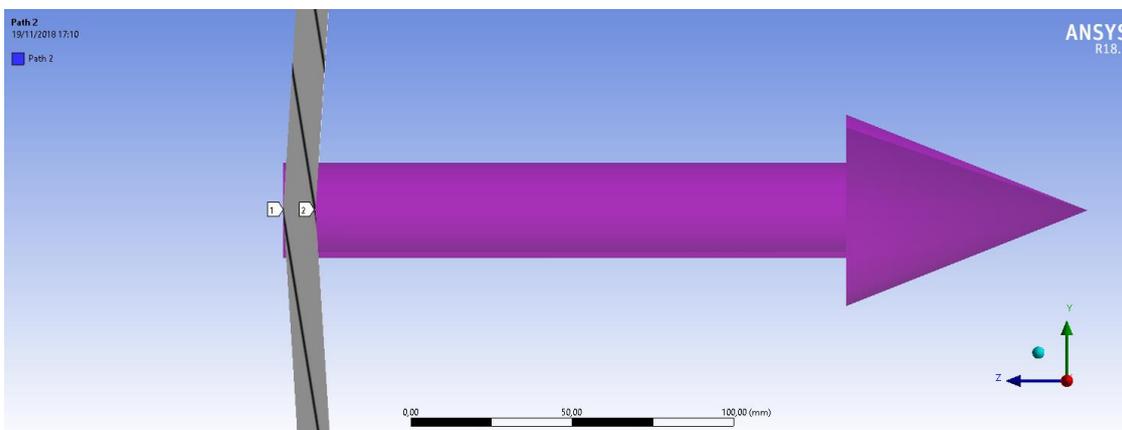
Figura 14 – Detalhe do caminho criado para linearização de tensões na região corroída.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 15 – Posicionamento do caminho 2 para determinação da P_m (a). Detalhe do caminho (b).

(a)

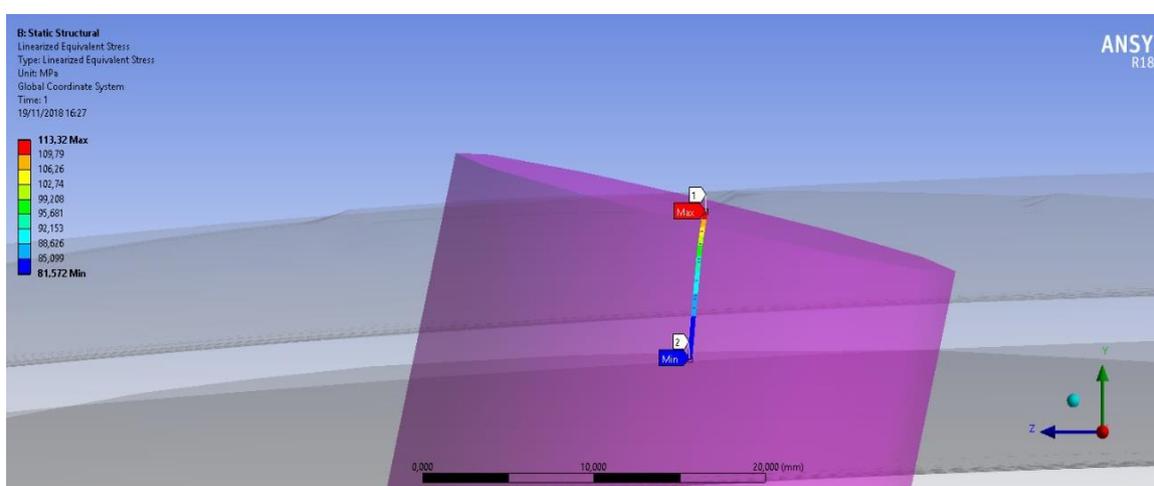


(b)

Fonte: Autor, 2018.

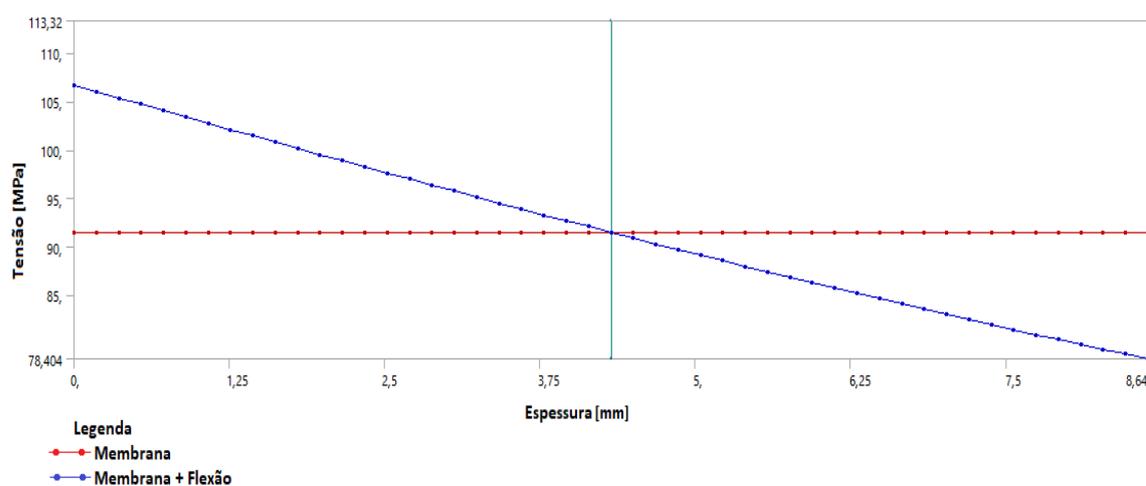
Os resultados para as componentes na região corroída são apresentados na Figura 16. Como pode ser visto graficamente na Figura 17, o resultado para a tensão principal de membrana local é de 91,5 MPa. O valor máximo encontrado para tensão de membrana mais flexão é de 106,7 MPa. No modelo, a curvatura faz com que a flexão surja por incompatibilidade de deslocamento entre as fibras internas e externas do vaso, e não para equilibrar a pressão interna. Por isso, a tensão de flexão encontrada é considerada secundária, Q .

Figura 16 – Resultado da linearização da tensão na região de menor espessura.



Fonte: Autor, 2018.

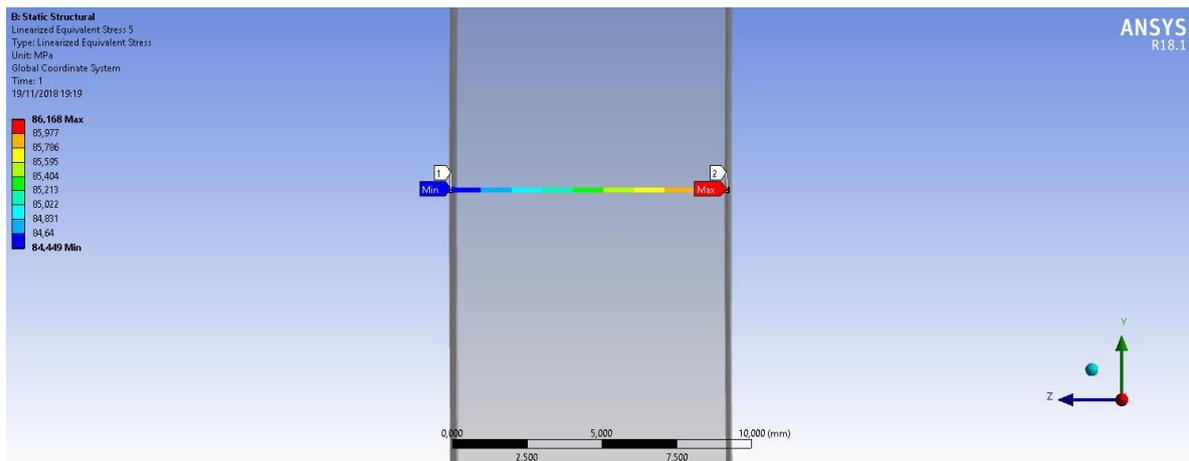
Figura 17 – Gráfico da Tensão Linearizada x Espessura na região corroída.



Fonte: Autor, 2018.

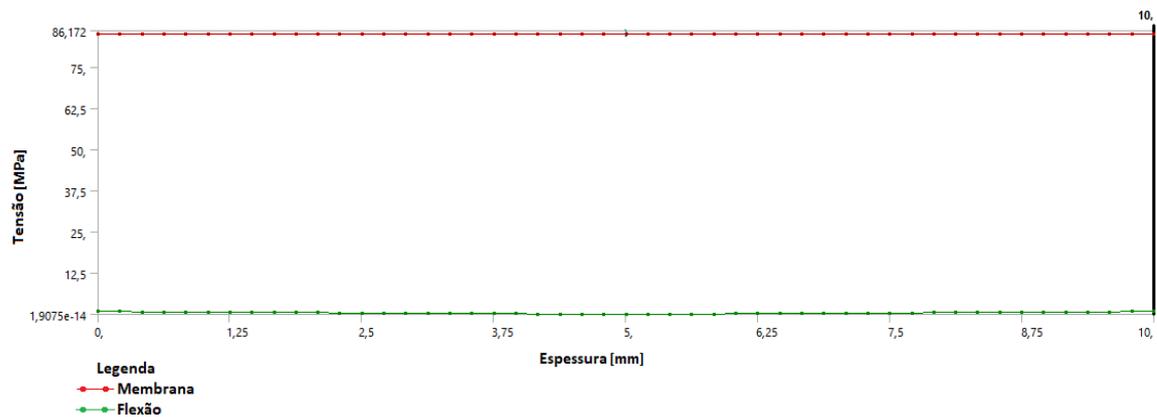
Os resultados para a linearização da tensão numa região afastada da corrosão podem ser vistos na Figura 18 e graficamente na Figura 19. O valor da tensão principal de membrana geral, P_m , é 85,13 MPa, e conforme esperado para um componente cilíndrico com diâmetro muito grande em relação a espessura, o valor da tensão primária de flexão, P_b , é desprezível.

Figura 18 – Resultado da linearização da tensão na região sem corrosão.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 19 – Gráfico da tensão linearizada x espessura na região sem corrosão.



Fonte: Autor, 2018.

Comparando com o critério de aceitação, chega-se a:

$$P_m \leq S$$

$$85,13 \leq 128 \text{ (Veradeiro)}$$

$$P_l \leq 1,5 \cdot S$$

$$91,5 \leq 192 \text{ (Verdadeiro)}$$

$$P_l + P_b \leq 1,5 \cdot S$$

$$91,5 \leq 192 \text{ (Verdadeiro)}$$

$$P_l + P_b + Q \leq 3 \cdot S$$

$$106,7 \leq 384 \text{ (Verdadeiro)}$$

Como pode ser observado, levando em conta os critérios estabelecidos pela ASME Divisão VIII Seção 2 Parte 5, e aceitos pela API 579-1/ASME FFS-1, o vaso de pressão estudado pode ser considerado aprovado para serviço de acordo com o nível 3. Esse resultado demonstra o baixo conservadorismo do nível 3 da API 579-1/ASME FFS-1. Além disso, mostra que uma análise numérica detalhada pode oferecer embasamento para aprovação de um equipamento, que caso não fosse submetido a essa análise, seria retirado de serviço, representando prejuízo para o processo produtivo. É relevante salientar, que apesar desses benefícios, uma análise numérica requer responsabilidade do engenheiro avaliador. Devido ao grau de conservadorismo baixo desse nível de avaliação, pequenos equívocos (como erro na medição de espessura) podem refletir em resultados imprecisos, e significar a aprovação de um vaso com risco de falha. Por isso, é comum a avaliação estrutural contar apenas com os níveis 1 e 2 da API 579-1/ASME FFS-1.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou um estudo de caso da avaliação da integridade estrutural de um vaso de pressão na presença de descontinuidade do tipo corrosão alveolar, com base nas diretrizes estabelecidas pela norma API 579-1/ASME FFS-1 Parte 4. Tanto avaliações analíticas quanto análise numérica foram conduzidas para determinar a possibilidade de continuação em serviço sem parada para reparos do equipamento.

Foi desenvolvida uma planilha para sistematizar o cálculo dos parâmetros necessários para a avaliação de nível 1 e 2 da norma, tendo como dados de entrada os dados do material do equipamento e condições de projeto. Essa planilha se mostrou adequada quando comparado a um caso-exemplo. Por questões de variações geométricas em regiões corroídas, em que não há um padrão definido para a perda de metal, sendo cada caso único, não foi possível automatizar completamente a avaliação.

Foi elaborado um modelo numérico do vaso para avaliação por elementos finitos. Este se mostrou coerente quando comparado aos resultados analíticos para o caso de um equipamento sem defeitos. Após a linearização das tensões atuantes, componentes de tensão foram obtidos e categorizados e avaliados conforme a norma ASME Seção VIII Divisão 2 Parte 5.

Quanto aos resultados obtidos e comparações entre os determinados níveis da API 579-1/ASME FFS-1, ficou claro a diminuição do conservadorismo à medida que se avançava nos níveis. Em especial pode-se destacar o resultado do nível 3 (análise numérica), que diferentemente dos níveis 1 e 2, resultou na aprovação do vaso de pressão para continuação em serviço sem parada para reparos. Foram feitas considerações em relação ao grau de habilidade e responsabilidade requeridos para uma avaliação numérica precisa.

Em relação a comparação entre o nível 1 e 2, discutiu-se o embasamento para determinação do RSF_a , fator responsável pela diminuição do conservadorismo no nível 2 de avaliação. Como o vaso de pressão não foi aprovado pelos níveis 1 e 2, foram calculados valores reduzidos da PMTA para ambos os níveis, de forma a proporcionar uma alternativa para a utilização segura do equipamento.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar: Analisar a possibilidade de utilização de sensores de varredura a laser para obtenção dos perfis de espessuras críticas

a região com corrosão, possibilitando a automatização completa dos cálculos dos parâmetros de avaliação, como proposta para contemplação pela API 579-1/ASME FFS-1.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. I. L. **Análise numérica da integridade estrutural de vasos de pressão usando a Norma API 579**. João Pessoa, 2012.

ANDERSON T. L.; OSAGE, A. D. **API 579: a comprehensive fitness-for-service guide**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77, 2001.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API. **API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-For-Service**. 2016 ed. Washington D.C., USA: API Publishing Services, 2016.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API. **API 579-2/ASME FFS-2: Fitness-For-Service Example Problem Manual**. Washington D.C., USA: API Publishing Services, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – An International Code**. 2015 ed. New York, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **ASTM G46-94: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-13 – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-33 - Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures. BS 7910**. 3 ed. London, UK: BSI Standards Limited, 2013.

COELHO, G. C. **Avaliação da integridade estrutural de um vaso de pressão danificado por trincas: análise numérica e adequação ao serviço.** Campina Grande, 2018.

COSHAM, A.; HOPKINS, P.; MACDONALD, K. A. **Best practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion.** Engineering Failure Analysis 14, 2007.

DONATO, G. V. P.; VILLAS BOAS, F. A. M. **Apostila de Vasos de Pressão.** Universidade Petrobrás, 2012.

DONATO, G. V. P. **Avaliação de integridade estrutural API 579/ASME FFS-1 Fitness for Service.** Vitória, 2008.

FALCÃO, C. **Projeto de Vasos de Pressão e Trocadores de calor.** Texto registrado sob o número 284827 do Livro 514 folha 487 do Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura, 2008.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 6 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2011.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** Pearson Prentice Hall, 7ª Edição. São Paulo, 2010.

HMSO. **Committee on Corrosion. Handbook of industrial corrosion monitoring.** London, 1978.

HUDA, Zainul. AJANI, M. H. **Evaluation of Longitudinal and Hoop Stresses and a Critical Study of Factor of Safety (FoS) in Design of a Glass-Fiber Pressure Vessel.** International Journal of Materials and Metallurgical Engineering Vol 9 No 1, 2015.

JANELLE, J. L. **An overview and validation of the fitness-for-service assessment procedures for local thin areas.** Akron, 2005.

KIM, N. H.; SANKAR, B. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011.

LOMBARDI, C. C. M. **Estudo da influência da fase ferrítica sobre o comportamento de corrosão de aços inoxidáveis austeníticos**. São Paulo, 1993.

MADENCI, E.; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®**. 2. Ed. Boston, USA: Springer US, 2015.

MARTINS, F. J. S. **Análise da possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades durante a realização de testes hidrostáticos em vasos de pressão e seus possíveis efeitos**. Porto Alegre, 2009.

MILNE, I.; DOWLING, A. R. **Deciding on Margins and Factors**. Comprehensive Structural Integrity - Volume 7: Practical Failure Assessment Methods. San Diego, USA: Elsevier Pergamon, 2003.

OSAGE, D. A.; JANELLE J. L. **API 579-1/ASME FFS-1 2007 – a joint API/ASME Fitness for Service Standard for Pressurized Equipment**. ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. Chicago, 2008.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-0253. Revisão J. Projeto de Vasos de Pressão**. Rio de Janeiro, Petrobras, 2009.

PRUETER, P. E.; BROWN R. G. **A Comparison of Design By Analysis Techniques For Evaluating Nozzle-To-Shell Junctions Per ASME Section VIII Division 2**. Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference. Boston, 2015.

ROBERGE, P. R. **Corrosion engineering: Principles and Practices**. New York. McGraw-Hill, 2008.

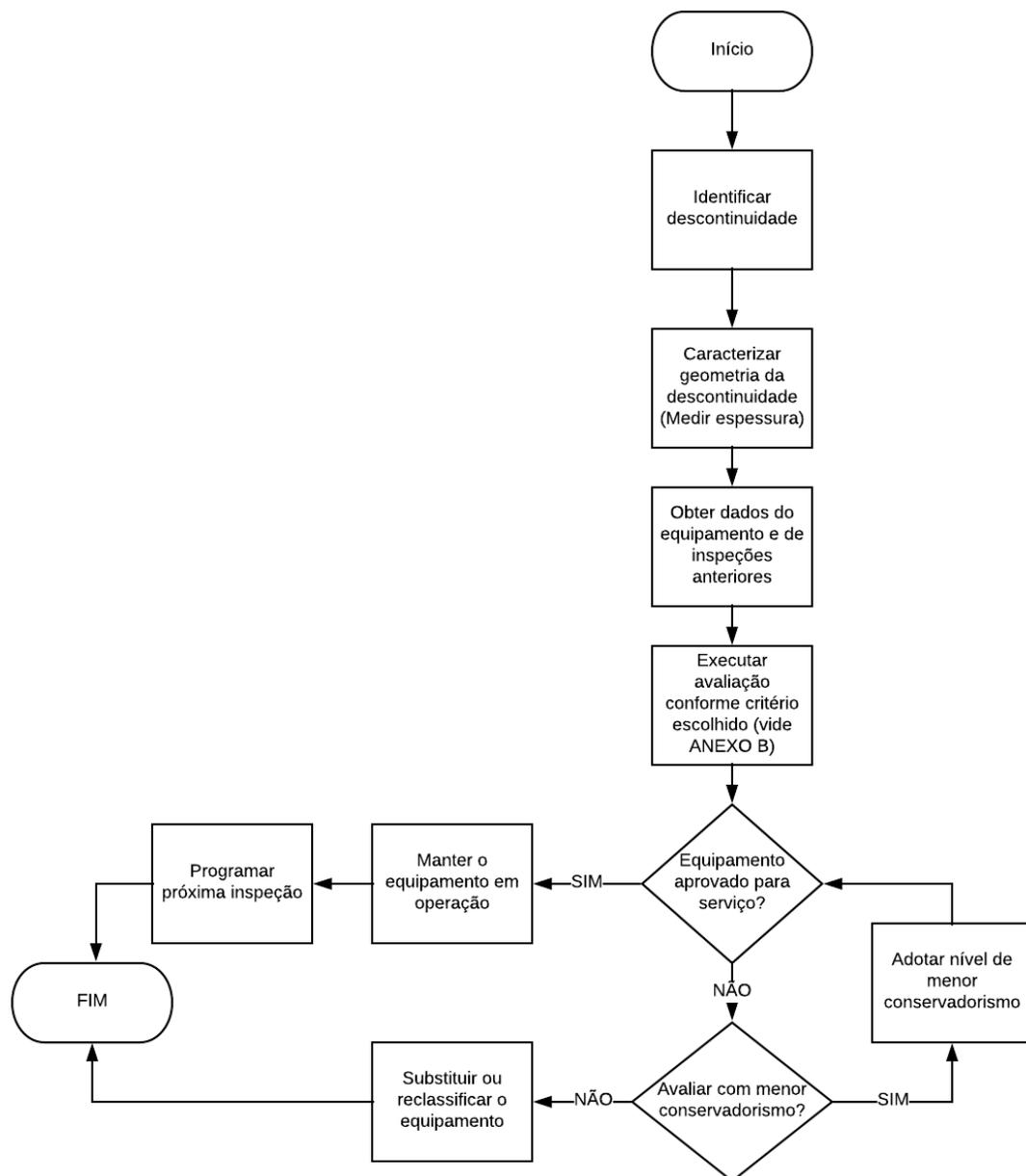
TELLES, P. C. S. **Vasos de Pressão**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

SILVA, A. B. D. **Projeto de vaso de pressão segundo a norma ASME e análise pelo método dos elementos finitos**. Recife, 2015.

SHEKARI, Elahe; KHAN, Faisal; AHMED, Salim. **A predictive approach to fitness-for-service assessment of pitting corrosion**. International Journal of Pressure Vessels and Piping 137, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autor, 2018.

ANEXOS

ANEXO A – PARÂMETROS PARA CALCULAR O COMPRIMENTO DE ESPESSURA MÉDIA, L.

R_t	Q				
	$RSF_a = 0.90$	$RSF_a = 0.85$	$RSF_a = 0.80$	$RSF_a = 0.75$	$RSF_a = 0.70$
0.900	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
0.895	21.19	50.00	50.00	50.00	50.00
0.875	4.93	50.00	50.00	50.00	50.00
0.850	2.82	50.00	50.00	50.00	50.00
0.845	2.62	29.57	50.00	50.00	50.00
0.825	2.07	6.59	50.00	50.00	50.00
0.800	1.68	3.65	50.00	50.00	50.00
0.795	1.62	3.38	36.82	50.00	50.00
0.775	1.43	2.63	8.01	50.00	50.00
0.750	1.26	2.11	4.35	50.00	50.00
0.745	1.23	2.03	4.01	42.94	50.00
0.725	1.12	1.77	3.10	9.20	50.00
0.700	1.02	1.54	2.45	4.93	50.00
0.695	1.00	1.51	2.36	4.53	47.94
0.675	0.93	1.37	2.05	3.47	10.16
0.650	0.86	1.24	1.77	2.73	5.39
0.625	0.80	1.13	1.56	2.26	3.77
0.600	0.74	1.04	1.40	1.95	2.94
0.575	0.70	0.96	1.27	1.71	2.43
0.550	0.65	0.89	1.16	1.53	2.07
0.525	0.61	0.83	1.07	1.38	1.81
0.500	0.58	0.77	0.99	1.26	1.61
0.475	0.55	0.72	0.92	1.15	1.45
0.450	0.51	0.68	0.86	1.06	1.32
0.425	0.49	0.64	0.80	0.98	1.20
0.400	0.46	0.60	0.74	0.91	1.10
0.375	0.43	0.56	0.70	0.84	1.01
0.350	0.41	0.53	0.65	0.78	0.93
0.325	0.38	0.50	0.61	0.73	0.86
0.300	0.36	0.46	0.57	0.67	0.79
0.275	0.34	0.43	0.53	0.63	0.73
0.250	0.31	0.40	0.49	0.58	0.67
0.200	0.27	0.35	0.42	0.49	0.57

Obs:

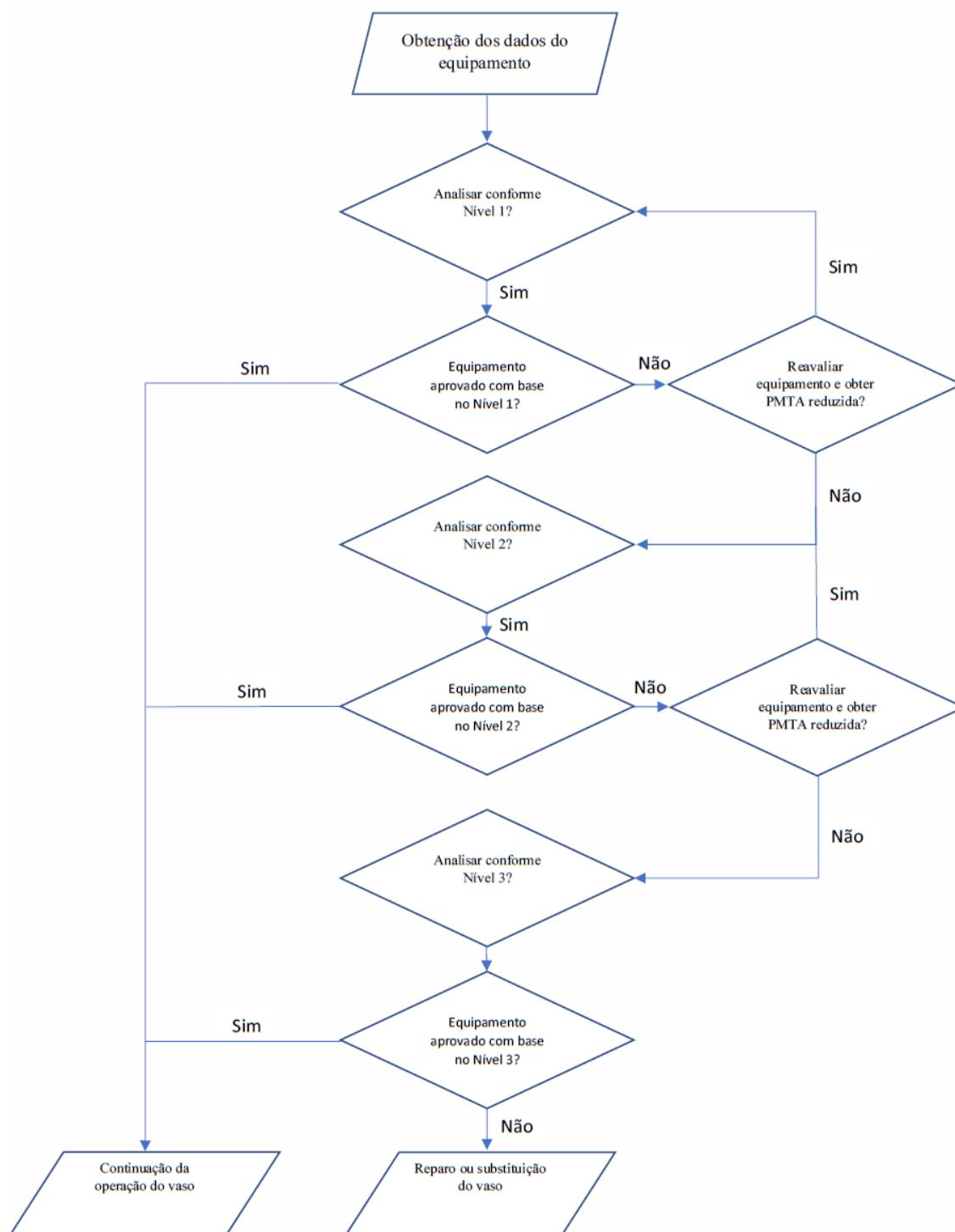
1. A equação para determinação de Q é:

$$Q = 1.123 \left[\left(\frac{1 - R_t}{1 - R_t / RSF_a} \right)^2 - 1 \right]^{0.5} \quad (\text{for } R_t < RSF_a)$$

$$Q = 50.0 \quad (\text{for } R_t \geq RSF_a)$$

Fonte: API 579-1/ASME FFS-1 (2016).

ANEXO B – FLUXOGRAMA PARA REALIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.



Fonte: Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1, 2016.

**ANEXO C – EXEMPLOS DE CATEGORIZAÇÃO DE TENSÕES EM
COSTADOS CONFORME A ASME (2015).**

Componente do vaso	Localização	Origem da tensão	Tipo de tensão	Classificação
Qualquer tipo de costado, incluindo cilíndrico, cônico ou esférico	Chapa do costado, longe de descontinuidades	Pressão interna	Geral de membrana	P_m
			Gradiente através da espessura da chapa	Q
		Gradiente axial de temperatura	Membrana	Q
			Flexão	Q
	Perto do bocal ou outra abertura	Força axial de seção líquida e/ou momento fletor aplicado ao bocal, e/ou pressão interna	Membrana local	P_l
			Flexão	Q
			Pico	F
	Qualquer localização	Diferencial de temperatura entre o costado e o tampo	Membrana	Q
			Flexão	Q
	Distorções do costado, como amassados	Pressão interna	Membrana	P_m
			Flexão	Q
	Costado cilíndrico ou cônico	Qualquer seção ao longo do vaso	Força axial de seção líquida, momento fletor aplicado ao cilindro ou cone, e/ou pressão interna	Tensão de membrana médio através da espessura, longe de descontinuidades; componente de tensões perpendiculares a seção transversal
			Tensão de flexão através da espessura, componente de tensões perpendiculares a seção transversal	P_b
Junção com tampo ou flange		Pressão interna	Membrana	P_l
	Flexão		Q	

Fonte: Adaptado de ASME, 2015.