



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

ANÁLISE NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VASOS DE PRESSÃO COM CORROSÃO USANDO A NORMA API 579

por

Jayann Ismar Lira Almeida

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do título de Mestre

JAYANN ISMAR LIRA ALMEIDA

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE VASOS DE PRESSÃO COM
CORROSÃO USANDO A NORMA API 579**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Título de Mestre.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

A447a Almeida, Jayann Ismar Lira.
Análise numérica da integridade estrutural de vasos de
pressão com corrosão usando a Norma API 579 / Jayann
Ismar Lira Almeida.- -João Pessoa, 2012.
132f. : il.
Orientador: João Bosco de Aquino Silva
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT
1. Engenharia Mecânica. 2. Integridade estrutural. 3. Vasos
de pressão. 3. Norma API 579.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL
DE VASOS DE PRESSÃO COM CORROSÃO USANDO A
NORMA API 579**

por

Jayann Ismar Lira Almeida

*Dissertação **aprovada** em 06 de Novembro de 2012*

Período letivo 2012.2

Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Examinador Externo – UFPB/CT

Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina

Examinador Externo – UFPB/CT

Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Examinador Interno – UFPB/CT

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

Orientador – UFPB/CT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por está me iluminando em mais uma etapa da minha vida e a todas as pessoas que contribuíram para minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me iluminou imensamente durante este período, pois sem Sua providência nada seria possível.

A minha família, pela dedicação e compreensão em todas as etapas desta e de outras caminhadas.

Ao professor Marcelo Cavalcanti Rodrigues pela sua orientação, força, incentivo, exemplo e preciosos ensinamentos durante todo este período de trabalho.

Ao meu amigo Hugo dos Santos Ramos da Silva, por todo seu apoio, dedicação, esforço e compartilhamento no decorrer deste trabalho.

A minha namorada Jordânia Araújo, pelo apoio e compreensão.

Ao meu amigo Francisco Augusto Vieira da Silva, pelo seu esforço dispensado nesta dissertação.

A minha amiga Paula Karenine, pelo seu esforço dispensado nesta dissertação.

Ao professor João Bosco de Aquino Silva, pelo incentivo e exemplo durante minha vida acadêmica.

Aos amigos e professores que integram o Laboratório de Engenharia de Precisão, da Universidade Federal da Paraíba.

A todos os professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

A Banca Examinadora, pelas correções e sugestões para enriquecer o presente trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

ANÁLISE NUMÉRICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VASOS DE PRESSÃO COM CORROSÃO USANDO A NORMA API

579

RESUMO

A avaliação da integridade estrutural de equipamentos é de fundamental importância para se evitar falhas e assim obter o maior rendimento possível dos componentes mecânicos presente em vários setores industriais e a corrosão, por sua vez, constitui um dos maiores perigos para os vasos de pressão. A capacidade de analisar a integridade estrutural de um componente em serviço que contém danos ou falha é apresentada na norma API 579 (FFS - *Fitness for Service*). Utilizando o ensaio por ultrassom para obter medições de perda de espessura na área sob corrosão da parede de vasos de pressão e aplicando a análise da API 579 seção 4 que recomenda a adequação ao uso do equipamento com a presença de perda de metal generalizada, faz-se uma correlação com a análise numérica utilizando elementos finitos do vaso com a mesma área de corrosão obtida do ensaio de ultra-som. O objetivo é analisar e avaliar os valores de Pressão Máxima de Trabalho Admissível (MAWP - *Maximum Allowable Working Pressure*) fornecida pela API 579 para adequação ao uso do equipamento com os valores encontrados na análise numérica. Resultados de valores da MAWP são comparados quando leva-se em consideração algumas variáveis que a API 579 considera como, a perda de espessura futura (FCA - *Future Corrosion Allowance*) devido a evolução da corrosão, a perda de espessura uniforme (LOSS) da área corroída internamente e mudanças de temperaturas que afetam a integridade estrutural desses equipamentos.

Palavras chaves – Integridade estrutural, Vasos de pressão, Norma API 579.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE STRUCTURAL INTEGRITY OF PRESSURE VESSELS WITH CORROSION USING THE STANDARD API 579

ABSTRACT

Fitness-for-service (*FFS*) assessment is a quantitative engineering evaluation of operational components. In the context of pressure vessels and piping systems *FFS* assessment is performed periodically to ensure the operational safety and structural integrity. The evaluation of structural integrity of equipment is crucial to avoid failure and thereby obtain the best possible performance of mechanical components under corrosion, in turn, is one of the greatest dangers to pressure vessels. The evaluation of structural integrity of a component service that contains general damage or failure is given in Level 4 described in API 579. Nondestructive testing by ultrasound was used to obtain measurements of the loss of thickness wall of the pressure vessel for the model developed to numerical analysis using finite element. The objective is to analyze and evaluate the values of Maximum Allowable Working Pressure (MAWP) provided by the Fitness for Service assessment with the values found in numerical analysis. Results of PMTA are compared when it takes into account several variables that API 579 considers, the Future Corrosion Allowance (FCA) due to evolution of corrosion, the thickness uniform loss (LOSS) of the internally corroded areas and the changes of temperature affecting the structural integrity of the equipment.

Keywords: Structural Integrity, Pressure Vessels, API 579

SUMÁRIO

CAPÍTULO I APRESENTAÇÃO	24
1.1 - Visão Geral	24
1.4 - Justificativa	25
1.5 - Motivação	25
1.6 - Objetivo Geral	26
1.6.1 - <i>Objetivos específicos</i>	26
1.7 - Estrutura da Dissertação	26
CAPÍTULO II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 - Introdução	28
2.2 - Vasos de Pressão	29
2.2.1 - <i>Formato e posição dos vasos de pressão</i>	25
2.2.2 - <i>Espessuras de cascos e de tampos</i>	26
2.3 - Corrosão	34
2.3.1 - <i>Formas de corrosão</i>	29
2.3.2 - <i>Taxa de corrosão</i>	31
2.3.3 <i>Métodos para combate à corrosão</i>	33
2.4 - Embasamento Teórico	40
2.4.1 - <i>O multiplicador m_d</i>	41
2.5 - Conceitos de Comprimento de Decaimento e Volume de Referência	42
2.5.1 - <i>Comprimento de decaimento para cascas cilíndricas</i>	43
2.5.2 - <i>Volume de referência para cascas cilíndricas</i>	44
2.6 - Integridade Estrutural	46
2.6.1 - <i>O critério da média integral do limite para avaliação estrutural</i>	46
2.6.2 - <i>Dano por corrosão</i>	47
2.6.3 - <i>Remaining Strength Factor (RSF)</i>	48

2.7 - Corrosão em Vasos de Pressão	48
2.8 - Considerações Finais	49
CAPÍTULO III INSPEÇÃO E MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ENSAIO	
ULTRASSÔNICO E AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VASO	
DE PRESSÃO USANDO A API 579	50
3.1 - Introdução	50
3.2 - Inspeção usando ensaio ultrassônico	51
3.3 - Princípios de Funcionamento dos Módulos do Sistema de Medição	53
3.3.1 - <i>Faixa de indicação</i>	53
3.3.2 - <i>Faixa de operação</i>	54
3.4 - Medição de Espessura por Ultrassom.....	55
3.5 - A Norma API 579.....	58
3.5.1 - <i>Norma API 579 seção 4 (perda de metal generalizada)</i>	59
3.5.2 - <i>Técnicas de avaliação e critérios de aceitação</i>	62
3.6 - Estudo de Caso	65
3.6.1 - <i>Inspeção por ultrassom para medição de espessura</i>	65
3.7 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Corrosão	66
3.7.1 - <i>Análise do vaso de pressão com corrosão externa pelos níveis 1 e 2 da API 579</i>	67
3.7.2 - <i>Análise do vaso de pressão com corrosão interna pelos níveis 1 e 2 da API 579</i>	70
3.7.3 - <i>Cálculo do comprimento de decaimento e do volume de referência</i>	71
3.8 - Análise Térmica Analítica do Vaso de Pressão sem Corrosão.....	72
3.9 - Considerações Finais	77
CAPÍTULO IV ANÁLISE NUMÉRICA ESTRUTURAL E TÉRMICA	
4.1 - Introdução.....	79
4.2 – Procedimentos para Modelagem do Vaso de Pressão	79
4.3 - Validação do Software	85
4.4 - Análise do Vaso de Pressão com Corrosão Externa pelo Nível 3 da API 579... 87	
4.5 - Análise do Vaso de Pressão com Corrosão Interna pelo Nível 3 da API 579.... 89	
4.6 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão sem Corrosão	91
4.7 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão com Corrosão Externa	94
4.8 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão com Corrosão Interna	95
4.9 - Considerações Finais	97

CAPÍTULO V RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1 - Introdução.....	99
5.2 - Comportamento da Tensão na Região Crítica para Corrosão Externa.....	100
5.2.1 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi).....	101
5.2.2 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 1 da API 579.....	101
5.2.3 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 2 da API 579.....	102
5.2.4 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 3 da API 579.....	103
5.3 - Comportamento da Tensão na Região Crítica para Corrosão Interna.....	105
5.3.1 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi).....	105
5.3.2 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 1 da API 579.....	106
Figura 5.10 - Estado da água para a MAWP de nível 1 com dano interno.	106
5.3.3 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 2 da API 579.....	107
5.3.4 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 3 da API 579.....	108
5.4 - Cálculo das RSF	110
5.4.1 - Cálculo da RSF para a corrosão externa	110
5.4.2 - Cálculo da RSF para a corrosão interna	112
5.5 - Análise das Temperaturas Máximas e Mínimas Para Cada Tipo de Corrosão	113
5.6 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Redução da Temperatura de Trabalho com Corrosão Externa	115
5.7 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Redução da Temperatura de Trabalho com Corrosão Interna	117
5.8 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Aumento da Temperatura de Trabalho	119
5.8.1 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso sem dano.....	120
5.8.2 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso com corrosão externa	121
5.8.3 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso com corrosão interna.....	122

5.8.4 - <i>Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso sem dano</i>	122
5.8.5 - <i>Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso com corrosão externa</i>	124
5.8.6 - <i>Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso com corrosão interna</i>	124
CAPÍTULO VI CONCLUSÃO.....	126
6.1 - Considerações Finais	126
6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vaso de pressão cilíndrico e extremidade esférica (TELLES, 1996).....	31
Figura 2.2 - Vaso de pressão (a) esférico; e (b) cilíndrico (TELLES, 1996).....	31
Figura 2.3 - Vasos de pressão (a) vertical e (b) horizontal (TELLES, 1996)..	32
Figura 2.4 - Corrosão uniforme em chapa de aço-carbono (GENTIL, 2011).....	35
Figura 2.5 - Corrosão em placas em chapa de aço-carbono de costado de tanque (GENTIL, 2011).....	35
Figura 2.7 - Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável (GENTIL, 2011).....	36
Figura 2.8 - Corrosão em tubulação de aço inoxidável em torno de cordão de solda (GENTIL, 2011).....	37
Figura. 2.9 - Regiões de limite inferior e superior do m_a	42
Figura 2.10 - Dimensões do comprimento de decaimento e volume de referência em uma casca cilíndrica.	43
Figura 2.11 - Área de corrosão em um vaso de pressão e seu volume de referência e adjacente.	45
Figura. 2.12 - Distribuição do efeito de borda ao longo da casca do vaso de pressão...	49
Figura 3.1 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom.	51
Figura 3.2 - O campo sônico nas proximidades do cristal.	54
Figura 3.3 - Classificação teórica das zonas do campo sônico.	55
Figura 3.4 - Medidor de Espessura Digital Ultrassônico (Fonte: website Eddytronics)	56
Figura 3.5 - Aparelho típico Phased Array da GE - Phasor XS.	57
Figura 3.6 - Sistema automatizado para medição de espessura em dutos.	58
Figura 3.7 - Grade de inspeção na região com corrosão generalizada.	66
Figura 4.1 – Perfil retangular.	80
Figura 4.2 - Relação trigonométrica para o ângulo central.	81
Figura 4.3 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) primeiro volume criado.....	81

Figura 4.4 - Primeiro perfil da zona corroída.	82
Figura 4.5 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) volume da primeira zona corroída.	82
Figura 4.6 - Segundo perfil da zona corroída.	82
Figura 4.7 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) volume da segunda zona corroída.	83
Figura 4.8 - Modelagem dos perfis da zona com perda de espessura.	83
Figura 4.9 - Vaso de pressão modelado com a corrosão externa.	84
Figura 4.10 - Modelagem do dano interno para (a) primeira região de inspeção e (b) segunda região de inspeção.	84
Figura 4.11 - Modelagem do perfil de espessura do duto com o dano interno.	85
Figura 4.12 - Análise da tensão para o duto sem corrosão.....	87
Figura 4.13 - Distribuição de tensão para a pressão de 2,18 MPa.	88
Figura 4.14 - Distribuição de tensão para a pressão de 2,42 MPa.	88
Figura 4.15 - Distribuição de tensão para a pressão de 1,64 MPa.	89
Figura 4.16 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,84 MPa.	90
Figura 4.17 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,98 MPa.	90
Figura 4.18 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,86 MPa.	91
Figura 4.19 - Distribuição de temperatura para o vaso sem corrosão (a) instante inicial e (b) estado estacionário.	92
Figura 4.20 - Temperaturas da parede externa e interna para os tempos analisados.	93
Figura 4.21 - Distribuição de temperatura para o vaso com corrosão externa (a) instante inicial e (b) estado estacionário.	94
Figura 4.22 - Temperaturas da parede externa e interna para a corrosão externa.	95
Figura 4.23 - Distribuição de temperatura para o vaso com corrosão interna (a) instante inicial e (b) estado estacionário.	96
Figura 4.24 - Temperaturas da parede externa e interna para a corrosão interna.	97
Figura 5.1 - Distribuição de tensão para 2,76 MPa para o vaso sem dano.	100
Figura 5.2 - Distribuição de tensão para 2,76 MPa para o dano externo.	101

Figura 5.3 - Tensão máxima para a MAWP do nível 1 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.	102
Figura 5.4 - Tensão máxima para a MAWP do nível 2 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.	103
Figura 5.5 - Tensão máxima para o nível 3 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.....	103
Figura 5.6 - Estado da água para MAWP de nível 3 com dano externo.	104
Figura 5.7 - Comportamento da tensão em relação ao tempo para os 3 níveis da API 579 com corrosão externa.....	104
Figura 5.8 - Distribuição de tensão para 400 psi para o dano interno.	105
Figura 5.9 - Tensão máxima para o nível 1 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.	106
Figura 5.10 - Estado da água para a MAWP de nível 1 com dano interno.	106
Figura 5.11 - Tensão máxima para o nível 2 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.	107
Figura 5.12 - Estado da água para MAWP de nível 2 com dano interno.....	108
Figura 5.13 - Tensão máxima para o nível 3 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.	108
Figura 5.14 - Estado da água para a MAWP de nível 3 com dano interno.	109
Figura 5.15 - Comportamento da tensão em relação ao tempo para os 3 níveis da API 579 com corrosão interna.	109
Figura 5.16 - Comportamento da tensão para a MAWP 1,66 MPa para o vaso com dano externo.....	111
Figura 5.17 - Distribuição de tensão para a MAWP 1 MPa para o vaso com dano interno.	112
Figura 5.18 - Comportamento da temperatura para a parede interna.	113
Figura 5.19 - Comportamento da temperatura para a parede externa.	114
Figura 5.20 - Tensão para a MAWP nível 3 em relação as temperaturas.	116
Figura 5.21 - Máxima MAWP para as temperaturas analisadas para corrosão externa.	117
Figura 5.22 - Tensão para a MAWP nível 2 em relação as temperaturas.	118
Figura 5.23 - Máxima MAWP para as temperaturas analisadas para corrosão interna.	119

Figura 5.24 - Comportamento da tensão no vaso sem dano para 204,44°C.	120
Figura 5.25 - Comportamento da tensão no vaso com corrosão externa para 204,44°C.	121
Figura 5.26 - Comportamento da tensão no vaso com corrosão interna para 204,44°C.	122
Figura. 5.27 - Comportamento da tensão para o vaso sem dano a 229,03°C.....	123
Figura. 5.28 - Comportamento da tensão para o vaso com corrosão externa a 229,03°C.	124
Figura. 5.29 - Comportamento da tensão para o vaso com corrosão interna a 229,03°C.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Limites de temperaturas para definir a faixa de fluência	60
Tabela 3.2 - Valores da espessura da parede do vaso de pressão para os planos longitudinal e circunferencial.	66
Tabela 3.3 - Propriedades termofísicas da água saturada a 177°C. (INCROPERA, et al., 2008).	73
Tabela 3.4 - Valores típicos do coeficiente de convecção de transferência de calor por convecção. (INCROPERA, et al., 2008).	75
Tabela 4.1 - Comparação das temperaturas máxima e mínimas em relação ao tipo de análise.	93
Tabela 5.1 - Máximas temperaturas nas paredes para os tipos de corrosão.	114
Tabela 5.2 - Propriedades termofísicas da água saturada para as temperaturas analisadas. (INCROPERA, et al., 2008).	115
Tabela 5.3 - Tensão máxima para as temperaturas analisadas para o vaso com corrosão externa.	116
Tabela 5.4 - Ganho de RSF com a redução de temperatura para corrosão externa.	117
Tabela 5.5 - Tensão máxima para as temperaturas analisadas para o vaso com corrosão interna.	118
Tabela 5.6 - Ganho de RSF com a redução de temperatura para corrosão interna.	119
Tabela 5.7 - Propriedades termofísicas da água saturada a 204,44°C. (INCROPERA, et al., 2008).	120
Tabela 5.8 - Propriedades termofísicas da água saturada a 229,03°C. (INCROPERA, et al., 2008).	123

LISTA DE SÍMBOLOS

t_{min}^c	Espeçura mínima requirida circunferencial
t_{min}^l	Espeçura mínima requirida longitudinal
API	American Petroleum Institute
C	Margem para corrosão
CLP	Controlador Lógico Programável
CTP	Critical Thickness Profile
D_f	Diâmetro efetivo do cristal
D_i	Diâmetro interno
e_c	Espeçura mínima para resistir a corrosão
e_s	Espeçura mínima de resistência natural
f	Frequência
FCA	Future Corrosion Allowance
FFS	Fitness for Service
ipy	Polegadas de penetração por ano
L	Comprimento de espeçura média
LOSS	Uniform Metal Loss
LTA	Locally Thinned Area
MAWP	Maximum Allowable Working Pressure
$MAWP^{1i}$	Maximum Allowable Working Pressure Nível 1 para Corrosão Interna
$MAWP^{2e}$	Maximum Allowable Working Pressure Nível 2 para Corrosão Externa

MAWP²ⁱ	Maximum Allowable Working Pressure Nível 2 para Corrosão Interna
MAWP^{ie}	Maximum Allowable Working Pressure Nível 1 para Corrosão Externa
mdd	Miligrama por decímetro quadrado de área exposta por dia
MFH	Maximum Fill Height
mmpy	Milímetro de penetração por ano
mpy	Milésimo de polegada de penetração por ano
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Q	Vazão
Re	Número de Reynolds
RSF	Remaining Strength Factor
t_{am}	Comprimento de espessura média
t_{mm}	Espessura mínima inspecionada
V	Velocidade
V_D	Volume da porção danificada
V_R	Volume de referência
V_U	Volume da porção adjacente
x_c	Comprimento de decaimento circunferencial
x_l	Comprimento de decaimento longitudinal

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 - Visão Geral

O estudo sobre a avaliação da integridade estrutural está sempre presente no cotidiano dos engenheiros, seja para projetar, estudar ou até mesmo avaliar se o equipamento está de acordo com as normas, para que assim realize a operação com segurança.

Essa análise geralmente é baseada em determinar se um parâmetro (ou mais) fique abaixo da admissível do respectivo material, estes parâmetros podem ser: resistência ao escoamento, limite de ruptura, limite de fluência, limite de fadiga, limitações de temperatura, entre outros. Caso algum desses parâmetros seja superior aos seus limites, diz-se que o equipamento está operando em risco e que pode sofrer dano a qualquer momento.

Para avaliar esses parâmetros, algumas normas são desenvolvidas com o intuito de auxiliar o comportamento do equipamento e verificar se o mesmo pode continuar em operação. Dentre essas normas, se destaca a *API (American Petroleum Institute) 579 (2000)*, que contém três níveis de *FFS (Fitness for Service)* para equipamentos sujeitos a corrosão por pite, corrosão generalizada uniforme, soldagens, fratura por fluência, dano por fogo, entre outros.

É nesse contexto que o presente trabalho foi desenvolvido, o mesmo irá focar em uma análise numérica para a avaliação da integridade estrutural de um vaso de pressão cilíndrico que está submetido à corrosão operando nas condições iniciais de projeto, essa avaliação será baseada pela *API 579* que contém os procedimentos para a

Adequação ao Serviço. A corrosão gera grandes riscos e deve-se tomar bastante cuidado quando ela ocorre nos equipamentos em geral devido ao aumento de tensão no material, fazendo com que o mesmo não possa operar com segurança, a medida em que a corrosão aumenta.

1.4 - Justificativa

Vários equipamentos e máquinas necessitam periodicamente de avaliações, e nos casos de vasos de pressão com corrosão não é diferente. A corrosão é um mecanismo que agrava e pode colocar em risco toda uma planta industrial, levando a inúmeros prejuízos econômicos tais como: reposição de peças e estruturas, parada não programada, acarretando em perda de produção.

A avaliação da integridade estrutural é amplamente utilizada em paradas para manutenção para averiguar se os equipamentos que possuem falha possam ou não continuar em operação; de um modo geral, é usada para prevenir, programar ou remediar o colapso desses equipamentos. Quanto mais objetivo e exato esta avaliação, maiores as chances de manter a integridade estrutural dos equipamentos de uma forma que nada não programado aconteça com esses equipamentos, em particular vasos de pressão, pois os mesmos são bastante perigosos e ao entrar em colapso, além de acarretar prejuízos financeiros, suas explosões comprometem o ambiente e algumas vezes a falha desses equipamentos vem acompanhado de perdas humanas.

1.5 - Motivação

Avaliações de integridade estrutural aliado à análise numérica em vasos de pressão representam uma importante contribuição em serviços de manutenção e prevenção de falhas, pois esses dois elementos levam a uma análise objetiva, prática e rápida dos resultados.

É nesse contexto que o presente trabalho está concentrado, em analisar a integridade estrutural em um vaso de pressão pela norma API 579 e com auxílio de soluções numéricas e programas computacionais como um meio de agilizar e mostrar resultados cada vez mais próximos da realidade, pois as avaliações desses equipamentos é um desafio no dia-a-dia das indústrias para que o mesmo opere em segurança.

1.6 - Objetivo Geral

A avaliação da integridade estrutural usando a API 579 e análise numérica estrutural e térmica transiente do comportamento de um vaso de pressão com uma região danificada por corrosão.

1.6.1 - Objetivos específicos

Intrínseco ao objetivo principal pode-se destacar alguns objetivos específicos.

- Procedimento para a modelagem e análise numérica do vaso de pressão com corrosão usando o método dos elementos finitos a partir de resultados de medição de espessura por ensaio ultrassônico;
- Análise da integridade estrutural do vaso de pressão pela API 579;
- Análise numérica do comportamento estrutural e térmico ao longo do tempo do vaso de pressão;
- Correlacionar os resultados encontrados pela API 579 e os resultados numéricos.

1.7 - Estrutura da Dissertação

O corrente trabalho de dissertação está organizado em seis capítulos, sendo cada um destes apresentando os seguintes conteúdos:

- Capítulo II: Revisão bibliográfica abordando uma introdução sobre vasos de pressão e corrosão e um embasamento teórico com os principais conceitos utilizados na avaliação da integridade estrutural em vasos de pressão e alguns modos de avaliação da integridade estrutural desenvolvido por alguns autores.
- Capítulo III: Apresenta uma introdução e uma caracterização do sistema de medição de espessura por ultrassom, aborda-se as vantagens e desvantagens, características e os módulos do sistema de medição por ultrassom. Uma apresentação da norma API 579, seus critérios de avaliação e uma explanação da seção 4, cujo presente trabalho estará direcionado. E, ao término do capítulo, a análise analítica estrutural e térmica do vaso de pressão proposto com dano externo e interno.

- Capítulo IV: Destina-se a abordagem numérica estrutural e térmica, com a modelagem e avaliação da integridade estrutural por elementos finitos do vaso de pressão proposto submetido à corrosão.
- Capítulo V: Mostra os resultados da análise transiente do vaso de pressão, como o comportamento da tensão até se chegar ao estado estacionário, a distribuição das temperaturas encontradas nas paredes do vaso de pressão para ambos os tipos de corrosão, análises de *RSF* e por último uma análise da integridade estrutural do vaso de pressão ao variar a temperatura de trabalho.
- Capítulo VI: Apresenta as conclusões do referido trabalho de dissertação e algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

Vasos de pressão constituem a parte mais importante os itens de maior custo em numerosas indústrias, tais como refinarias e outras instalações petrolíferas, indústrias químicas e petroquímicas em geral, indústrias farmacêuticas e alimentares. Os mesmos equipamentos também estão presentes, como itens de maior ou menor importância, em muitas outras indústrias. A importância do estudo do vaso de pressão resulta do fato de não serem produtos de linha de fabricação, sendo, pelo contrário, quase sempre projetados e construídos por encomenda, sob medida, para atender, em cada caso, a determinadas condições de desempenho, por isso, salva raras exceções, o projeto de um vaso de pressão deve ser feito individualmente para cada caso particular.

Os problemas de corrosão são frequentes e ocorrem nas mais variadas atividades, como por exemplo nas indústrias química, petrolífera, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transportes aéreo, ferroviário, metroviário, marítimo, rodoviário, e nos meios de comunicação, como sistemas de telecomunicações, na odontologia (restaurações metálicas, aparelhos de prótese), na medicina (ortopedia) e em obras de arte como monumentos e esculturas. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso.

Neste capítulo será apresentado os conceitos de vasos de pressão, principais tipos e formatos e a importância da espessura de cascos e tampos. Sobre a corrosão os tópicos abordados serão seus conceitos, principais tipos, taxa de corrosão e os métodos para combate à corrosão. Por fim, é importante ter conhecimentos de alguns conceitos muito usados na hora de realizar a integridade estrutural em vasos de pressão. Esses conceitos incluem: uma introdução aos princípios variacionais e o conceito de multiplicador m_a , comprimento de decaimento, volume de referência, o critério da média integral do limite e o conceito de RSF (*Remaining Strength Factor*). Por fim, uma introdução a vasos de pressão submetidos à corrosão, suas consequências e o que acontece nesses locais com perda de espessura será descrito no fim do capítulo.

2.2 - Vasos de Pressão

Vasos de pressão constituem a parte mais importante e os itens de maior custo em numerosas indústrias, tais como refinarias e outras instalações petrolíferas, indústrias químicas e petroquímicas em geral, indústrias farmacêuticas e alimentares. Os mesmos equipamentos também estão presentes, como itens de maior ou menor importância, em muitas outras indústrias. A importância do estudo do vaso de pressão resulta do fato de não serem produtos de linha de fabricação, sendo, pelo contrário, quase sempre projetados e construídos por encomenda, sob medida, para atender, em cada caso, a determinadas condições de desempenho, por isso, salva raras exceções, o projeto de um vaso de pressão deve ser feito individualmente para cada caso particular.

Vaso de pressão é um nome genérico para designar todos os recipientes pressurizados, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, entre os quais se contam os vasos de pressão propriamente ditos, e mais os reatores, torres de destilação, de fracionamento e de retificação e também os trocadores de calor, aquecedores, resfriadores, condensadores, refulvedores e caldeiras (TELLES, 1996).

Deve-se salientar, no entanto, que nem todo vaso de pressão é um equipamento de processo, estes por sua vez, denominam-se por serem equipamentos em indústrias de processo, que são indústrias nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas, e as que se dedicam a armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos. Nas indústrias de processo existem três condições específicas características que tornam necessário um maior grau de confiabilidade para os

equipamentos, em comparação com o que é normalmente exigido para as demais indústrias em geral:

- A grande maioria dessas indústrias trabalha em regime contínuo, dia e noite, durante muitos meses. Os equipamentos ficam, portanto, submetidos a um regime severo de operação, porque não há paradas diárias para manutenção e inspeção.
- Os diversos equipamentos formam uma cadeia contínua, através da qual circulam os fluidos de processo. Deste modo, a falha ou paralisação de um único equipamento, por qualquer motivo, obriga geralmente à paralisação de toda instalação. É evidente que toda paralisação não programada de uma indústria resulta sempre em vultosos prejuízos de perda de produção e de lucros cessantes, vindo daí a necessidade do máximo de segurança e confiabilidade de funcionamento desses equipamentos.
- Nessas indústrias de processo existem muitas vezes condições de grande risco, devido ao manuseio de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, ou em elevadas pressões ou temperaturas, condições para as quais qualquer falha pode resultar em um acidente grave ou mesmo em um desastre de grandes proporções.

Por esses motivos, os vasos de pressão constituem não só os equipamentos mais importantes da maioria das indústrias de processo, como também são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo unitário nas mesmas, representando em média 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo (TELLES, 1996). Esses mesmos equipamentos estão igualmente presentes, como itens de maior ou menor importância em muitas outras indústrias de outros ramos.

É importante enfatizar que o projeto e a construção de vasos de pressão são atividades de engenharia, e por isso, como qualquer outra atividade de engenharia, destinam-se a satisfazer, o melhor possível, uma necessidade social. Assim, é indispensável que sejam devidamente considerados todos os fatores éticos e sociais que possam estar envolvidos, ainda que de forma remota ou indireta. Além do aspecto de segurança em equipamentos cuja operação apresente risco potencial de acidentes, devem também ser considerados a segurança contra acidentes na fabricação e na montagem do vaso, bem como possíveis prejuízos a terceiros, danos ecológicos e infrações de marcas e patentes. A Figura (2.1) mostra um vaso de pressão sendo carregado para suporte.



Figura 2.1 - Vaso de pressão cilíndrico e extremidade esférica (TELLES, 1996).

2.2.1 - Formato e posição dos vasos de pressão

A parede de pressão de um vaso compõe-se basicamente do casco (ou cascos) do vaso e dos tampos de fechamento (heads), o casco dos vasos de pressão tem sempre o formato de uma superfície de revolução. Quase todos os vasos, com raras exceções, têm o casco com uma das três formas básicas: cilíndrica, cônica e esférica, ou combinações dessas formas; são comum, por exemplo, vasos com vários cascos cilíndricos e cônicos. A Figura (2.2) a seguir mostra alguns formatos de vasos de pressão.



(a)



(b)

Figura 2.2 - Vaso de pressão (a) esférico; e (b) cilíndrico (TELLES, 1996).

Quanto à posição de instalação, os vasos de pressão podem ser verticais, horizontais ou inclinados, como mostra a Fig. (2.3) a seguir.



(a)



(b)

Figura 2.3 - Vasos de pressão (a) vertical e (b) horizontal (TELLES, 1996).

BEDNAR (1981) define que para a maior parte dos vasos o casco é cilíndrico, essa preferência deve-se ao fato de que o formato cilíndrico é o mais fácil de se fabricar e transportar, presta-se bem à maioria dos serviços, e é o que permite aproveitamento de chapas inteiras para a fabricação do vaso. Teoricamente, o formato ideal para um vaso de pressão é uma esfera, com o qual se chega à menor espessura de parede e ao menor peso, em igualdade de condições de pressão e de volume contido. Entretanto, os vasos esféricos, além de somente se prestarem como vasos de armazenamento, são caros e difíceis de se fabricar, ocupam muito espaço e raramente podem ser transportados inteiros. Por esses motivos, os vasos esféricos só são econômicos para grandes dimensões, sendo empregados, nesses casos, para a armazenagem de gases sob pressão.

2.2.2 - Espessuras de cascos e de tampos

A espessura da parede de pressão de um vaso deve ser, no mínimo, o maior dos dois seguintes valores: $e_c + C$ ou e_s . Em que e_c é a espessura calculada mínima necessária para resistir à pressão (interna ou externa) e demais carregamentos atuantes sobre o vaso, C é a margem para corrosão e e_s é a espessura mínima de resistência estrutural. Esta espessura destina-se a garantir a estabilidade estrutural do vaso, para permitir a sua montagem, e evitar o colapso pelo próprio peso ou por ação do vento.

A espessura de resistência estrutural pode prevalecer sobre a espessura calculada para os vasos de diâmetro muito grande e para pressões muito baixas. Recomenda-se adotar para a espessura mínima estrutural o valor dado pela seguinte Eq. (2.1), com o mínimo de 4,0mm:

$$e_s = 2,5 + 0,001D_i + C \quad (2.1)$$

Em que D_i é o diâmetro interno. A margem para corrosão (*corrosion allowance*) é um acréscimo de espessura destinado a ser consumido pela corrosão (ou erosão) ao longo da vida útil prevista para o vaso. Teoricamente essa espessura será o produto da taxa anual de corrosão (mm/ano) pelo número de anos de vida útil considerada. É prática usual adotar-se os seguintes valores de margem para corrosão em vasos de aço-carbono ou aços de baixa liga:

- Meios poucos corrosivos: 1,5mm;
- Meios medianamente corrosivos (normais): 3mm;
- Meios muito corrosivos: 4 a 6mm.

SPENCE e TOOTH (1994) afirma que esses valores poderão ser empregados quando não for possível estabelecer valores confiáveis para a taxa anual de corrosão. Não é usual adotar margens para corrosão superiores a 6mm, o que não quer dizer no entanto que em casos especiais isso não possa ser feito. Em geral quando a margem resulta acima de 6mm, significa que o material não é adequado para o serviço em questão, recomendando-se selecionar outro material mais resistente a corrosão.

A margem para corrosão só pode ser dispensada nos casos em que a corrosão for reconhecidamente nula ou desprezível, ou quando houver uma pintura ou outro revestimento anticorrosivo adequado. Chama-se a atenção para que, embora esse acréscimo seja destinado especificamente para compensar o desgaste causado pela corrosão uniforme (que é a forma mais comum de corrosão), pode também servir para controlar outras formas de corrosão ou erosão que causem redução de espessura do material. É importante observar, entretanto, que qualquer sobre-espessura de nada vale contra algumas formas de corrosão que causam trincas profundas e não desgaste superficial (corrosão sob tensão e intergranular, por exemplo), que são justamente as mais graves e que devem ser combatidas por outros meios. A espessura final a ser adotada para o casco e os tampos do vaso será normalmente a espessura comercial da chapa imediatamente superior à espessura mínima necessária.

2.3 - Corrosão

Em um aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2011).

Sendo a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam. No seu todo, esse fenômeno assume uma importância na vida moderna, que não pode prescindir dos metais e suas ligas. Algumas dessas ligas estão presentes:

- Nas estruturas metálicas enterradas ou submersas, tais como minerodutos, oleodutos, gasodutos, adutoras, cabos de comunicação e de energia elétrica, píeres de atracação de embarcações, tanques de armazenamento de combustíveis como gasolina, álcool e óleo diesel, emissários submarinos;
- Nos meios de transportes, como trens, navios, aviões, automóveis, caminhões e ônibus;
- Nas estruturas metálicas sobre o solo ou aéreas, como torres de linhas de transmissão de energia elétrica, postes de iluminação, linhas telefônicas, tanques de armazenamento, instalações industriais, viadutos, passarelas, pontes;
- Em equipamentos eletrônicos, torres de transmissão de estações de rádio, de TV, repetidoras, de radar, antenas, etc.;
- Em equipamentos como reatores, trocadores de calor e caldeiras.

Todas essas instalações representam investimentos vultosos que exigem durabilidade e resistência à corrosão que justifiquem os valores investidos e evitem acidentes com danos materiais incalculáveis ou danos pessoais irreparáveis.

Com exceção de alguns metais nobres, como o ouro, que podem ocorrer no estado elementar, os metais são geralmente encontrados na natureza sob a forma de compostos, sendo comuns as ocorrências de óxidos e sulfetos metálicos. Os compostos que possuem conteúdo energético inferior ao dos metais são relativamente estáveis. Desse modo, os metais tendem a reagir espontaneamente com os líquidos ou gases do meio ambiente em que são colocados: o ferro se "enferruja" ao ar e na água, e objetos de prata escurecem quando expostos ao ar.

2.3.1- Formas de corrosão

A caracterização segundo a morfologia auxilia bastante no esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção, daí serem apresentadas a seguir as características fundamentais das diferentes formas de corrosão:

- Uniforme: a corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. É chamada por alguns de corrosão generalizada, mas essa terminologia não deve ser usada só para corrosão uniforme, pois pode-se ter também corrosão por pite ou alveolar generalizada. Também é uma corrosão comum em vasos de pressão e dutos, sendo este tipo de corrosão usada para o estudo deste trabalho. A Figura (2.4) abaixo representa na prática como essa corrosão se comporta.

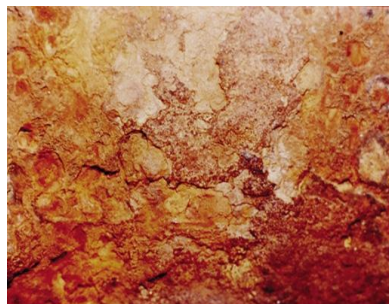


Figura 2.4 - Corrosão uniforme em chapa de aço-carbono (GENTIL, 2011).

- Por placas: a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações como mostrado na Fig. (2.5).



Figura 2.5 - Corrosão em placas em chapa de aço-carbono de costado de tanque (GENTIL, 2011).

- Alveolar: a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro como mostra a Fig. (2.6).



Figura 2.6 - Corrosão alveolar em tubo de aço-carbono (GENTIL, 2011).

- Puntiforme ou por pite: a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites. A Figura (2.7) mostra as cavidades (pites) que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior do que o seu diâmetro.



Figura 2.7 - Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável (GENTIL, 2011).

- Em torno do cordão de solda pode-se formar corrosão apresentada na forma esquematizada na Fig. (2.8). Ocorre em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, e a corrosão se processa intergranulamente.



Figura 2.8 - Corrosão em tubulação de aço inoxidável em torno de cordão de solda (GENTIL, 2011).

Entre os fatores que mais frequentemente estão envolvidos em casos de ataque localizado devem ser citados: relação entre áreas catódica e anódica, aeração diferencial, variação de pH e produtos de corrosão (óxidos, por exemplo) presentes na superfície metálica ou formados durante o processo corrosivo.

2.3.2- Taxa de corrosão

Para caracterizar a agressividade de um determinado meio corrosivo e fornecer fundamentos básicos para o controle da corrosão, realizam-se os chamados ensaios de corrosão. A corrosão dos materiais metálicos é influenciada por vários fatores que modificam o ataque químico ou eletroquímico, não havendo, portanto, um único método de ensaio de corrosão; na prática os fenômenos de corrosão se multiplicam, obrigando a variedade dos ensaios.

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. Implícita a esta definição encontra-se a ideia da capacidade das técnicas de monitoramento em detectar alterações no comportamento de materiais e componentes frente à corrosão, bem como de abrir possibilidade de medir alterações na taxa de corrosão dos mesmos em tempo real.

Uma unidade comumente usada para expressar a taxa de corrosão, relacionada com a variação da massa, é o *added* (miligramas por decímetro quadrado de área exposta por dia). Como é difícil visualizar a profundidade do ataque em *added*, é comum

converter essa unidade para outras que indicam a penetração o profundidade, sendo usada a *ipy*, isto é, polegadas de penetração por ano, tendo-se assim as Eqs. (2.2) e (2.3):

$$mdd \times \frac{0,00144}{d} = ipy \quad (2.2)$$

$$ipy \times 694 \times d = mdd \quad (2.3)$$

Em que *d* é a densidade em gramas por centímetro cúbico. A NACE Standard TM-01-69 (1969) recomenda expressar a taxa de corrosão em *mpy*, isto é, milésimo de polegada de penetração por ano, ou *mmpy* (milímetros de penetração por ano). Estas taxas são calculadas pelas Eqs. (2.4) e (2.5):

$$mpy = \frac{\text{perda de peso} \times 534}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do metal}} \quad (2.4)$$

$$mmpy = \frac{\text{perda de peso} \times 13,56}{\text{área} \times \text{tempo} \times \text{densidade do metal}} \quad (2.5)$$

Expressando-se a perda de peso em miligramas, a área em polegadas quadradas da superfície metálica exposta e o tempo em horas. Para a conversão de *mdd* em *mpy* ou *mmpy*, pode-se usar as Eqs. (2.6) e (2.7):

$$mpy = mdd \times \frac{1,44}{d} \quad (2.6)$$

$$mmpy = mdd \times \frac{0,036}{d} \quad (2.7)$$

Deve-se também observar que os valores da taxa de corrosão só podem ser utilizados para corrosão uniforme, não se aplicando para casos de corrosão localizada, por exemplo, puntiforme, intergranular e transgranular.

2.3.3 Métodos para combate à corrosão

Os métodos práticos, adotados para diminuir a taxa de corrosão dos materiais metálicos, podem ser esquematizados segundo VERNON (1957), da seguinte forma: as condições ambientais em que os diferentes métodos são comumente usados foram representadas pelas letras: A (atmosfera), W (submersa em água) e G (subterrânea).

1º Método - Baseado na Modificação do Processo:

- projeto de estrutura (A,W,G);
- condições da superfície (A, W, G);
- pela aplicação de proteção catódica (W, G).

2º Método - Baseado na Modificação do Meio Corrosivo:

- desaeração da água ou solução neutra (W);
- purificação ou diminuição da umidade do ar (A);
- adição de inibidores de corrosão (W) (A e G em casos especiais).

3º Método - Baseado na Modificação do Metal:

- aumento da pureza (A, W, G);
- adição de elementos de liga (A, W, G);
- tratamento térmico (A, W, G).

4º Método - Baseado nos Revestimentos Protetores:

- revestimentos com produtos da reação - tratamento químico ou eletroquímico da superfície metálica (A e W);
- revestimentos orgânicos - tintas, resinas ou polímeros (A, W, G);
- revestimentos inorgânicos - esmaltes, cimentos (A, W, G);
- revestimentos metálicos (A, W, G);
- protetores temporários (A).

Em todos esses métodos usados para controlar a corrosão, o fator econômico é primordial. Qualquer medida de proteção será vantajosa, economicamente, se o custo da

manutenção baixar. Assim, devem-se levar em consideração os gastos relacionados com a deterioração do equipamento, bem como os prejuízos resultantes dessas deteriorações, como, por exemplo, paradas de unidades, perda de eficiência, perda de produto, e contaminações.

A avaria de um simples tubo de um condensador pode ocasionar a parada total de uma unidade em operação, acarretando prejuízos elevados, enquanto a deterioração do tubo pode representar pequeno gasto.

2.4 - Embasamento Teórico

A avaliação da integridade estrutural de equipamentos é de fundamental importância para se evitar falhas e assim obter o maior rendimento possível dos componentes mecânicos presente em vários setores industriais. A capacidade de demonstrar a integridade estrutural de um componente em serviço que contém danos ou falhas é denominado de avaliação de integridade ou adequação ao serviço abordada pela API 579 e é amplamente tratado por avaliação de procedimentos como R6 (1995). As avaliações de *FFS* são realizadas periodicamente para determinar se um componente com danos existentes é adequado para o serviço até o final de algum período de operação desejado como a próxima paralisação, numa data futura específica ou o fim da sua vida útil. As avaliações incluem a determinação da manutenção para garantir a operação segura na condição atual com o dano e sua vida útil restante.

Para efeitos de avaliação da integridade estrutural, lugares com corrosão são geralmente denominados como *LTA (Locally Thinned Areas)*. Uma maneira de quantificar a *FFS* é utilizando o conceito de *RSF*, o mesmo é definido como a razão entre a carga de ruptura de um componente corroído em relação a carga de ruptura do componente não corroído. Segundo SESHADRI (2005) a falha implica que um pré-determinado critério limite (tensão admissível, *RSF*, etc) é excedido, e não necessariamente indicam colapso físico. Os critérios mais utilizados para avaliação de tubos corroídos são os de Von Mises e o de Tresca e são utilizados pela ASME B31G (1984), Modified B31G e KIEFNER e VIETH (1989). Os procedimentos padrões para avaliações *FFS* no setor de petróleo e gás e indústria petroquímica para componentes pressurizados são abordados na API 579 (2000), cujos procedimentos de avaliação, por sua vez, estão baseados no código ASME B31G e os critérios na PRC RSTRENG.

2.4.1 - O multiplicador m_α

MURA e LEE (1963) foram os primeiros a aplicar princípios variacionais para análise de cargas limite para o regime plástico, a partir disso, SESHADRI e MANGALARAMANAN (1997) se basearam em princípios variacionais em elasticidade para aplicação de cargas com limite de fronteiras e criou o método multiplicador m_α .

A formulação do método multiplicador m_α tem sido discutida em detalhe por REINHARDT e SESHADRI (2003). Esse método depende de dois multiplicadores: o de limite superior m^0 e do limite inferior m_L , que são respectivamente, a tensão admissível e a tensão atuante no material e pode ser expresso na Eq. (2.8):

$$m_\alpha = 2m^0 \frac{2(\frac{m^0}{m_L})^2 + \sqrt{\frac{m^0}{m_L}(\frac{m^0}{m_L} - 1)^2(1 + \sqrt{2} - \frac{m^0}{m_L})(\frac{m^0}{m_L} - 1 + \sqrt{2})}}{((\frac{m^0}{m_L})^2 + 2 - \sqrt{5})(\frac{m^0}{m_L})^2 + 2 + \sqrt{5}} \quad (2.8)$$

A questão do menor limite inferior de m_α tem sido discutida pelos mesmos autores. Pode-se reescrever a expressão para m_α normalizando com o multiplicador exato indeterminado (m). A equação que se segue é obtida e mostrada na Eq. (2.9)

$$R_\alpha = 2R^0 \left[\frac{2\zeta^2 + \sqrt{\zeta(\zeta - 1)^2(1 + \sqrt{2} - \zeta)(\zeta - 1 + \sqrt{2})}}{(\zeta^2 + 2 - \sqrt{5})(\zeta^2 + 2 + \sqrt{5})} \right] \quad (2.9)$$

Onde: $\zeta = \frac{m^0}{m_L}$, $R^0 = \frac{m^0}{m}$ e $R_\alpha = \frac{m_\alpha}{m}$. Devido à normalização, $R_\alpha = 1$ representa o limite superior ($R_\alpha > 1$) e de limite inferior ($R_\alpha < 1$), como mostrado na Fig. (2.9):

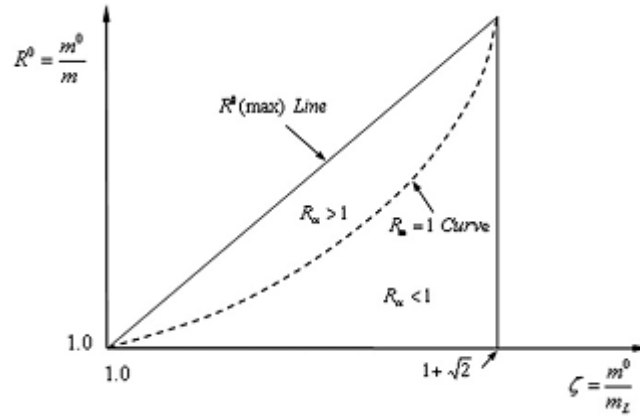


Figura. 2.9 - Regiões de limite inferior e superior do m_α .

Na Equação (2.11), o multiplicador exato (m) para um componente em análise é desconhecido, como também, $\frac{m^0}{m_L}$ que é igual a $\frac{(\sigma_e)_{max}}{\sigma_{ref}}$, onde $(\sigma_e)_{max}$ é a tensão admissível e σ_{ref} é a tensão atuante, é uma medida do fator de concentração de tensões teórico. A região delimitada pelas $m^0_{(max)}$, $1 \leq \frac{m^0}{m_L} \leq 1 + \sqrt{2}$ e $1 \leq \frac{m^0}{m_L} \leq 1 + \sqrt{2}$ são denominadas como "triângulo m_α ".

Este trabalho de dissertação não entra no âmbito de princípios variacionais, mas existe uma correlação entre esse método e o critério de Von Mises para análise estrutural, e esse critério é o adotado nesse estudo para a validação da análise numérica por elementos finitos juntamente com o conceito de RSF .

2.5 - Conceitos de Comprimento de Decaimento e Volume de Referência

Os conceitos de comprimento de decaimentos e volume de referência são discutidos por SESHADRI (2005) com o objetivo de identificar a porção cinematicamente ativa da casca que recebe a ação plástica. Durante o colapso plástico, no caso das LTA e pontos quentes, o escoamento plástico ocorre nas regiões localizadas como mostrado na Fig. (2.10):

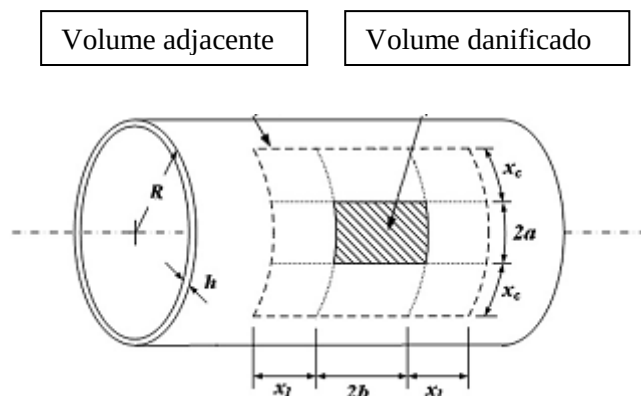


Figura 2.10 - Dimensões do comprimento de decaimento e volume de referência em uma casca cilíndrica.

Devido a esta ação plástica localizada, utiliza-se a representação de volume de referência, esses conceitos podem ser usados para demonstrar a integridade de estruturas contendo pontos quentes e dano por corrosão. Como veremos nesta dissertação, existe um ponto de tensão máxima que ocorre na zona corroída, porém, não será esse único ponto que sofrerá a ação plástica, mas sim o volume de referência (volume este que compreende toda a zona de dano e sua região de fronteira).

2.5.1 - Comprimento de decaimento para cascas cilíndricas

Os efeitos localizados das discontinuidades devido aos pontos quentes ou corrosão em componentes pressurizados é representado pelo conceito de comprimento de decaimento. O comprimento de decaimento é definido como a distância de um momento ou uma força aplicada até um ponto nos quais esses efeitos são quase que completamente dissipados ou tornam-se negligentes.

Para deduzir a expressão para comprimentos de decaimento na direção longitudinal, considere uma casca cilíndrica sujeita a um carregamento assimétrico. SESHADRI (2005) discutiu os conceitos de comprimento de decaimento para vasos de pressão e dutos, o comprimento do decaimento na direção longitudinal para cascas cilíndricas é dada na Eq. (2.10):

$$x_l = 2,50\sqrt{Rh} \quad (2.10)$$

Onde, de acordo com a Fig. (2.10), R é o raio externo e h a espessura.

Por sua vez, o comprimento de decaimento na direção circunferencial para cascas cilíndricas é dado na Eq. (2.11):

$$x_c = 6,10(R^3h)^{1/4} \quad (2.11)$$

TANTICHATTANONT, *et al.*, (2009) obteve o comprimento de decaimento circunferencial como mostrado na Eq. (2.12):

$$x_c = 6,3\sqrt{Rh} \quad (2.12)$$

Desde que a extensão do comprimento de decaimento em cascas é altamente dependente da curvatura das mesmas, os comprimentos de decaimentos circunferencial e longitudinal são diferentes.

2.5.2 - Volume de referência para cascas cilíndricas

Quando um dano ocorre em componentes pressurizados, uma parte adjacente ao dano participa do mecanismo da falha, o volume de referência é a soma do volume da porção danificada do vaso e o volume adjacente afetada pela porção danificada. O volume adjacente é o volume efetivo fora da área do dano, porém que participa da ação plástica e é parte do volume de referência, as dimensões do volume adjacente são calculadas usando comprimento de decaimento.

A forma de um retângulo equivalente é utilizada para representar a forma irregular de um ponto quente ou dano por corrosão em uma casca cilíndrica, apesar da espessura corroída devida a corrosão ter a forma irregular, uma profundidade uniforme pode ser considerada. Para uma largura de dano de $2x_a$ na direção circunferencial e comprimento de $2x_b$ na direção longitudinal da casca cilíndrica dada na Fig. (2.2), o volume danificado pode ser escrito na Eq. (2.13):

$$V_D = 4abh_D \quad (2.13)$$

Onde h_D é a espessura da área danificada. O volume adjacente é a região ao redor do volume com dano quem participa da ação plástica e é limitada pelo comprimento de decaimento da casca cilíndrica, portanto, o volume adjacente pode ser dado de acordo com a Eq. (2.14)

$$V_U = 4h[(x_c + a)(x_l + b) - ab] \quad (2.14)$$

x_l e x_c são os comprimentos de decaimento de cascas cilíndricas na direção longitudinal e circunferencial, respectivamente. O volume de referência é então dado pela Eq. (2.15):

$$V_R = V_D + V_U \quad (2.15)$$

A Figura (2.11) mostra um vaso de pressão com a área corroída e os volumes de referência e adjacente bem definidos.

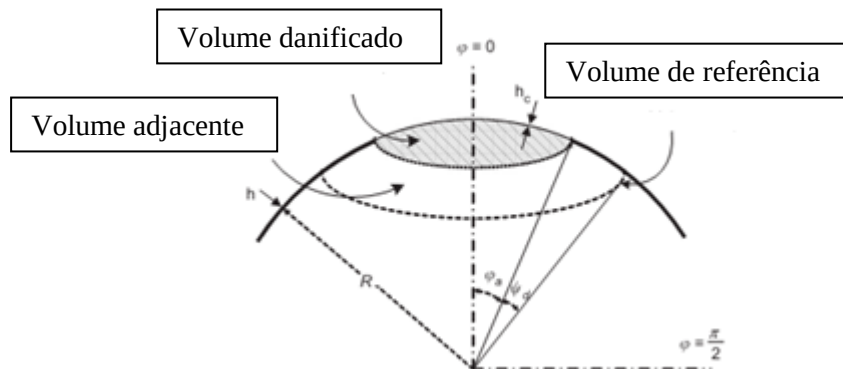


Figura 2.11 - Área de corrosão em um vaso de pressão e seu volume de referência e adjacente.

2.6 - Integridade Estrutural

A avaliação da integridade estrutural, essencialmente, implica na avaliação de manutenção, bem como na avaliação de vida restante. A fim de cumprir o requisito mínimo de manutenção, a tensão teórica limite no ponto danificado deve ser o mesmo que a tensão limite para o componente intacto. SESHADRI (2005) introduziu alguns conceitos variacionais de plasticidade, de modo a avaliar a integridade dos componentes de pressão e estruturas. O critério da média integral do limite é utilizada para avaliar o dano.

2.6.1 - O critério da média integral do limite para avaliação estrutural

O critério da média integral do limite foi originalmente usado em conjunto com o volume total dos componentes. Em componentes pressurizados com pontos quentes ou dano por corrosão, a falha ocorre localmente, portanto, a avaliação da porção cinematicamente ativa do volume que recebe a ação plástica é de considerável interesse. Para o uso do critério da média integral do limite em avaliações da integridade estrutural de componentes e estruturas com dano local, o critério deve ser aplicado para um volume de referência ao invés de levar em consideração toda a estrutura. Esse critério é escrito na Eq. (2.16):

$$\int_{V_R} \mu^o [f(s_{ij}^0) + (\varphi^o)^2] dV = 0 \quad (2.16)$$

Onde, o termo s_{ij}^0 é a tensão admissível estática para o iminente limite de escoamento; o termo φ^o é uma função de ponto que assume o valor de zero se s_{ij}^0 está no limite e permanece positiva abaixo do limite e V_R é o volume de referência.

Com base nessas proposições, o critério limite de Von Misses é expressado na Eq. (2.17):

$$f(s_{ij}^0) = (m_d^0 \sigma_e)^2 - \sigma_y^2 = 0 \quad (2.17)$$

O termo m_d^0 é o multiplicador de carga do limite da fronteira superior para o componente danificado, o termo σ_e é a tensão admissível estática equivalente e o termo σ_y é a tensão limite dependente da temperatura para o material.

Ao contrário de análises clássicas de limite, o critério da " média integral do limite" permite o cálculo do multiplicador do limite superior m^0 usando uma distribuição de tensão estática admissível.

2.6.2 - Dano por corrosão

Para componentes submetidos a dano por corrosão, critério da média integral do limite usando Von Misses é dado pela Eq. (2.18)

$$[(m_d^0 \sigma_{eU})^2 - \sigma_y^2]V_U + [(m_d^0 \sigma_{eC})^2 - \sigma_y^2]V_D = 0 \quad (2.18)$$

Onde, o sufixo U refere-se à região não corroída do volume de referência, o sufixo D refere-se à região corroída, o termo σ_{eU} é a tensão equivalente na casca sem dano e o termo σ_{eC} é a tensão equivalente na área corroída da casca.

Tanto σ_{eU} , quanto σ_{eC} são tensões primárias uniformes de membrana. Através da Eq. (2.17), obtém-se a Eq. (2.19):

$$m_d^0 = \sqrt{\frac{\sigma_y^2 V_R}{\sigma_{eU}^2 V_U + \sigma_{eC}^2 V_C}} \quad (2.19)$$

De uma maneira similar, pode-se obter o critério da média integral do limite usando Tresca, e o resultado é mostrado na Eq. (2.20):

$$[(m_d^0 \sigma_{eU}) - \sigma_y]V_U + [(m_d^0 \sigma_{eC}) - \sigma_y]V_D = 0 \quad (2.20)$$

E, analogamente, tem-se a Eq. (2.21):

$$m_d^0 = \frac{\sigma_y V_R}{\sigma_{eU} V_U + \sigma_{eC} V_C} \quad (2.21)$$

2.6.3 - Remaining Strength Factor (RSF)

Na API 579, o conceito de *RSF* é utilizado para definir a aceitabilidade para o equipamento se manter em operação mesmo com a presença de falha, em termos de cargas para colapso plástico, o *RSF* é definido como segue a Eq. (2.22):

$$RSF = \frac{P_{LD}}{P_{LU}} \quad (2.22)$$

Onde, o termo P_{LD} é a pressão de colapso para o componente antes da corrosão e o termo P_{LU} é a pressão de colapso para o componente com o dano. Se o *RSF* calculado for maior que o *RSF* permissível (RSF_a), o vaso de pressão pode continuar em operação sem qualquer tipo de reparo ou remediação até a próxima parada de manutenção programada. O valor recomendado para o RSF_a é 0,90 para equipamentos em serviços contínuos.

2.7 - Corrosão em Vasos de Pressão

Quando há perda de espessura devido à corrosão em componentes pressurizados, a *LTA* sofre uma maior deformação pelo fato de que a espessura nessa região é mais fina comparada com a área adjacente e maiores flexões podem ser geradas nas descontinuidades. Se a diferença de espessura entre duas zonas é muito grande, o efeito da zona não corroída pode ser considerado como próximo a um apoio de extremidade fixa, onde os efeitos das rotações na borda são quase que totalmente restringido. A Figura (2.12) mostra a distribuição do efeito de borda devido à pressão interna.

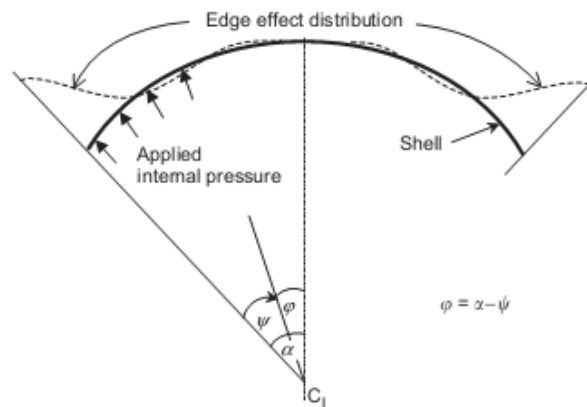


Figura. 2.12 - Distribuição do efeito de borda ao longo da casca do vaso de pressão.

2.8 - Considerações Finais

Neste capítulo, o conceito de vasos de pressão foi apresentado, além de suas características, tipos, formatos, posicionamento, materiais e tensões nos quais se submetem os vasos de pressão, de modo a facilitar a compreensão desses equipamentos muito importantes e presentes nas indústrias. Analogamente, também foi feita uma introdução sobre a corrosão, que como visto é um dano perigoso aos equipamentos e que possuem várias formas e meios para que a mesma se forme. Foi dada uma ênfase na corrosão devida a água primeiro porque a água será o fluido de trabalho do estudo como já apresentado e também para mostrar que é possível um vaso de pressão na qual escorra água aparecer danos por corrosão.

Algumas importantes contribuições a respeito de vasos de pressão como a aplicação do cálculo variacional e o método do multiplicador m_a através de princípios variacionais foi mencionado como uma alternativa da avaliação de dano por corrosão. Também observou-se como a zona corroída influencia o contorno não danificado do vaso de pressão.

Foi descrito também os dois principais critérios para a avaliação da integridade estrutural, Von Misses e Tresca, o primeiro, porém, será adotado nesse trabalho. Por último, apesar de não ser utilizado no texto, foi importante enfatizar o critério da média integral do limite para o estudo de comprimento de decaimento e volume de referência.

CAPÍTULO III

INSPEÇÃO E MEDIÇÃO DE ESPESSURA POR ENSAIO ULTRASSÔNICO E AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VASO DE PRESSÃO USANDO A API 579

3.1 - Introdução

Os ensaios não destrutivos são técnicas experimentais empregadas na avaliação da integridade do produto (detecção de falta de homogeneidades ou descontinuidades) sem alterar as características físicas, químicas ou geométricas dos mesmos, além de não interferir com sua posterior utilização. Existem vários tipos de Ensaios Não Destrutíveis, dentre os quais se destacam: ultrassom, líquido penetrante, gamagrafia, vibrações, radiografia e radiosopia, partículas magnéticas, emissão acústica e PIG instrumentado.

As avaliações da integridade estrutural para componentes contendo superfícies corroídas se torna estritamente necessária para verificar se o componente ainda pode continuar em operação nas condições de projeto. A Norma API 579 (2000) é uma norma americana criada para avaliar vários equipamentos sujeitos a solicitações do tipo: corrosão por perda de espessura, corrosão por pite, soldagem e fratura por fluência.

Este capítulo abordará o sistema de medição por ultrassom, pois é o método mais utilizado e recomendado pela API 579 para obtenção da perda de espessura nos vasos de pressão, suas vantagens e desvantagens, princípios de funcionamento e módulos desse sistema de medição. Uma apresentação da Norma API 579 será descrita, em particular a seção 4 (que se refere a perda de metal por corrosão generalizada), onde serão abordados as técnicas de avaliação e critérios de aceitação de modo a fazer uma

FFS do vaso de pressão. Por fim, a análise analítica estrutural e térmica do vaso de pressão proposto será realizada de acordo com as regras da API 579.

3.2 - Inspeção usando ensaio ultrassônico

O ensaio por ultrassom caracteriza-se por um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componentes a ser examinada como por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, microtrincas em forjados, escorias em uniões soldadas e muitos outros. Portanto, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades (SANTIM, 2003).

Os sons produzidos em um ambiente qualquer refletem-se ou reverberam nas paredes que consistem o mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Fenômenos como este apesar de simples e serem frequentes em nossa vida cotidiana, constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais. Assim como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico refletirá da mesma forma ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico refletirá da mesma forma ao incidir numa descontinuidade ou falha interna a este meio considerado. Através de aparelhos especiais, detectamos as reflexões provenientes do interior da peça examinada localizando e interpretando as descontinuidades, como mostrado na Fig. (3.1).

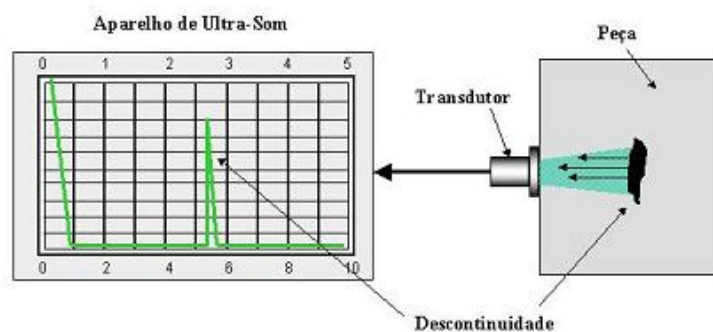


Figura 3.1 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom (ANDREUCCI, 2002).

Assim como todo ensaio não destrutivo, o ensaio ultrassônico possui vantagens principalmente por possuir alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades internas, por exemplo:

- Trincas devido a tratamento térmico, fissuras e outros de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia);
- Para interpretação das indicações, dispensa processos intermediários,
- agilizando a inspeção;
- No caso de radiografia ou gamagrafia, existe a necessidade do processo de revelação do filme, que via de regra demanda tempo do informe de resultados;
- Ao contrário dos ensaios por radiações penetrantes, o ensaio ultrassônico não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação.
- A localização, avaliação do tamanho e interpretação das descontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultrassônico, enquanto que outros exames não definem tais fatores. Por exemplo, um defeito mostrado num filme radiográfico define o tamanho mas não sua profundidade e em muitos casos este é um fator importante para proceder um reparo.

Por outro lado, o ensaio por ultrassom também tem suas desvantagens listadas a seguir:

- Requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor;
- O registro permanente do teste não é facilmente obtido;
- Faixas de espessuras muito finas constituem uma dificuldade para aplicação do método;
- Requer o preparo da superfície para sua aplicação.

As ondas acústicas podem ser divididas em longitudinais (onde a movimentação de uma partícula é na direção de propagação da onda) e transversais (onde a movimentação das partículas é perpendicular à direção de propagação da onda). A propagação de ondas acústicas ocorre devido a pequenos deslocamentos entre partículas consequentes em um determinado meio, desta maneira, uma partícula causa o deslocamento de outra, que irá causar o deslocamento de mais uma, e assim por diante. Assim esses pequenos deslocamentos vão se propagando, fazendo com que a onda se desloque. Devido às propriedades elásticas do meio, os deslocamentos acabam não se dando em apenas uma direção, mas sim indo e voltando, como uma mola.

3.3 - Princípios de Funcionamento dos Módulos do Sistema de Medição

"Sistemas de medição é o meio pelo qual as medições são efetuadas, e é construído de forma que permita a comparação do mensurando com a unidade de medição" (ALBERTAZZI e SOUSA, 2008), e com o ultrassom não é diferente, para permitir essa comparação, têm-se diversos fatores que permitem a medição do mensurando, esses principais fatores são: faixa de indicação e faixa de operação, os mesmos estão descritos a seguir.

3.3.1 - Faixa de indicação

Existem várias maneiras de uma onda sônica se propagar e cada uma com características particulares de vibrações diferentes. Definimos “Velocidade de propagação” como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. É importante lembrar que a velocidade de propagação é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da frequência.

Considerando uma onda sônica se propagando num determinado material com velocidade “V”, frequência “f”, e comprimento de onda “ λ ”, podemos relacionar estes três parâmetros como segue na Eq. (3.1):

$$V = \lambda \cdot f \quad (3.1)$$

A relação mencionada acima permite calcular o comprimento de onda pois a velocidade é em geral conhecida e depende somente do modo de vibração e o material, por outro lado a frequência depende somente da fonte emissora, que também é conhecida.

O conhecimento do comprimento de onda é de significativa importância, pois relaciona-se diretamente com o tamanho do defeito a ser detectado. Em geral, o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada no material deve ser da ordem de $\lambda/2$. Assim se inspecionarmos um material de velocidade de propagação de 5900 m/s com uma frequência de 1 MHz, a mínima descontinuidade que poderemos detectar será de aproximadamente 2,95 mm de diâmetro (ANDREUCCI, 2002).

3.3.2 - Faixa de operação

Para o entendimento dos fenômenos que iremos descrever a seguir imaginemos que o cristal piezelétrico gerador de ondas ultrassônicas seja formado por infinitos pontos oscilantes de forma que cada ponto produz ondas que se propagam no meio como mostra a Fig. (3.2) a seguir.

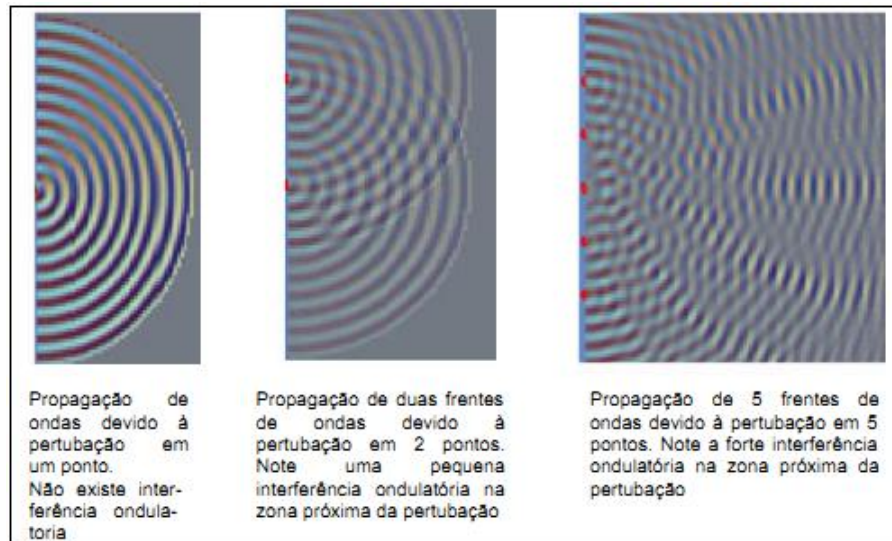


Figura 3.2 - O campo sônico nas proximidades do cristal (ANDREUCCI, 2002).

Note que nas proximidades do cristal existe uma interferência ondulatória muito grande entre as ondas. À medida que nos afastamos do cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, tornado uma só frente de onda. À região próxima do cristal onde os fenômenos acima se manifestam denomina-se Campo Próximo ou Zona de Fresnel¹ com uma extensão N que depende do diâmetro do cristal, e do comprimento de onda λ da vibração, podendo ser calculado pela Eq. (3.2):

$$N = \frac{Def^2}{4\lambda} \text{ ou } N = \frac{Def^2 \cdot f}{4v} \quad (3.2)$$

Onde, Def = diâmetro efetivo do cristal. É a área acusticamente efetiva do cristal, que depende da sua forma geométrica;

- Para cristais circulares: $Def = 0,97 \times \text{diâmetro do cristal}$;

¹ Físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788 - 1827).

- Para cristais retangulares, $Def = 0,97 \times$ metade do comprimento do lado maior do cristal;

E, f é a frequência ultrassônica; λ o comprimento de onda e v é a velocidade de propagação do som $= \lambda.f$.

O campo próximo representa para efeitos práticos, uma dificuldade na avaliação ou detecção de pequenas descontinuidades, isto é, menores que o diâmetro do transdutor, situadas nesta região próximas do transdutor. Portanto o inspetor de ultrassom deve ficar atento a este problema conforme a Fig. (3.3).

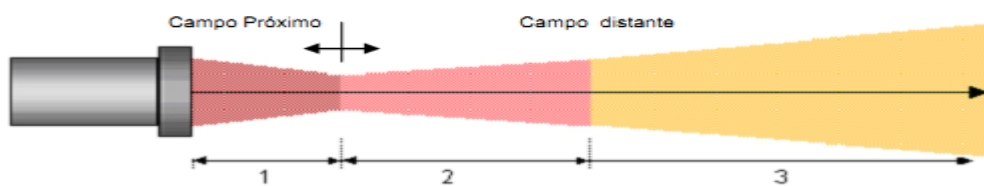


Figura 3.3 - Classificação teórica das zonas do campo sônico.

Campo sônico de um transdutor, representado pela região (1) onde pequenas descontinuidades são difíceis de serem detectadas (campo próximo), a região (2) descontinuidades maiores podem ser detectadas e na região (3) onde qualquer descontinuidade compatível com o comprimento de onda pode ser detectada. As linhas limítrofes do campo no desenho são didáticas, e não significa que não existe nenhuma vibração sônica nestas regiões. Para este caso uma solução seria o uso de transdutores de duplo cristal.

3.4 - Medição de Espessura por Ultrassom

Basicamente, o aparelho de ultrassom contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezelétrico, através do cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados transformados pelo mesmo em ondas ultrassônicas. Os sinais captados no cristal são mostrados na tela em forma de pulsos luminosos denominados “ecos”, que podem ser regulados tanto na amplitude, como posição na tela graduada e se constituem no registro das descontinuidades encontradas no interior do material.

A maneira mais prática de cálculo de espessura em uma inspeção por ultrassom com transdutores retos é dada pela Eq. (3.3)

$$e = \frac{vt}{2} \quad (3.3)$$

Tem-se que v é a velocidade da onda no material e t é o tempo decorrido de ida e volta da onda, isto é, o tempo que a onda choca com o final da espessura e retorna para o receptor. Por esse motivo, divide-se por dois como pode se observar na Eq. (3.3)

Os medidores de espessura por ultrassom podem incorporar circuitos digitais ou analógicos, e são aparelhos simples que medem o tempo do percurso sônico no interior do material através da espessura, registrando no display o espaço percorrido, ou seja a própria espessura. Operam com transdutores duplo-cristal, e possuem exatidão de décimos ou até centésimos de milímetros dependendo do modelo como mostra a Fig. (3.4). Neste caso, somente um transdutor que separa a emissão da recepção pode ajudar, para tanto, desenvolveu-se o transdutor de duplo-cristal, no qual dois cristais são incorporados na mesma carcaça, separados por um material acústico isolante e levemente inclinados em relação à superfície de contato. Cada um deles funciona somente como emissor ou somente como receptor, sendo indiferente qual deles exerce qual função. São conectados ao aparelho de ultrassom por uma cabo duplo, o aparelho deve ser ajustado para trabalhar agora com 2 cristais.



Figura 3.4 - Medidor de Espessura Digital Ultrassônico (Fonte: website Eddytronics).

São aparelhos bastante úteis para medição de espessuras de chapas, tubos, taxas de corrosão em equipamentos industriais, porém para a obtenção de bons resultados, é necessário sua calibração antes do uso, usando blocos com espessuras calibradas e de mesmo material a ser medido, com o ajuste correto da velocidade de propagação do som do aparelho.

O instrumento deve ser ajustado para a faixa de espessura a ser medida usando o blocos padrão graduado e calibrado, construído com material de mesma velocidade e atenuação sônica do material a ser medido.

A calibração do instrumento para uso deve ser feita usando no mínimo duas espessuras no bloco, conforme a faixa de espessura a ser medida. O instrumento deve ser ajustado para indicar a espessura correta das duas graduações selecionadas.

Os ajustes devem ser feitos de acordo com as instruções do fabricante. Se ambos os valores indicados estiverem corretos, o instrumento estará apto para uso. Se o instrumento estiver corretamente calibrado a leitura de duas diferentes espessuras não devem variar mais que 0,2 mm. Se não for possível atingir um ou ambos os valores, verificar se o instrumento/transdutor está sendo aplicado na faixa especificada pelo fabricante, assim como se o ajuste da velocidade de propagação sônica no instrumento está corretamente calibrado ou ajustado.

A norma ASTM E-797 padroniza os métodos de medição de espessuras. Para medições a altas temperaturas, e maior exatidão das medidas, recomenda-se correções devido à temperatura da peça dos valores lidos no aparelho medidor de espessura. Valor da espessura real aproximada é determinada através da aplicação direta da Eq. (3.4) indicada abaixo:

$$E_r = \frac{E_{mq} \cdot (V_{sa} - (K \cdot \Delta T))}{V_{sa}} \quad (3.4)$$

Em que, E_r é a espessura real [mm]; E_{mq} é a espessura da medida a quente [mm]; V_{sa} a velocidade do som no bloco à temperatura ambiente; ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície do bloco e do material inspecionado [$^{\circ}\text{C}$]; e K é a constante de redução da velocidade em função do aumento da temperatura, igual a 1 m/(s. $^{\circ}\text{C}$).

A Figura. (3.5) mostra um aparelho moderno de medição de espessura com transdutor Phased Array.



Figura 3.5 - Aparelho típico Phased Array da GE - Phasor XS (Fonte: website Eddytronic).

Para uma melhor precisão nas medidas sobre superfícies com alta temperatura é recomendado calibrar o aparelho num bloco separado com características iguais ao material que será medido, na mesma temperatura da peça. É importante saber que o cristal no transdutor não suporta altas temperaturas, e portanto a medição deve ser feita de forma rápida com resfriamento subsequente em água.

RODRIGUES *et al.*, (2010) desenvolveram um sistema automatizado de inspeção ultrassônica em dutos que foi modificado por BARROSO (2011) baseado em CLPs (Controlador Lógico Programável) e engrenagens. A Figura (3.6) mostra o sistema para medição de espessura em dutos.

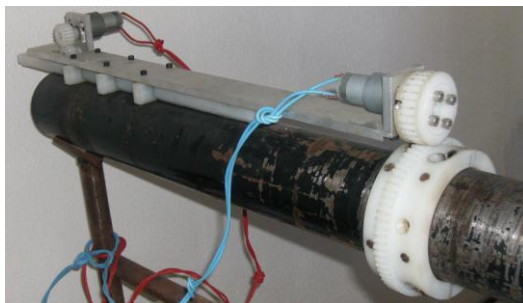


Figura 3.6 - Sistema automatizado para medição de espessura em dutos.

3.5 - A Norma API 579

A avaliação da integridade estrutural de equipamentos é de fundamental importância para se evitar falhas e assim obter o maior rendimento possível dos componentes mecânicos presente em vários setores industriais. A capacidade de demonstrar a integridade estrutural de um componente em serviço que contém danos ou falhas é denominado de avaliação de integridade ou *FFS* abordada pela API 579 e é amplamente tratado por avaliação de procedimentos como R6 (1995). As avaliações da *FFS* são realizados periodicamente para determinar se um componente com danos existentes é adequada para o serviço até o final de algum período de operação desejado como a próxima paralisação, numa data futura específica ou o fim da sua vida útil. As avaliações incluem a determinação da manutenção para garantir a operação segura na condição atual com o dano e sua vida útil restante.

A Norma API 579 é uma norma americana criada para avaliar vários equipamentos sujeitos a solicitações como descritas abaixo:

- Corrosão por perda de espessura;
- Corrosão por pite;
- Soldagem;
- Fratura por fluência.

O objetivo da Norma API 579 é verificar se o equipamento vai operar com segurança de acordo com o projeto original do mesmo, estando sujeitos as solicitações citadas. Caso a avaliação de Adequação ao Serviço (*Fitness-for-Service*), não satisfaça as condições de projeto original definido pelo equipamento, A Norma recomenda reparar ou mudar as condições de projeto.

Para realizar essas avaliações, os procedimentos em API 579 são desenvolvidos para superar as deficiências dos códigos de inspeção para vasos de pressão e tubulação que se baseiam principalmente nos dados empíricos e experiências anteriores (SIMS, *et al.*, 2006). Para equipamentos sob pressão em operação, a API 579 prescreve três níveis de avaliação da integridade estrutural. Segundo a API 579 (2000), os níveis 1-3 são cada vez mais rigorosos, respectivamente nessa ordem, cada nível de avaliação proporciona um equilíbrio entre o grau de conservadorismo, as condições submetidas, a habilidade do operador e da complexidade da análise:

- Nível 1 - As avaliações são os critérios de seleção mais conservador que geralmente incluem o uso de gráficos e tabelas, que podem ser implementadas por técnicos da planta com um mínimo de inspeção e informações do componente.
- Nível 2 - As avaliações envolvem cálculos detalhados para uso pelo pessoal da planta de engenharia com a ajuda de um procedimento recomendado.
- Nível 3 - As avaliações requerem uma análise racional completa por especialistas, onde técnicas avançadas computacionais, tais como análises de elementos finitos estão envolvidos.

O foco de estudo do presente trabalho está na seção 4 da API 579, a mesma trata da análise da integridade estrutural em vasos de pressão com perda de espessura generalizada devido a corrosão.

3.5.1 - Norma API 579 seção 4 (perda de metal generalizada)

Os procedimentos de avaliação nesta seção podem ser usados para avaliar todas as formas de perda de metal em geral (uniforme ou local) que exceda, ou está previsto para exceder a margem de corrosão (corrosion allowance) antes da próxima inspeção programada. A perda de metal geral pode ocorrer no interior ou fora do componente. O procedimento de avaliação a ser utilizado em uma classificação é dependente do tipo de dados disponíveis da espessura, as características da perda de metal (ou seja, uniforme ou local), a espessura da parede mínima exigida, e do grau de conservadorismo aceitável para a avaliação.

Métodos de cálculo são fornecidos para reclassificar o componente se os critérios de aceitação nesta seção não estão satisfeitos. Para componentes pressurizados (vasos de pressão e tubulações), os métodos de cálculo pode ser usado para encontrar uma Pressão Máxima de Trabalho Admissível (*MAWP*) e/ou temperatura coincidentes. Para os componentes de tanques de armazenamento, os métodos de cálculo podem ser usados para determinar uma Altura Máxima de Preenchimento (*MFH*). Os níveis 1 ou 2 para o procedimento de avaliação nesta seção aplicam-se somente se todas as seguintes condições forem satisfeitas:

- Os critérios de projeto original estavam de acordo com um código reconhecido ou padrão;
- O componente não está operando na faixa de fluência, a temperatura de projeto é inferior ou igual aos limites de temperatura para a faixa de fluência. O Engenheiro responsável deve ser consultado sobre o limite de fluência na faixa de temperatura para o material não listados nesta tabela;

Na Tabela (3.1) apresenta os limites de temperatura para definir a faixa de fluência.

Tabela 3.1 - Limites de temperaturas para definir a faixa de fluência

Material	Limite de Temperatura
Aço carbono e aços inoxidáveis ferríticos	399°C (750°F)
Aços de baixa liga	454°C (850°F)
Aços inoxidáveis austeníticos	510°C (950°F)
Ligas de alumínio	93°C (200°F)

As leituras da espessura são necessárias no componente onde a perda de metal ocorreu, para avaliar a perda de metal em geral. Duas opções para a obtenção de dados de espessura são apresentados: (1) leituras individuais do ponto da espessura e (2) perfis de espessura. Leituras do ponto da espessura podem ser usadas para caracterizar a perda de metal em um componente como geral, se não há diferenças significativas entre os valores obtidos em locais de monitoramento de inspeção. Se houver uma variação significativa nas leituras de espessura, a perda de metal podem ser localizadas, e perfis de espessura (leituras de espessura em uma grade prescritas) devem ser usado para caracterizar a espessura restante e tamanho da região de perda de metal.

As quantidades de espessura utilizada nesta seção para a avaliação da perda de metal em geral são a média das espessuras medidas e a espessura mínima medida. Se as leituras de espessura indicam que a perda de metal é geral, o procedimento nesta seção fornecerá uma avaliação adequada. No entanto, se a perda de metal é localizada e os perfis de espessura são obtidos, os procedimentos de avaliação desta seção podem produzir resultados conservadores, e a opção para realizar a avaliação utilizando os procedimentos de avaliação da secção 5 se torna mais adequado.

Um mínimo de 15 leituras de espessura por ultrassom é recomendado a menos que o nível do ensaio não destrutivo utilizado pode ser usado para confirmar que a perda de metal é geral. Em alguns casos, leituras adicionais podem ser necessárias com base no tamanho do componente, os detalhes de construção utilizados, bem como a natureza do ambiente, resultando na perda de metal. Se os perfis de espessura são utilizados na avaliação, o procedimento pode ser usado para determinar os locais de inspeção necessários e os perfis de espessura crítica (CTP's).

O espaçamento recomendado para a leitura da espessura pode ser modificado com base no tamanho real e extensão da região de perda de metal. Se a inspeção visual ou métodos não destrutivos são utilizados para quantificar a perda de metal, um espaço alternativo pode ser usado enquanto a perda de metal sobre o componente pode ser adequadamente caracterizado. Por exemplo, se a região de perda de metal é determinada a ser uniforme, com base em uma inspeção visual, o espaçamento utilizado para fazer as leituras de espessura pode ser aumentada sem uma redução na precisão na avaliação da Adequação ao Serviço.

Se a superfície corroída não é acessível para inspeção visual, então a distância recomendada do espaçamento para as leituras de espessura ao longo de cada plano de

inspeção é dada pela Eq. (3.5); no entanto, um mínimo de cinco leituras a espessura é recomendado para cada plano(s) de inspeção(ões).

$$L_s = \min [0,36 \cdot \sqrt{Dt_{min}}; 2 \cdot t_{nom}] \quad (3.5)$$

Onde L_s é o espaçamento recomendado para o perfil de espessura (mm:in); D é o diâmetro interno da casca (mm:in); t_{nom} é a espessura nominal ou fornecida do componente (mm: in) e t_{min} é a espessura mínima requerida (mm:in).

Além disso, as leituras de espessuras adicionais são necessárias se discrepâncias são observadas nas medidas de espessura relatada. Por exemplo, caso a leitura mais recente de espessura seja muito maior do que a leitura no momento da última inspeção, leituras adicionais podem ser necessárias para resolver as discrepâncias nos dados.

3.5.2 - Técnicas de avaliação e critérios de aceitação

Os critérios de aceitação dos componentes contendo corrosão em vasos de pressão são baseados nos cálculos das espessuras, caso os critérios definido pela Norma API 579 não esteja de acordo com o projeto, a mesma recomenda uma diminuição *MAWP*.

Nos vasos de pressão, a pressão e a temperatura de operação de um vaso são suas "condições de operação". Isto é, os pares de valores simultâneos de pressão e temperatura com os quais o vaso deverá operar em condições normais.

Raramente um vaso de pressão opera, durante toda a sua vida, em uma única condição estável de pressão e temperatura, ocorrendo em geral flutuações de maior e menor amplitude. Deve-se por isso distinguir os valores normais e os valores máximos de pressão e temperatura. Os primeiros são os valores de regime, e os máximos são os maiores valores que podem ser atingidos em operação normal, ou em quaisquer situações anormais ou transitórias que possam acontecer, tais como partida, parada normal, parada de emergência, falhas em sistemas de controle, entre outros.

Eventualmente um vaso poderá ter mais de uma condição de regime, isto é, poderá estar sujeito, em operação normal, a condições diferentes de trabalho, inclusive com fluidos diferentes. Quando este for o caso, o fato deverá ser considerado para a

fixação dos valores extremos de pressão e de temperatura de operação, e também para as condições de projeto de vaso.

Deve ser observado que a temperatura de operação do vaso é, em qualquer caso, a temperatura média real na parede do vaso. Essa temperatura é evidentemente função da temperatura do fluido contido, e na grande maioria dos casos é tomada como sendo essa própria temperatura. Fazem exceção, entretanto, os casos em que o vaso possua algum revestimento isolante interno (revestimento refratário) ou que haja troca de calor com o exterior, a exceção também se aplica nos casos em que as partes do vaso nos quais se efetuam trocas de calor (tubos de feixes tubulares e serpentinas, espelhos, etc.), cuja temperatura de operação será um valor intermediário entre as temperaturas dos dois fluidos (fluido quente e fluido frio).

Em alguns vasos, principalmente quando de grandes dimensões, a temperatura de operação pode variar muito de uma região para outra do mesmo vaso, sendo em certos casos possível estabelecer regiões definidas com diferentes temperaturas de operação, isso acarreta em regiões mais quentes que outras, ou em pequenos contornos mais quentes que o seu redor.

A *MAWP* pode se referir a cada uma das partes de um vaso, ou ao caso considerado como um todo. A *MAWP* de cada parte do vaso é a pressão que causa na parte em questão uma tensão máxima igual à tensão admissível do material na temperatura de operação correspondente à parte considerada. A *MAWP* é o valor usualmente empregado para a pressão de abertura da válvula de segurança.

Para que um componente satisfaça as condições do nível 1 da API 579, os seguintes critérios descritos nas Eq. (3.6) e (3.7) terão que ser validados.

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \quad (3.6)$$

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5 \cdot t_{min}, 0,1] \quad (3.7)$$

Onde, t_{am} é a média das espessuras, FCA a Taxa de Corrosão Futura Admissível e t_{mm} a mínima espessura encontrada na inspeção. Caso uma dessas inequações não sejam satisfeitas, o componente não pode realizar as condições de trabalho impostas, com isso, a API 579 recomenda uma redução de PMTA para que o componente opere nessas condições de corrosão na qual está sujeita, dada pela Eq. (3.8).

$$MAWP^1 = \frac{S.E.t_c}{(R_c) + (0,6.t_c)} \quad (3.8)$$

No qual, pela Eq. (3.9):

$$t_c = t_{am} - FCA \quad (3.9)$$

S é a tensão admissível do material, E é a eficiência da soldagem e R_c o raio interno mais a FCA, ou: R_c = R + FCA.

Analogamente, quando o componente não satisfaz o nível 1, recorre-se aos critérios de aceitação de nível 2 dadas pela Norma API 579, para essa avaliação, a Eq. (3.10) tem que ser validada.

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \cdot RSF_a \quad (3.10)$$

A diferença entre esses níveis é a presença do RSF_a, que para valores desconhecidos pode-se considerar 0,9 (este valor é conservativo segundo a API 579).

Se a Eq. (3.10) não for satisfeita, a Norma API 579, através da Eq. (3.11) calcula uma nova redução de PMTA baseada no nível 2 de sua avaliação.

$$MAWP^2 = \frac{S.E.\frac{t_c}{RSF_a}}{(R_c) + (\frac{0,6.t_c}{RSF_a})} \quad (3.11)$$

O último nível da avaliação da integridade estrutural para os componentes que não satisfizerem os níveis 1 e 2 se baseiam em soluções numéricas por softwares. O método dos elementos finitos é usado tipicamente para calcular as tensões em um componente, no entanto, outros métodos numéricos, tais como elementos de contorno ou método de diferenças finitas podem também ser usados. Manuais de solução também podem ser usados se a solução corresponde à geometria do componente e condição de carga. A avaliação pode ser baseada em uma análise de tensão linear com aceitabilidade determinada utilizando categorização de tensão, ou uma análise de tensão não-linear com a aceitabilidade determinada usando uma carga de colapso plástico.

Dados de espessura, bem como a geometria do componente, propriedades do material e condições de carga são necessários para uma avaliação de nível três. Os

dados de espessura podem ser usados diretamente em modelo de elementos finitos do componente. Se os dados de perfil de espessura estão disponíveis, a grade de espessura pode ser diretamente mapeada em um modelo de elemento finito tridimensional usando duas ou três dimensões de elementos contínuos, conforme aplicável. Esta informação também pode ser usada se o componente é modelado utilizando elementos de casca.

O método a ser usado para analisar o nível 3 da API 579 nesse trabalho é o Método dos Elementos Finitos (*MEF*), e o mesmo é uma técnica de análise numérica para a solução de problemas mecânicos contínuos que pode ser aplicada a uma grande variedade de problemas de engenharia. Este método é baseado no princípio da discretização do contínuo, e sua aplicabilidade aumentou muito a partir da sua implementação em programas de computadores, (ALBUQUERQUE, 1999) dentre o qual, foi usado o software NX NASTRAN para análise estrutural e NX THERMAL para a análise térmica nesse estudo.

3.6 - Estudo de Caso

O vaso de pressão analisado corresponde a um vaso de pressão de aço ASTM A516 Grau 70 (aço inoxidável austenítico do tipo não sensitizável de baixo teor de carbono), esse material é muito utilizado para a construção de vasos de pressão devido a sua alta resistência a corrosão.

A seguir segue as seguintes características de trabalho: pressão de trabalho de 400 psi (2,76MPa); temperatura de trabalho de 177°C (350°F); diâmetro interno de 2,03m (80 in); espessura: 31,75mm (1,25 in); taxa futura de corrosão permissível (FCA): 2,54 mm (0,1 in); perda de metal uniforme de 11,43 mm (0,45 in); tensão admissível de 137,70 MPa (19,9 kpsi); fluido de trabalho vapor d'água; estado do fluido de trabalho para essas condições iniciais de trabalho é líquido comprimido.

3.6.1 - Inspeção por ultrassom para medição de espessura

Utilizando dados obtidos por ensaio ultrassônico de medição de espessura encontradas na API 579 (2000), na qual as unidades utilizadas pela API 579 se encontra no Sistema Inglês, obteve-se uma grade com os valores da perda de espessura da região

danificada pela corrosão. Apresenta-se na Fig. (3.7) a grade com os valores da espessura da região danificada (área azul).

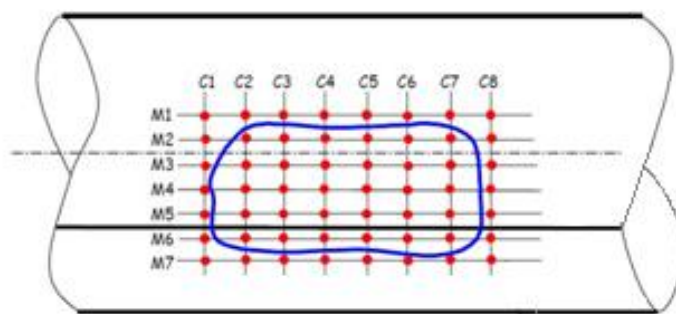


Figura 3.7 - Grade de inspeção na região com corrosão generalizada.

O perfil da perda de espessura da região é obtido onde cada ponto está a uma distância longitudinal (horizontal) e circunferencial (vertical) de 50,8 mm (2,0 in). A Tabela (3.2) mostra os valores para a espessura da parede do vaso nos planos longitudinal e circunferencial.

Tabela 3.2 - Valores da espessura da parede do vaso de pressão para os planos longitudinal e circunferencial.

Plano de inspeção (mm)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
M1	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48
M2	30,48	27,94	25,4	25,4	24,13	22,86	24,13	30,48
M3	30,48	22,86	24,13	22,86	20,32	24,13	25,4	30,48
M4	30,48	21,59	21,59	25,4	24,13	27,94	22,86	30,48
M5	30,48	22,86	22,86	21,59	25,4	25,4	25,4	30,48
M6	30,48	24,13	25,4	22,86	27,94	22,86	24,13	30,48
M7	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48	30,48

Pela Tab. (3.2), o menor valor de espessura encontra-se na linha M3, coluna C5, que corresponde a uma espessura mínima (t_{mm}) de 20,32 mm (0,80 in).

3.7 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Corrosão

Analisa-se nesta seção o vaso de pressão com a corrosão utilizando os dois primeiros níveis propostos pela API 579 (*Fitness for Service*).

Na avaliação da integridade estrutural em vasos de pressão, o conceito da perda de metal uniforme, (LOSS), se torna presente quando considera corrosão interna.

Utilizam-se os valores de espessura de parede na região externa, e em seguida repete-se os pontos para corrosão interna.

3.7.1 - Análise do vaso de pressão com corrosão externa pelos níveis 1 e 2 da API 579

Seguem-se os passos a seguir para avaliar a adequação ao serviço do vaso com a região danificada pela corrosão externa.

Calcula-se a espessura mínima requerida circunferencial e longitudinal, respectivamente, apresentadas nas Eqs. (3.12) e (3.13), e a maior delas irá servir de referencial para futuros cálculos:

$$t_{\min}^C = \frac{P.R_c}{(S.E) - (0,6.P)} \quad (3.12)$$

No qual, S e E são respectivamente a tensão admissível do material e a eficiência da soldagem (que para esse caso é desconhecido e será usado 0,85), P é a pressão original de projeto, 2,76 MPa (400 psi), e R_c já foi definido como sendo:

$$R_c = R + FCA = 40 + 0,1 = 40,1in = 1,02m$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$t_{\min}^C = \frac{400.40,1}{(19,9.0,85) - (0,6.400)} = 0,96in = 24,4mm$$

Analogamente:

$$t_{\min}^L = \frac{P.R_c}{(2.S.E) + (0,4.P)} = \frac{400.40,1}{(2.19,9.0,85) + (0,4.400)} = 0,47in = 12mm \quad (3.13)$$

A partir desses dois valores, usaremos o máximo entre os dois, que no caso:

$$t_{\min} = \max[t_{\min}^C, t_{\min}^L] = 0,96\text{in} = 24,4\text{mm}$$

Calcula-se agora espessura mínima inspecionada pelo ultrassom e a taxa de espessura remanescente dada pela Eq. (3.14), respectivamente:

$$t_{\text{mm}} = 20,32 \text{ mm (0,8 in) (Ver Tabela 3.2);}$$

$$R_t = \frac{t_{\text{mm}} - FCA}{t_{\min}} = \frac{0,8 - 0,1}{0,96} = 0,73\text{in} = 18,5\text{mm} \quad (3.14)$$

A Norma API 579 mostra que se: $t_{\min}^L < t_{\text{mm}} - FCA$, pode-se descartar o uso das medidas circunferenciais. De fato, pela Eq. (3.15);

$$t_{\min}^L < t_{\text{mm}} - FCA \Rightarrow 0,47 < 0,8 - 0,1 \Rightarrow 0,47 < 0,7 \text{ (verdadeiro)} \quad (3.15)$$

E, portanto não haverá necessidade das equações circunferenciais.

O próximo passo é determinar o comprimento de espessura média, como mostra a Eq. (3.16):

$$L = Q \cdot \sqrt{D \cdot t_{\min}} \quad (3.16)$$

O fator Q é encontrado com a seguinte Eq. (3.17):

$$Q = 1,123 \cdot \left[\left(\frac{1 - R_t}{1 - \frac{R_t}{RSF_a}} \right)^2 - 1 \right]^{0,5} \quad (3.17)$$

A Norma API 579 diz que quando não se conhece o Fator de Força Restante Permissível (RSF_a), recomenda-se usar 0,9; com isso temos: $Q = 1,1$. Finalmente, encontrado o valor de $L \cong 254 \text{ mm (10 in)}$ para o valor do comprimento de espessura média, pode-se obter uma média das espessuras mínimas, para isso, encontra-se nas colunas C3, C4, C5, C6 e C7, a espessura mínima mensurada, e faz uma média

aritmética em relação ao comprimento de espessura média (L), como L = 254 mm (10 in), para cada valor encontrado na coluna, repete-se mais uma vez, e assim tem-se 10 valores de espessura para fazer a média, como mostra a Eq. (3.18)

$$t_{am} = \frac{2 \cdot (0,85 + 0,85 + 0,8 + 0,9 + 0,9)}{L} = 0,86in = 21,8mm \quad (3.18)$$

A partir disso, avaliação pode ser realizada e pode-se determinar se o componente pode continuar com a operação de acordo com as inequações abaixo do nível 1 da API 579, como visto anteriormente:

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \Rightarrow 0,86 - 0,1 \geq 0,96 \Rightarrow 0,76 \geq 0,96 \text{ (falso)}$$

E;

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0,5 \cdot t_{min}, 0,1] \Rightarrow 0,8 - 0,1 \geq \max[0,5 \cdot 0,96; 0,1] \Rightarrow 0,7 \geq 0,481 \text{ (verdadeiro)}$$

Como uma das inequações é falsa, o nível 1 da API 579 não é satisfeito, nessas condições, o vaso pode apenas operar com segurança com a seguinte redução de PMTA de acordo com o nível 1 da API 579:

$$MAWP^{1e} = \frac{S \cdot E \cdot t_c}{(R_c) + (0,6 \cdot t_c)}$$

mas:

$$t_c = t_{am} - FCA = 0,86 - 0,1 = 0,76in = 0,0193m$$

Então:

$$MAWP^{1e} = \frac{19,9 \cdot 0,85 \cdot 0,76}{(40,1) + (0,6 \cdot 0,76)} = 316,97psi = 2,18MPa$$

Portanto, a redução de MAWP que a norma API 579 recomenda é de 2,18 MPa (316,97 psi) . Como o nível 1 não foi satisfeito, o nível 2 da norma tem que ser realizado.

A diferença entre esses níveis é a presença do RSF_a , conforme já apresentado, que para valores desconhecidos pode-se considerar 0,9 (este valor é conservativo segundo a API 579). Com isso, o vaso de pressão pode operar com segurança se a seguinte inequação for satisfeita:

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \cdot RSF_a \Rightarrow 0,86 - 0,1 \geq 0,972 \cdot 0,9 \Rightarrow 0,76 \geq 0,875 \text{ (falso)}$$

Com isso, o nível 2 da API 579 também não satisfaz e a nova redução de PMTA será de:

$$MAWP^{2e} = \frac{S.E. \cdot \frac{t_c}{RSF_a}}{(R_c) + (\frac{0,6 \cdot t_c}{RSF_a})} = \frac{19,9 \cdot 0,85 \cdot \frac{0,76}{0,9}}{(40,1) + (\frac{0,6 \cdot 0,76}{0,9})} = 351,76 \text{ psi} = 2,42 \text{ MPa}$$

De acordo com o nível 2 da API 579, a pressão máxima do vaso de pressão para entrar em colapso será de 2,42 MPa (351,76 psi).

3.7.2 - Análise do vaso de pressão com corrosão interna pelos níveis 1 e 2 da API 579

O procedimento é bastante similar em relação a análise da corrosão externa, porém é somado o termo da $LOSS$ em duas equações, são elas:

$$t_c = t_{am} - FCA - LOSS = 0,86 - 0,1 - 0,45 = 0,31 \text{ in} = 7,87 \text{ mm}$$

$$R_c = R + FCA + LOSS = 40 + 0,1 + 0,45 = 40,55 \text{ in}$$

As novas espessuras circunferencial e longitudinal são, nessa ordem:

$$t_{min}^C = \frac{P \cdot R_c}{(S.E) - (0,6 \cdot P)} = \frac{400 \cdot 40,55}{(19,9 \cdot 0,85) - (0,6 \cdot 400)} = 0,97 \text{ in} = 25 \text{ mm}$$

$$t_{min}^L = \frac{P \cdot R_c}{(2 \cdot S.E) + (0,4 \cdot P)} = \frac{400 \cdot 40,55}{(2 \cdot 19,9 \cdot 0,85) + (0,4 \cdot 400)} = 0,48 \text{ in} = 12,1 \text{ mm}$$

Analogamente para a corrosão externa, usa-se o máximo desses dois valores:

$$t_{\min} = \max[t_{\min}^C, t_{\min}^L] = 0,97\text{in} = 25\text{mm}$$

Com isso, é feita a análise do nível 1 da API 579:

$$t_{am} - FCA - LOSS \geq t_{\min} \Rightarrow 0,86 - 0,1 - 0,45 \geq 0,97 \Rightarrow 0,31 \geq 0,97 \text{ (falso)}$$

$$t_{mm} - FCA - LOSS \geq \max[0,5 \cdot t_{\min}, 0,1] \Rightarrow 0,8 - 0,1 - 0,45 \geq \max[0,5 \cdot 0,97; 0,1] \Rightarrow 0,25 \geq 0,49 \text{ (falso)}$$

Logo, o nível 1 da API 579 não satisfaz, calculando a pressão que o vaso de pressão pode operar com segurança, temos:

$$MAWP^{1i} = \frac{S.E. \cdot t_c}{(R_c) + (0,6 \cdot t_c)} = 128,73\text{psi} = 0,89\text{MPa}$$

Da mesma maneira, como o nível 1 não foi satisfeito, é preciso avaliar pelo nível 2 da API 579, portanto:

$$t_{am} - FCA - LOSS \geq t_{\min} \cdot RSF_a \Rightarrow 0,86 - 0,1 - 0,45 \geq 0,97 \cdot 0,9 \Rightarrow 0,76 \geq 0,88 \text{ (falso)}$$

Não satisfazendo o nível 2 da API 579, e a pressão que pode operar com segurança será:

$$MAWP^{2i} = \frac{S.E. \cdot \frac{t_c}{RSF_a}}{(R_c) + (\frac{0,6 \cdot t_c}{RSF_a})} = 142,78\text{psi} = 0,98\text{MPa}$$

3.7.3 - Cálculo do comprimento de decaimento e do volume de referência

Como apresentado no Capítulo II, o comprimento de decaimento longitudinal e circunferencial podem ser calculados respectivamente, pelas Eqs. (2.3) e (2.4)

$$x_l = 2,50\sqrt{Rh} = 2,50\sqrt{41,25 \times 1,25} = 17,95in = 0,46m$$

$$x_c = 6,10(R^3h)^{1/4} = 6,1(41,25^3 \times 1,25)^{1/4} = 104,98in = 2,67m$$

Portanto, o volume da área danificada e o volume adjacente podem ser calculados como se seguem, respectivamente

$$V_D = 4abh_D$$

$$V_U = 4h[(x_c + a)(x_l + b) - ab]$$

Onde a e b são respectivamente a metade do comprimento da zona corroída longitudinal e circunferencial, se o comprimento longitudinal vale 0,36 m (14 in) e o circunferencial é igual a 0,30 m (12 in), portanto temos: a = 177,8 mm (7 in) e b = 152,4 mm (6 in). h_D pode ser a média das espessuras, logo, $t_{am} = h_D = 0,86in = 21,8mm$ Então:

$$V_D = 4 \times 7 \times 6 \times 0,86 = 144,48in^3 = 0,0024m^3$$

$$V_U = 4 \times 1,25[(104,98 + 7)(17,95 + 6) - 7 \times 6] = 13199,6in^3 = 0,216m^3$$

Logo, o volume de referência é dado por:

$$V_R = V_D + V_U = 144,48 + 13199,6 = 13344,08in^3 = 0,219m^3$$

Portanto, esse volume recebe toda a ação plástica no caso de um colapso provocado pela ação da corrosão no vaso de pressão.

3.8 - Análise Térmica Analítica do Vaso de Pressão sem Corrosão

Nas condições de trabalho apresentada, a água está a uma temperatura de 177°C (350°F), que segundo a Eq. (3.19):

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273 \Rightarrow T(K) = 177 + 273 \Rightarrow T(K) = 450K \quad (3.19)$$

Nessas condições, com 450K e operando com uma pressão de trabalho de 2,76MPa (400 psi), a água se encontra como líquido comprimido, vamos considerar que a água nesse estado é incompressível e a literatura permite ainda dizer que pode-se aproximar essas condições com a do líquido saturado a dada temperatura (450K), pois a variação do seu volume específico é muito pequena quando comparada com a do líquido saturado a mesma temperatura. Desse modo, a Tabela (3.3) mostra a propriedade da água para a temperatura de 450K (INCROPERA, *et al.*, 2008).

Tabela 3.3 - Propriedades termofísicas da água saturada a 177°C. (INCROPERA, *et al.*, 2008).

Temperatura (K)	Massa Específica (Kg/m³)	Viscosidade (N.s/m²)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Número de Prandtl
450	890,472	0,000152	0,678	0,99

Na análise térmica, o primeiro passo é determinar o coeficiente de convecção entre o fluido e a parede interna do duto, a determinação desse coeficiente não é trivial, precisando assim de uma série de fatores como vai ser descrito a seguir.

Segundo ZOCOLER, *et al.*, (2004), pode-se calcular a vazão de água em uma tubulação para aplicação contínua através da Fórmula de Bresse², dada pela Eq. (3.20):

$$Q = \left(\frac{D_i}{K'}\right)^2 \Rightarrow Q = \frac{2,03^2}{1} \Rightarrow Q = 4,12m^3/s \quad (3.20)$$

Em que, Q é a vazão [m³/s], D_i é o diâmetro interno e K' varia de 0,9 a 1, essa constante é usada para minimizar os custos de fabricação. O valor adotado nesse caso foi 1.

2 Jaques Charle Bresse (1822-1883), Vienne, Isère, professor de Matemática em Paris.

Com o valor da vazão e de posse da área transversal do vaso de pressão, podemos encontrar a velocidade com a qual a água atravessa o vaso pela Eq. (3.21)

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4,12}{\pi D_{\text{int}}^2 / 4} = \frac{4,12}{\pi 2,03^2 / 4} = 1,27 \text{ m/s} \quad (3.21)$$

Onde, V é a velocidade do fluido [m/s] e A se refere a área da circunferência delimitada pelo diâmetro interno [m²]. Com o valor da velocidade e com o auxílio da Tab. (3.3), é possível determinar o número de Reynolds pela Eq. (3.22), afim de descobrir se o escoamento é laminar, transitório ou turbulento.

$$Re = \frac{\rho \cdot D_{\text{int}} \cdot V}{\mu} \Rightarrow Re = \frac{890,472 \cdot 2,032 \cdot 1,27}{0,000152} \Rightarrow Re = 15,1 \times 10^6 \quad (3.22)$$

Onde Re é o número de Reynolds, ρ a massa específica [Kg/m³] e μ a viscosidade dinâmica [N.s/m²]. Portanto, o escoamento é turbulento, pois o número de Reynolds nesse caso é maior que a região de transição (2300 a 10000). Para escoamentos turbulentos, a equação de Dittus-Boelter para aquecimento (WINTERTON, 1998) permite calcular o número de Nusselt pela Eq. (3.23) com os dados do número de Reynolds e o número de Prandtl, que é dado pela Tab. (3.3):

$$Nu = 0,0243 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0,4} \Rightarrow Nu = 0,0243 \cdot (15,1 \times 10^6)^{4/5} \cdot (0,99)^{0,4} \Rightarrow Nu = 13317,47 \quad (3.23)$$

Onde Nu é o número de Nusselt e Pr é o número de Prandtl, finalmente, a partir do número de Nusselt e do coeficiente de condutividade térmica da água mostrado na Tab. (3.3), é possível calcular o coeficiente convectivo entre o fluido de trabalho e a parede interna do vaso pela Eq. (3.24):

$$h_1 = \frac{Nu \cdot k}{D_{\text{int}}} \Rightarrow h_1 = \frac{13317,47 \cdot 0,678}{2,029} \Rightarrow h_1 = 4450,1 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.24)$$

Esse valor do coeficiente de convecção está dentro da faixa para valores típicos do coeficientes de convecção para a transferência de calor por convecção forçada sem mudança de fase, como mostrado na Tab. (3.4) (INCROPERA, *et al.*, 2008):

Tabela 3.4 - Valores típicos do coeficiente de convecção de transferência de calor por convecção. (INCROPERA, et al., 2008).

Processo	h [W/m²K]
Convecção Natural	
Gases	2 – 25
Líquidos	50 – 1.000
Convecção Forçada	
Gases	25 – 250
Líquidos	100 – 20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2.500 – 100.000

Observa-se três transferências de calor nessa situação:

- Transferência de calor por convecção entre o fluido e a parede interna do duto, que está na temperatura ambiente;
- Transferência de calor por condução entre as paredes do duto;
- Transferência de calor por convecção entre a parede externa do duto e o meio ambiente.

Existe um conceito muito importante conhecido como resistência térmica e que pode ser associado ao nosso problema, pois o mesmo se trata de transferência de calor unidimensional sem geração interna de energia e com propriedades constantes (INCROPERA, *et al.*, 2008). Da mesma forma que uma resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada à condução de calor. Definindo resistência como razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência, pode-se dizer através da Eq. (3.25) que a resistência térmica para a condução em uma parede plana é:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{k.A} \quad (3.25)$$

Analogamente, para a condução elétrica no mesmo sistema, a lei de Ohm fornece uma resistência elétrica de acordo com a Eq. (3.26):

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma.A} \quad (3.26)$$

Existe uma analogia entre as Eqs. (3.25) e (3.26). Uma resistência térmica também pode ser associada à transferência de calor por convecção em uma superfície. A partir da Lei do Resfriamento de Newton da pela Eq. (3.27):

$$q = h.A(T_s - T_\infty) \quad (3.27)$$

A resistência térmica para a convecção é, então, pela Eq. (3.28):

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (3.28)$$

Representações na forma de circuitos fornecem uma ferramenta útil para a conceituação quanto para a quantificação de problemas de transferência de calor. O circuito térmico equivalente para a parede plana com condições de convecção nas duas superfícies pode ser resolvido pelo Método das Resistências Térmicas. Como as resistências condutiva e convectiva estão em série e podem ser somadas, tem-se que, pela Eq. (3.29):

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k_v} + \frac{1}{h_2} \quad (3.29)$$

Onde, h_1 é o coeficiente de convecção entre a água e a parede interna do duto ($h_1 = 4450,1 \text{ W/m}^2\text{K}$), L a espessura do duto ($L = 31,75 \text{ mm} = 1,25 \text{ in}$), k_v o coeficiente de condutividade do vaso de pressão, que para esse material ASTM A516 Grau 70, temos, $k_v = 39,67 \text{ W/mK}$; e h_2 o coeficiente de convecção entre a parede externa do duto e o ar;

No caso do h_2 , a convecção será natural, e de acordo com a Tab. (3.4), a convecção natural de um gás (ar) está entre 2 à 25 $\text{W/m}^2\text{K}$. Vamos selecionar portanto, um $h_2 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$, que está dentro da faixa permitida. Então, de acordo com esses valores, obtém-se:

$$R_{tot} = \frac{1}{4450,1} + \frac{0,03175}{39,67} + \frac{1}{20} \Rightarrow R_{tot} = 0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$$

E a partir da Eq. (3.30), e que $R_{tot} = R_{t,cond}$ podemos determinar a taxa de transferência de calor, sabendo que $T_{s,1}=177^{\circ}C$ (450K) e $T_{s,2}=20^{\circ}C$ (293K), temos:

$$q_x = \frac{T_{s,1}-T_{s,2}}{R_{t,cond}} \Rightarrow q_x = \frac{450-293}{0,05} \Rightarrow q_x = 3140W/m^2 \quad (3.30)$$

Como esse fluxo de calor constante, é possível calcular as temperaturas das paredes interna e externa do duto, através da Lei de Resfriamento de Newton pela Eq. (3.31), e a Lei de Fourier pela Eq. (3.32) respectivamente, da seguinte maneira:

$$q_x = h_1(T_{flu} - T_{int}) \Rightarrow T_{int} = T_{flu} - \left(\frac{q_x}{h_1}\right) \Rightarrow T_{int} = 450 - \left(\frac{3140}{4450,1}\right) \Rightarrow T_{int} = 449,29K = 176,29^{\circ}C \quad (3.31)$$

Em que T_{flu} é a temperatura do fluido, $T_{flu} = 450K$ e T_{int} é a temperatura da parede interna do vaso;

Analogamente, a temperatura externa do duto será:

$$q_x = \frac{k(T_{int}-T_{ext})}{L} \Rightarrow T_{ext} = T_{int} - \left(\frac{q_x \cdot L}{k_v}\right) \Rightarrow T_{ext} = 449,29 - \left(\frac{3140 \cdot 0,03175}{39,67}\right) \Rightarrow T_{ext} = 446,78K = 173,78^{\circ}C \quad (3.32)$$

Os resultados mostram que tanto a parede interna como a externa do vaso fica muito próxima da temperatura do fluido de trabalho, este é um motivo para o qual quando um vaso de pressão é construído, pode-se aproximar a temperatura de trabalho do vaso para a temperatura do fluido de trabalho.

3.9 - Considerações Finais

O ultrassom, devido aos vários tipos de transdutores, tem uma vasta gama de aplicação para obtenção de perda de espessura conforme visto neste capítulo. Porém, deve-se observar criteriosamente o material que vai ser inspecionado, sua geometria,

características, para assim analisar com base na faixa de medição, o ultrassom correto para a aplicação, e por fim, é imprescindível a calibração do equipamento.

Realizou-se uma abordagem sobre a API 579 detalhando a seção 4, que trata de corrosão geral uniforme, após isso, verificou-se a integridade estrutural através dos dados do vaso de pressão proposto para análise e nenhum dos dois níveis foram aprovados, necessitando-se da avaliação nível 3 descrita no próximo capítulo.

Por último mostrou a análise analítica térmica para a determinação da temperatura da parede externa e interna do vaso de pressão, com isso, pode-se fazer também análise numérica térmica e comparar com esses resultados obtidos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE NUMÉRICA ESTRUTURAL E TÉRMICA

4.1 - Introdução

A avaliação da integridade estrutural é de suma importância para garantir a segurança de equipamentos sujeitos a vários tipos de danos com o objetivo de prevenir equipamentos de operarem fora da faixa de segurança (faixa de segurança que pode ser, tensão admissível, temperatura admissível, limite de ruptura, limite de fluência, entre outros). Se o equipamento está trabalhando fora da faixa de segurança, é dito que este equipamento está em risco e pode sofrer danos irreversíveis (deformações plásticas ou trincas), que pode comprometer não apenas o equipamento em si, como também toda uma operação na qual ele está inserido.

Como visto anteriormente, a Norma API 579 é uma dentre as várias normas existentes (ASME, R6) que adéqua ao uso equipamentos para operar com segurança. A partir desta Norma, o objetivo deste capítulo será analisar numericamente o vaso de pressão proposto, operando inicialmente nas condições de trabalho e que com o tempo sofreu corrosão. Será feita a análise pelo nível 3 da API 579, e por último, a análise numérica térmica foi desenvolvida para mostrar os pontos de máxima e mínima temperatura e comparar com os resultados obtidos no capítulo anterior.

4.2 – Procedimentos para Modelagem do Vaso de Pressão

Neste item propõe-se um procedimento para modelagem de regiões danificadas por corrosão generalizada em vasos de pressão. O objetivo é facilitar a construção do modelo para análise numérica a partir dos dados da perda de espessura obtidos na inspeção por ensaio ultrassônico. Têm-se as seguintes etapas:

1. A partir da origem do sistema de coordenadas cartesianas, faz-se o desenho do retângulo, (escolheu-se por opção as coordenadas (x,y)), marca-se o ponto inicial, que a partir da origem do eixo, distancia de 1,02 m (40 in), essa medida é o raio interno do vaso de pressão. Através desse ponto, modela-se o perfil retangular inicial do duto. O perfil retangular tem altura correspondente ao valor da espessura nominal do vaso de pressão de 31,75 mm(1,25 in) e a base corresponde à largura do vaso a ser modelada. A largura deve ser maior que a soma dos passos longitudinais dos pontos de inspeção de 355,60 mm (14 in) dados pela Tab. (3.2). A Figura (4.1) mostra o resultado do perfil retangular onde a base considerada foi de 762 mm (30 in).

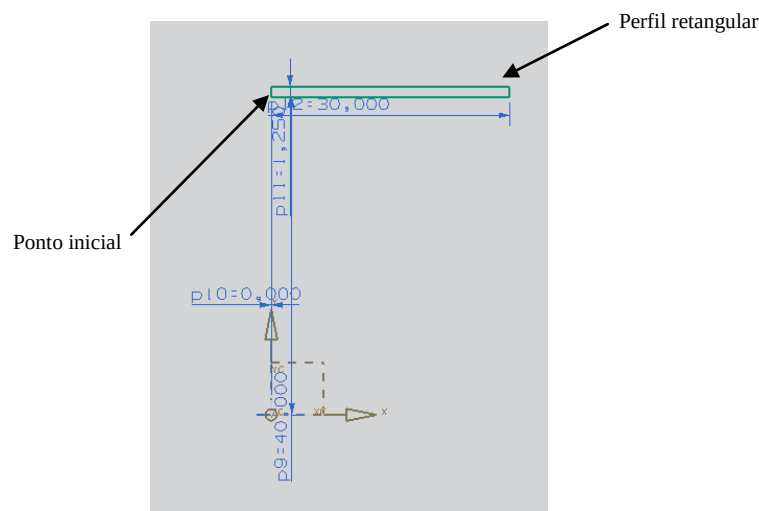


Figura 4.1 – Perfil retangular.

2. Para geração do vaso, utiliza-se o perfil retangular para iniciar uma superfície gerada em passos de arcos em torno do seu eixo central. O ângulo para cada arco é definido através da Eq. (4.1).

$$\alpha = \frac{L}{r} \quad (4.1)$$

Onde α é o ângulo em radianos do arco, L é o passo de cada inspeção e r é o raio interno nominal do vaso de pressão. A Figura (4.2) mostra a relação para o cálculo do ângulo de cada arco em radianos.

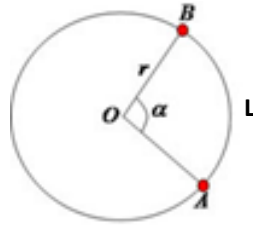
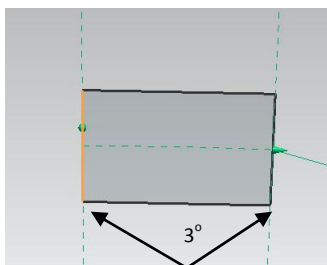


Figura 4.2 - Relação trigonométrica para o ângulo central.

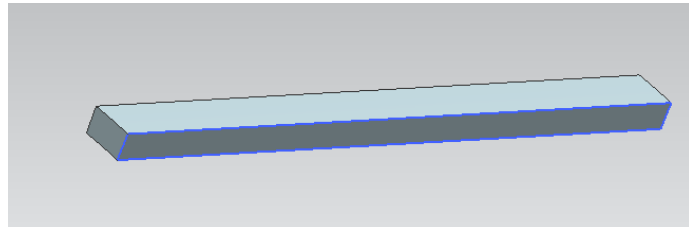
Para este caso tem-se o raio interno nominal de 1,02 m (40 in) e o passo entre os pontos coletados L de 50,8 mm (2 in), assim:

$$\alpha = \frac{L}{r} = \frac{0,0508 \text{ m}}{1,02 \text{ m}} = 0,0492 \text{ rad} = 2,82^\circ \cong 3^\circ$$

Com o ângulo do arco calculado realiza-se a formação do volume a partir do perfil retangular que corresponde a uma região não afetada pelo dano, como mostra a Fig. (4.3).



(a)



(b)

Figura 4.3 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) primeiro volume criado.

Veja que o ângulo é de 3° , como foi calculado, é importante ressaltar também que cada largura do volume gerado corresponde a 50,8 mm (2 in) que vale exatamente a distância entre cada ponto de inspeção.

3. Após o modelo do primeiro volume, o próximo passo é gerar a primeira superfície danosa do vaso de pressão, dada pela linha M1 da Tab. (3.2). Para essa primeira superfície, inicia-se a modelagem da primeira superfície com o dano a partir da criada anteriormente. Note na Figura (4.4) que a região superior perdeu uma pequena quantidade de material em relação ao volume inicial criado anteriormente.

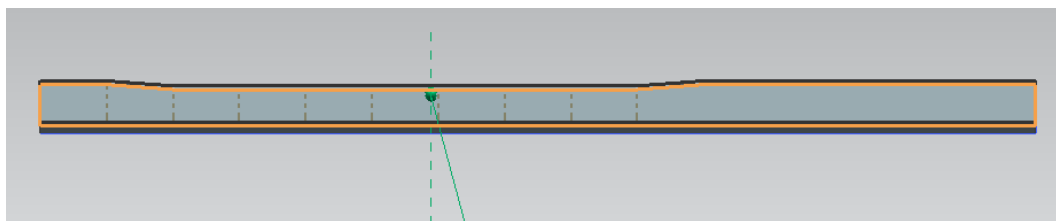
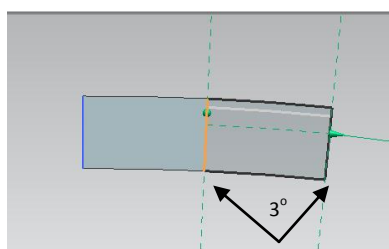
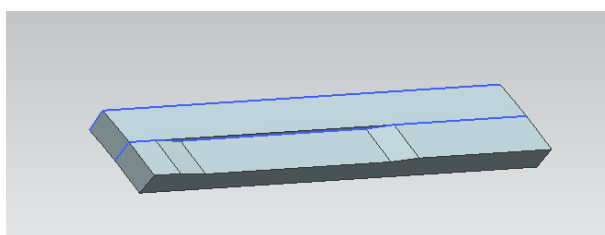


Figura 4.4 - Primeiro perfil da zona corroída.

Após modelada a superfície, modela-se o volume do mesmo com o mesmo passo de arco calculado. A Fig. (4.5) mostra a primeira superfície danosa.



(a)



(b)

Figura 4.5 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) volume da primeira zona corroída.

4. Para a obtenção da segunda superfície, que é mostrada através do plano M2 da Tab. (3.2), a modelagem tem a forma apresentada na Fig. (4.6), novamente a parte superior da parede do duto tem uma perda de espessura.

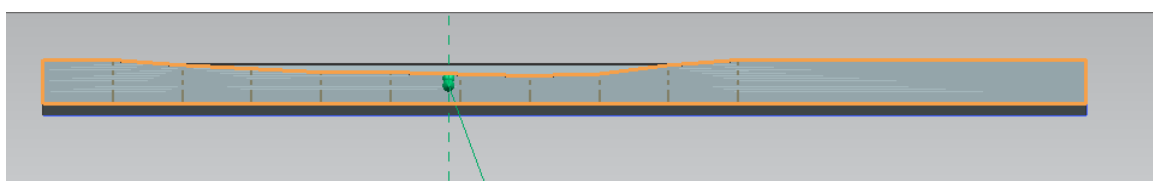
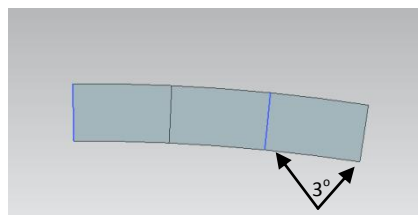
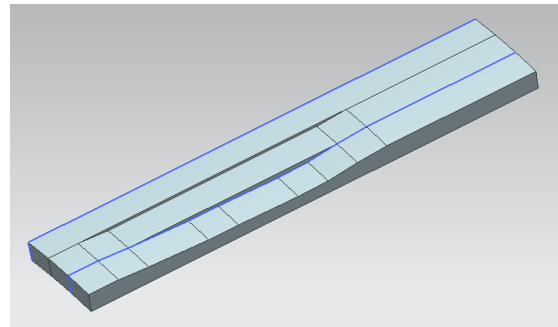


Figura 4.6 - Segundo perfil da zona corroída.

Analogamente, cria-se o segundo volume a partir da segunda superfície com corrosão, com o mesmo passo de arco. A Figura (4.7) mostra o resultado desse segundo perfil com perda de espessura.



(a)



(b)

Figura 4.7 - (a) vista lateral com o passo do arco e (b) volume da segunda zona corroída.

5. Seguindo a construção de todos os perfis de acordo com a Tab. (3.2), pode-se modelar toda a área da região corroída através dos passos explicados anteriormente. Após as modelagens das espessuras, uma visão completa do dano pode ser vista na Fig. (4.8):

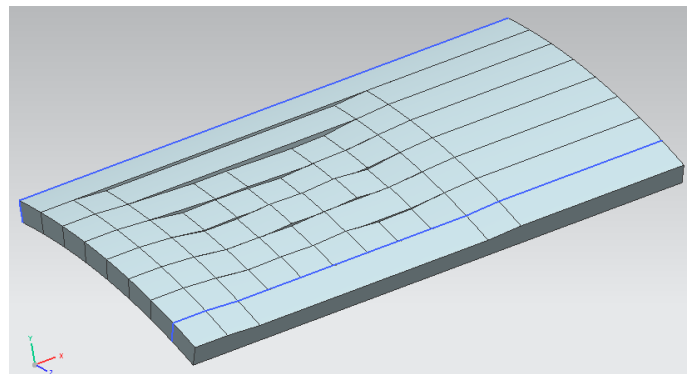


Figura 4.8 - Modelagem dos perfis da zona com perda de espessura.

6. Por fim, é preciso terminar o contorno do vaso de pressão, para isto, observa quantos arcos foram feitos e calcula-se o ângulo total. Como foram criados oito arcos, e para cada um, um passo de arco de 3° , calcula-se que o arco total foi de 24° . Logo, para a modelagem do contorno do vaso, o passo de arco necessário será $360^\circ - 24^\circ = 336^\circ$. A Figura (4.9) mostra o duto completamente modelado.

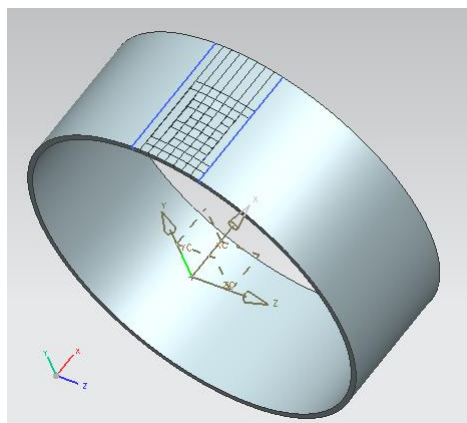
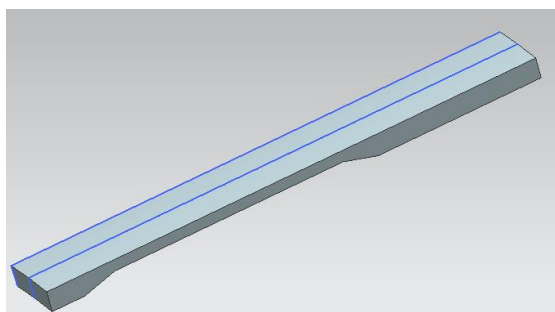


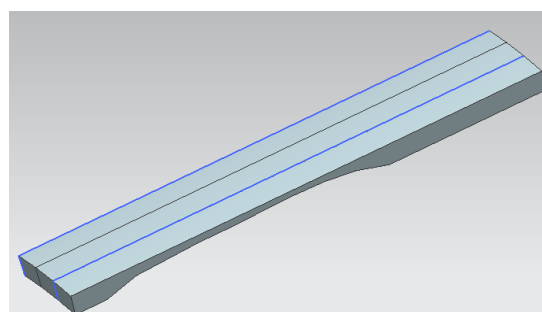
Figura 4.9 - Vaso de pressão modelado com a corrosão externa.

Com a modelagem do duto completa, pode-se fazer a análise do nível 3 da integridade estrutural do vaso de pressão, que será mostrado adiante.

7. Veja que para o dano interno, o procedimento é o mesmo, o ângulo para o Revolve é idêntico, porém a inspeção para este caso é feita internamente e portanto sua modelagem é feita de dentro para fora do duto. A Fig. (4.10) mostra as duas primeiras regiões de perda de espessura para o dano interno, dada pelas linhas M1 e M2 da Tab. (3.2)



(a)



(b)

Figura 4.10 - Modelagem do dano interno para (a) primeira região de inspeção e (b) segunda região de inspeção.

Por fim, o desenho final do duto com do dano interno é mostrado na Fig. (4.11):

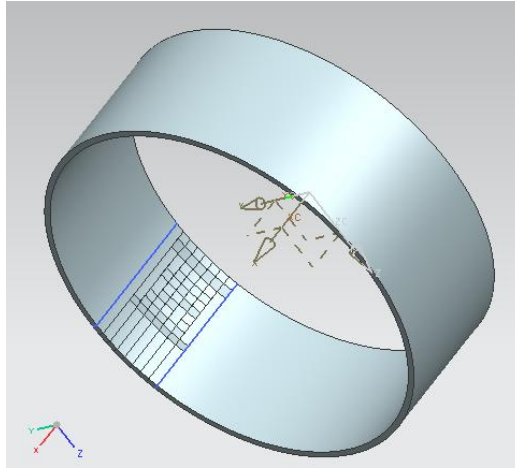


Figura 4.11 - Modelagem do perfil de espessura do duto com o dano interno.

Com as modelagens para os danos externos e internos, pode-se fazer as simulações das *MAWPs* encontradas, além disso, percebeu-se pelos desenhos que as espessuras entre cada inspeção foram aproximadas por retas, isto se deve ao fato de que a Norma API 579 recomenda a prática desse uso, já que a corrosão é uniforme.

4.3 - Validação do Software

Nesta seção começarão a serem feitas as análises numéricas (nível 3 da Norma API 579), porém antes de começar a realizar essas avaliações com o duto corroído, uma solução numérica do software foi proposta com o objetivo inicial de validar o software NX.

Essa solução foi feita da seguinte maneira, primeiramente considera-se o vaso de pressão sem corrosão e com a pressão de trabalho original de 2,76 MPa (400 psi). Com isso, faz-se a análise da tensão na parede do vaso de acordo com as Eqs. (4.9) e (4.10):

$$\sigma_{circ} = \frac{p.r}{t} \quad (4.9)$$

$$\sigma_{long} = \frac{p.r}{2.t} \quad (4.10)$$

Essas são as tensões circunferencial e longitudinal, respectivamente, substituindo os valores, obtêm:

$$\sigma_{circ} = \frac{p \cdot r}{t} = \frac{400.40}{1.25} = 12,8kpsi = 88,25MPa$$

$$\sigma_{long} = \frac{p \cdot r}{2 \cdot t} = \frac{400.40}{2.1,25} = 6,4kpsi = 44,13MPa$$

O próximo passo é calcular as tensões principais, respectivamente dadas por σ_1 e σ_2 , dada pela Eq. (4.11).

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{circ} + \sigma_{long}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{circ} - \sigma_{long}}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (4.11)$$

A tensão de cisalhamento é dada por:

$$\tau = \sigma_{long} = 6,4kpsi = 44,13MPa$$

Logo, as tensões principais são:

$$\sigma_{1,2} = \frac{12,8 + 6,4}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{12,8 - 6,4}{2}\right)^2 + 6,4^2}$$

E assim, obtendo:

$$\sigma_1 = 16,755kpsi = 115,52MPa$$

$$\sigma_2 = 2,445kpsi = 16,93MPa$$

Finalmente, calculando a Tensão de Von Misses pela Eq. (4.12)

$$\sigma_{VonMisses} = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (4.12)$$

Substituindo os valores:

$$\sigma_{VonMises} = (16,76^2 - 16,76 \cdot 2,44 + 2,44^2)^{1/2} = 15,68 \text{ kpsi} = 108,08 \text{ MPa}$$

Com base nesse resultado, o próximo passo foi desenvolver a solução numérica e avaliar as tensões. A Figura (4.12) mostra a tensão máxima que ocorre no vaso, para este caso, como dito anteriormente, o vaso está sem perda de espessura e foi colocada a pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi). Encontra-se que a tensão máxima encontrada foi de 110,32 MPa (16 kpsi). (ALMEIDA, *et al.*, 2012).

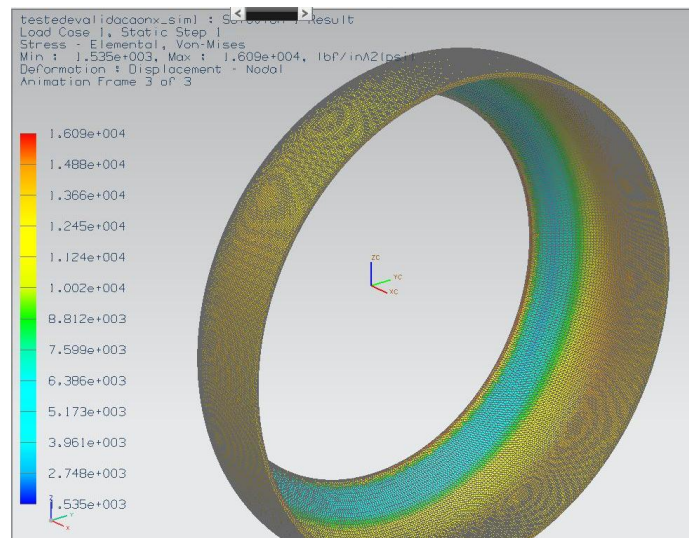


Figura 4.12 - Análise da tensão para o duto sem corrosão.

Portanto, o resultado numérico foi próximo de 110,32 MPa, e o resultado analítico foi de 108,08 MPa, isso equivale a um erro equivalente de 2%, um erro pequeno, e que mostra que o software NX NASTRAN está de acordo com as equações existentes.

4.4 - Análise do Vaso de Pressão com Corrosão Externa pelo Nível 3 da API 579

Após a análise dos níveis 1 e 2 da API 579 feito anteriormente, os próximos passos são:

- Analisar o vaso de pressão corroído com as pressões encontradas de nível 1 e 2 da API 579 e verificar as tensões na parede do vaso;

- Encontrar uma PMTA de modo que a tensão no vaso fique próxima a tensão que foi encontrada quando foi feita a simulação com o vaso não danificado, esta tensão foi de 110,32 MPa (16 kpsi).

No primeiro caso, de posse com o desenho do vaso de pressão com a região da perda de espessura, aplicada a pressão encontrada no nível 1 da API 579 de 2,18 MPa (316,97 psi), encontrou uma tensão máxima de 148,24 MPa (21,5 kpsi), que é superior a tensão admissível de 137,70 MPa (19,9 kpsi). A Figura (4.13) mostra o ponto de maior tensão, que acontece na região de menor espessura do duto.

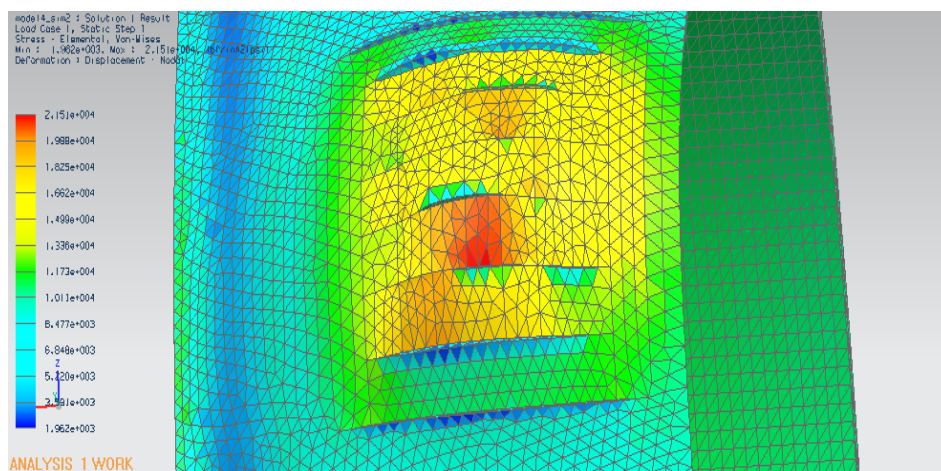


Figura 4.13 - Distribuição de tensão para a pressão de 2,18 MPa.

Analogamente, percebe-se que a pressão do nível 2 de 2,42 MPa (351,76 psi) era uma tensão também maior que a tensão admissível do material, como pode ser visto na Fig. (4.14).

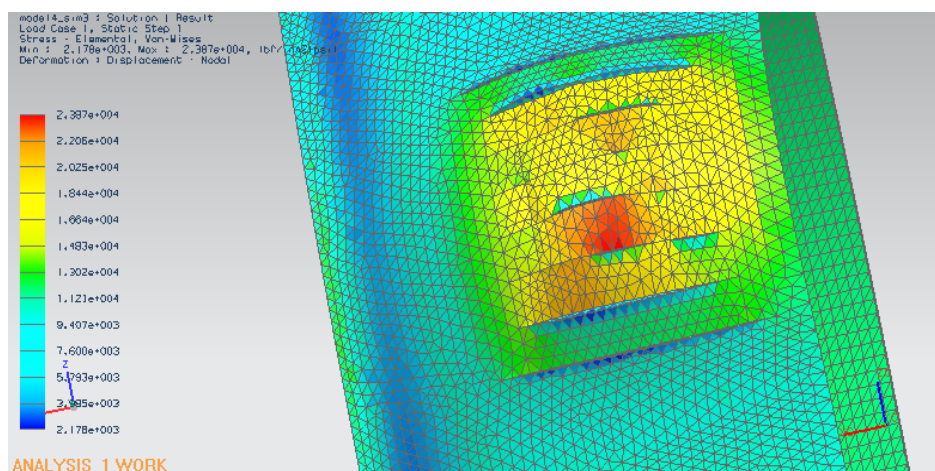


Figura 4.14 - Distribuição de tensão para a pressão de 2,42 MPa.

A Figura (4.14) mostra a região de máxima tensão, que também ocorreu na região de menor espessura, nesse ponto, a pressão foi de 165,27 MPa (23,97 kpsi), também menor do que a tensão admissível do material.

Logo, os níveis 1 e 2 propostos pela API 579 para redução da *MAWP* não colocam o vaso em segurança, pois as análises mostraram que para as pressões dos respectivos níveis, a tensão ultrapassa a tensão admissível do material.

O seguinte passo é encontrar a pressão que de fato o vaso possa operar com segurança. Para isso, toma-se como base a tensão encontrada para o duto sem corrosão de 110,32 MPa (16 kpsi).

Após várias soluções numéricas, nas quais nessas análises foram analisadas várias pressões até obter uma pressão de 1,64 MPa (236 psi), que corresponde a uma tensão de 110,32 MPa (16 kpsi), como pode ser visto na Fig. (4.15), isso mostra que com a corrosão externa, esta é a pressão que se aproxima da condições do duto operando sem corrosão e com a pressão de 2,76 MPa (400 psi) (ALMEIDA, et al., 2012).

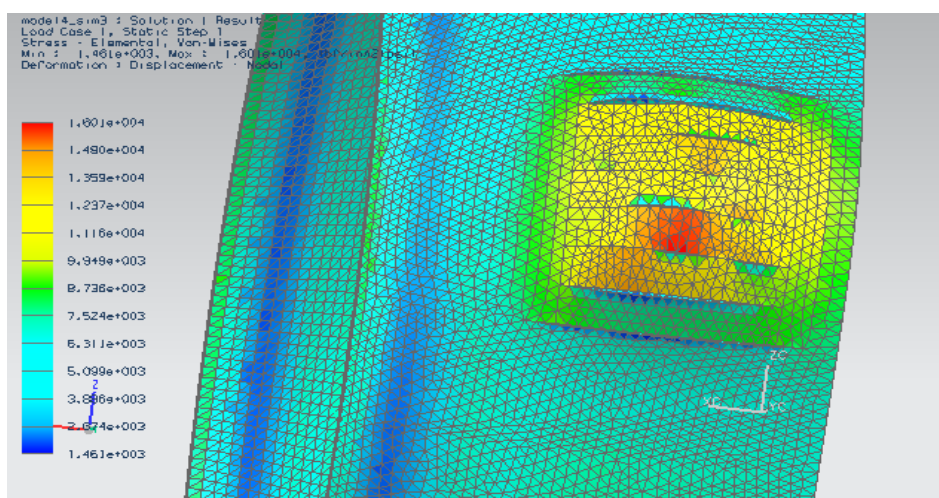


Figura 4.15 - Distribuição de tensão para a pressão de 1,64 MPa.

4.5 - Análise do Vaso de Pressão com Corrosão Interna pelo Nível 3 da API 579

Analogamente ao que foi realizado para a corrosão externa, efetua-se as análises numéricas com as pressões encontradas pelos níveis 1 e 2 da API 579 de acordo com os mesmos dados de espessuras encontrados.

Verifica-se pela Fig. (4.16), que para a pressão de 0,84 MPa (128,74 psi), a maior tensão foi de 114,94 MPa (16,67 kpsi) Logo, como a tensão de admissível é de 137,70 MPa 19,9 kpsi (19,9 kpsi), o nível 1 está de acordo e o vaso pode operar nessa pressão.

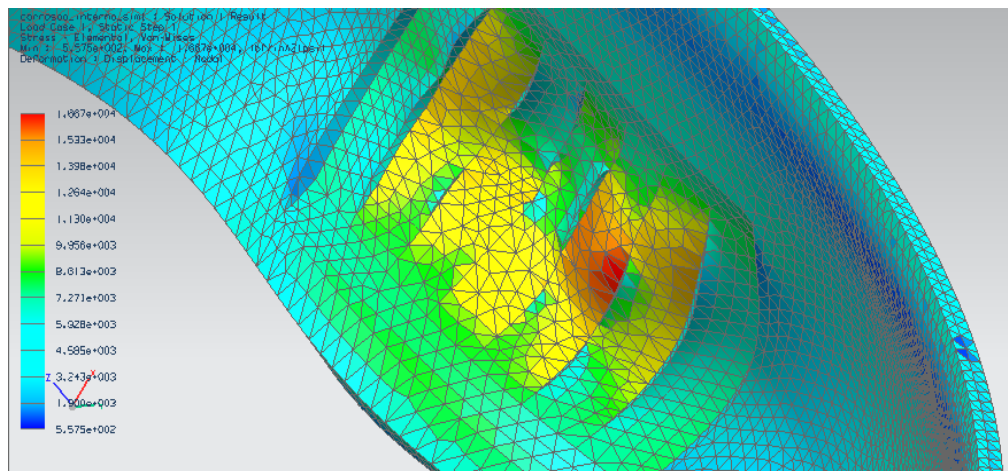


Figura 4.16 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,84 MPa.

Pela pressão encontrada no nível 2 de 0,98 MPa (142,78 psi), a tensão encontrada foi de 127,48 MPa (18,49 kpsi), como pode-se observar pela Fig. (4.17). Assim, o nível 2 também permite com que o vaso opere com segurança. É importante observar que o ponto de tensão máxima sempre ocorre na área de menor espessura, assim como na corrosão externa.

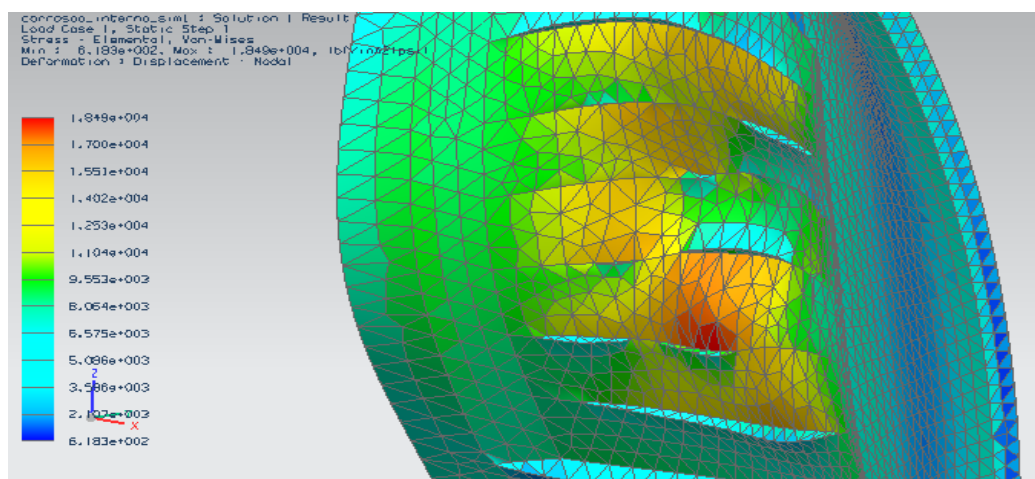


Figura 4.17 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,98 MPa.

Por fim, novamente após sucessivas análises numéricas é encontrado o valor de 0,86 MPa (125 psi) em que a tensão fica próxima a tensão encontrada nas condições iniciais de 110,32 MPa (16 kpsi), como mostrado na Fig. (4.18).

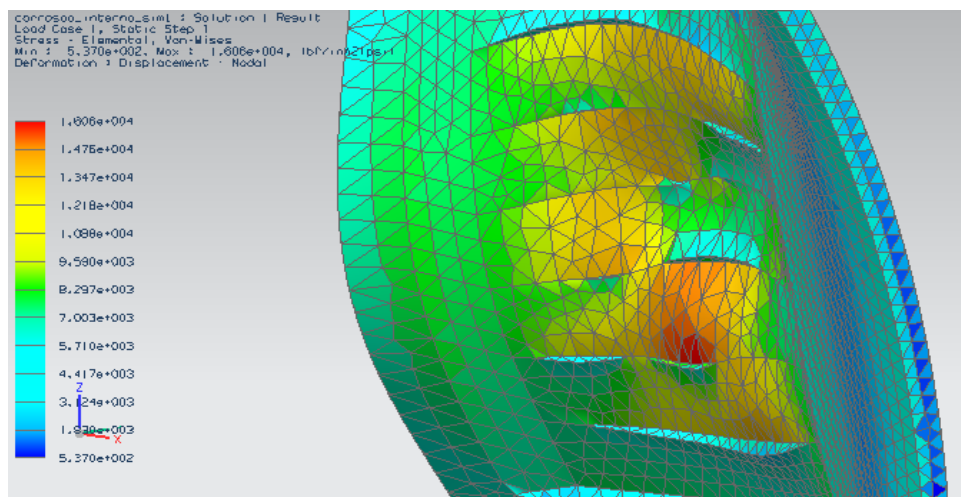


Figura 4.18 - Distribuição de tensão para a pressão de 0,86 MPa.

Como pode ser observado, essa tensão serve de referência para o cálculo da pressão de trabalho pelo nível 3 porque esta tensão foi encontrada para o vaso de pressão em ótimas condições (sem a presença da corrosão) de uso e com a pressão de trabalho inicial de 2,76 MPa (400 psi) (ALMEIDA, et al., 2012).

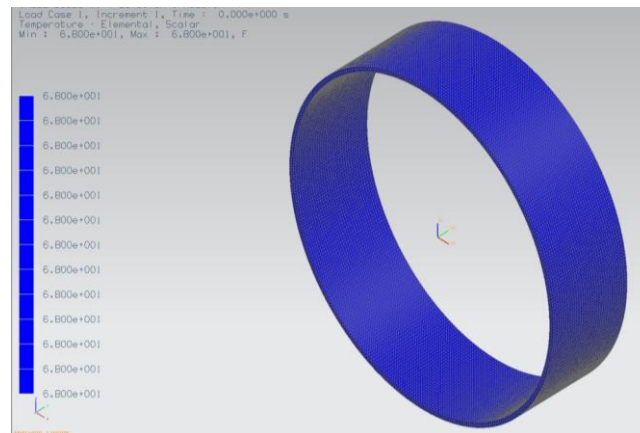
4.6 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão sem Corrosão

Com a modelagem do vaso de pressão com corrosão, o intuito agora é fazer a análise numérica para determinar as temperaturas para o regime estacionário das paredes do duto, para isso, foi feito uma análise térmica transiente no NX THERMAL, essa análise consistiu das seguintes características:

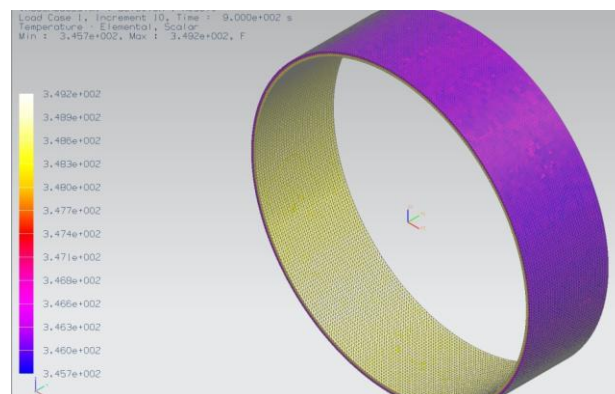
- A temperatura imposta foi a temperatura do fluido de trabalho de 177°C (350°F);
- A análise transiente foi realizada até um tempo de 900s, tempo esse que espera-se que o sistema entre no estado estacionário.

Após a escolha desses atributos descritos acima, é preciso definir para quais tempos o software mostre os resultados, e então ficou decidido que a análise será feita a cada 100s, incluindo o tempo 0s, portanto obtém-se 10 resultados.

A análise transiente foi feita de 0 a 900 segundos, tempo no qual se pressupõe que o sistema entre no estado estacionário. Inicialmente o vaso está a 68°F (20°C) e o fluido de trabalho a 177°C (350°F), com o fim das simulações, foi encontrada a temperatura da parede externa de 174,28°C (345,7°F), e por sua vez, a da parede interna de 176,22°C (349,2°F), como pode-se observar pela Fig. (4.19):



(a)



(b)

Figura 1.19 - Distribuição de temperatura para o vaso sem corrosão (a) instante inicial e (b) estado estacionário.

A Figura (4.20) mostra a distribuição da temperatura máxima e mínima de acordo com o intervalo de tempo estudado.

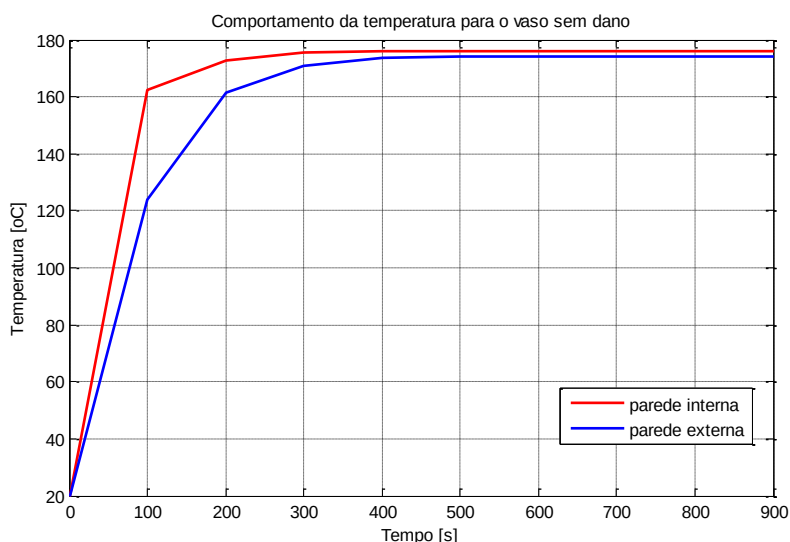


Figura 4.20 - Temperaturas da parede externa e interna para os tempos analisados.

Percebe-se que a temperatura da parede externa se estabiliza próximo do instante de tempo de 300s para a parede interna, enquanto que para região externa do vaso, a temperatura apenas se estabiliza próximo dos 400s. Portanto, o sistema entra no regime estacionário a partir do momento em que toda a parede do vaso não varia de temperatura, que fica próximo dos 400s. A Tabela (4.1) mostra o erro encontrado entre as temperaturas máxima e mínima obtidos nas análises analítica e numérica.

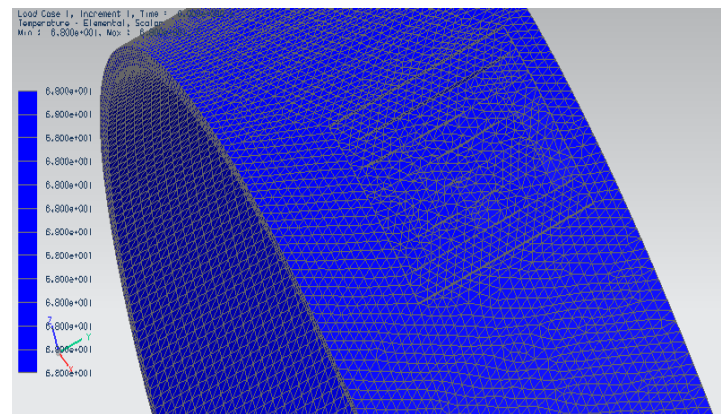
Tabela 4.1 - Comparação das temperaturas máxima e mínimas em relação ao tipo de análise.

Tipo de análise	Temperatura da parede interna [°C]	Temperatura da parede externa [°C]
Analítica	176,29	173,78
Numérica	176,22	174,28
Erro absoluto (%)	0,040	0,288

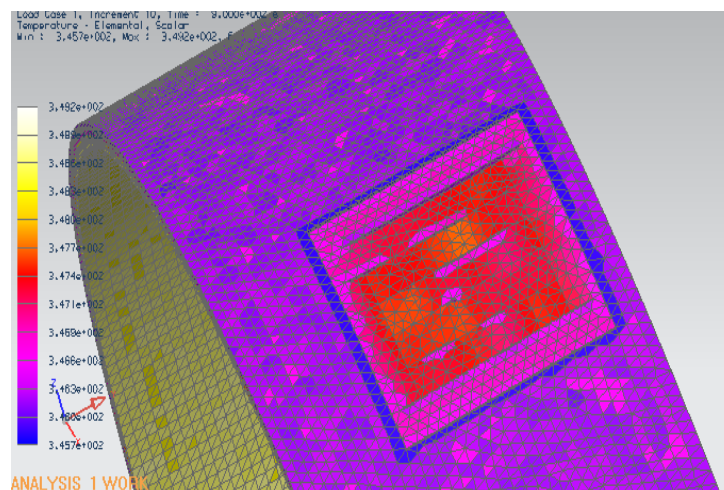
Portanto, de uma maneira bastante satisfatória, ocorreu à validação do software em uso NX THERMAL, pois ao chegar no regime estacionário, as temperaturas encontradas por soluções numéricas foram bem próximas dos resultados analíticas.

4.7 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão com Corrosão Externa

Observa-se que para o tempo inicial, o duto ainda não sofre nenhuma transferência de calor, o duto está na temperatura ambiente de 20°C (68°F), já no ultimo instante, para 900s, as temperaturas se estabilizaram, conforme pode ser visto na Fig. (4.21), com um valor da temperatura para a parede externa de 174,28°C (345,7°F) e da parede interna de 176,11°C (349,2°F).



(a)



(b)

Figura 2.21 - Distribuição de temperatura para o vaso com corrosão externa (a) instante inicial e (b) estado estacionário.

A Figura (4.22) mostra as temperaturas encontradas para cada instante de tempo analisado.

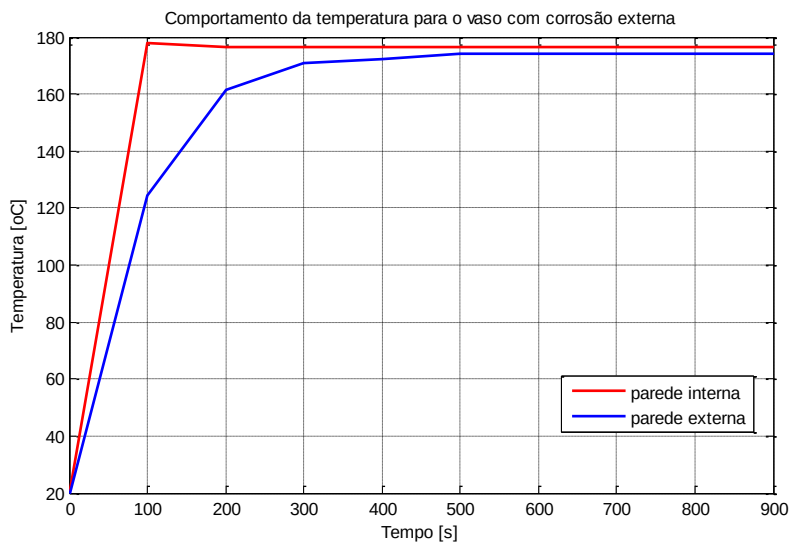


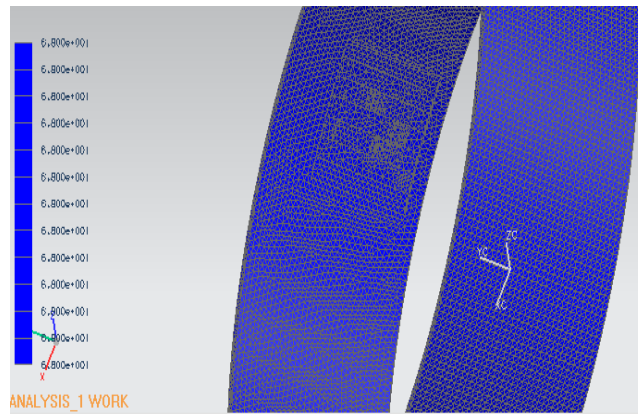
Figura 4.22 - Temperaturas da parede externa e interna para a corrosão externa.

Percebe-se que o perfil é praticamente o mesmo considerando o duto sem dano, porém um pequeno pico de temperatura se observa no instante de tempo de 100s, este pico origina o *hot spot*, além disso, as temperaturas para o estado estacionário ficam bem próximas, algo em torno de 174°C e 176°C.

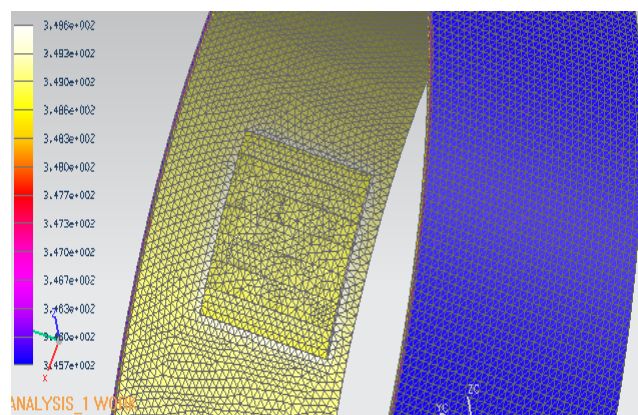
A temperatura máxima (parede interna) não varia a partir dos instantes de tempo de 200s e 300s, enquanto que a temperatura mínima (parede externa), entre os instantes de tempo de 500s e 600s.

4.8 - Análise Transiente Numérica do Vaso de Pressão com Corrosão Interna

Agora a mesma análise será feita considerando corrosão interna, para o instante inicial, a mesma situação ocorre em relação à corrosão externa, no estado estacionário a temperatura da parede externa estaciona em 174,28°C (345,7°F), e a temperatura da parede interna em 176,44°C (349,6°F), como pode ser visto na Fig. (4.23).



(a)



(b)

Figura 3.23 - Distribuição de temperatura para o vaso com corrosão interna (a) instante inicial e (b) estado estacionário.

A Figura (4.24) mostra o gráfico das temperaturas máximas e mínima em relação ao tempo.

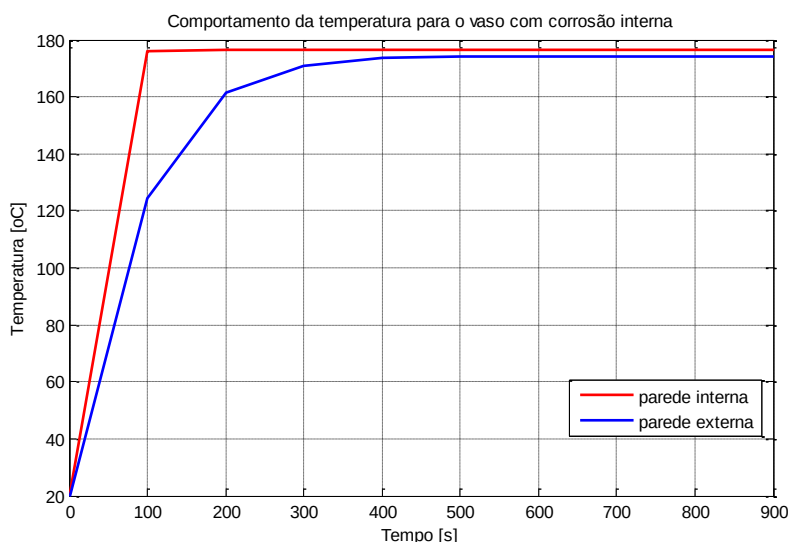


Figura 4.24 - Temperaturas da parede externa e interna para a corrosão interna.

De uma maneira análoga, a distribuição das temperaturas seguem o mesmo perfil para os casos sem dano e com corrosão externa, como também o tempo para chegar ao regime estacionário está no intervalo de 600s e 700s, como encontrado anteriormente para os casos anteriores.

Portanto, de uma maneira bastante satisfatória, ocorreu a validação do software em uso NX THERMAL, pois ao chegar no regime estacionário, as temperaturas encontradas por soluções numéricas foram bem próximas com as encontradas através da seção 4.6.

Para finalizar, as análises térmicas levaram em consideração a corrosão externa e interna, mas se pôde verificar que para a análise térmica se utiliza apenas as espessuras, não importando o formato final do vaso, por isso os valores encontrados tanto para a corrosão externa como para a interna foram bem próximos.

4.9 - Considerações Finais

Neste capítulo validou-se as análises numéricas estruturais e térmicas dos software em uso, com isso, se desenvolveu as análises para os três níveis da API 579 para as duas formas de corrosão.

Pela análise estrutural, observou que para a corrosão externa, as análises numéricas em relação ao nível 1 e 2 da API 579 não satisfaziam, isto é, as tensões

ultrapassavam a tensão admissível do material para as pressões encontradas nos níveis 1 e 2. Com isso, buscou-se uma *MAWP* e tomou-se como base a tensão encontrada ao realizar a análise para o duto nas condições originais e sem corrosão, com essa tensão encontrada de 110,32 MPa (16 kpsi), encontrou-se a pressão de 1,64 MPa (236 psi). De maneira análoga, o mesmo foi feito com a corrosão interna, e a priori foi visto que a corrosão interna é mais perigosa que a externa, pois as PMTAs de nível 1 e 2 da API 579 foram bem inferiores para aquelas encontradas em relação à corrosão externa, além disso, as simulações numéricas satisfizes apenas pressões de nível 2, o que não ocorreu com a corrosão externa.

As análises numéricas térmicas também ficaram de acordo com as encontradas analiticamente, com base nas temperaturas encontradas em cada caso, além disso, encontrou-se um intervalo de tempo que o sistema leva para chegar ao regime estacionário, que ficou entre 700s e 800s, tempo este que levou para as temperaturas nas paredes do vaso ficarem constantes.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Introdução

Esse capítulo destina-se a apresentar os resultados da distribuição de tensão no vaso de pressão considerando as áreas de corrosão nas paredes interna e externa. Os picos de tensão ocorreram na região de maior perda de espessura (zona crítica da corrosão), e com isso, analisa-se o comportamento da tensão nessa região, tanto com a corrosão externa quanto interna, para analisar as tensões no vaso de pressão a medida que o sistema entra no regime estacionário. Além disso, propõe-se um estudo sobre o estado do fluido de trabalho, pois como nas condições de projeto inicial de 2,76 MPa (400 psi) e 177°C (350°F) a água é líquida comprimida, e por isso, pelas condições de trabalho, a água não pode mudar seu estado. Portanto, os parâmetros selecionados para o vaso de pressão operar com segurança foram: tensão máxima menor que a tensão admissível e o fluido de trabalho no estado de líquido comprimido.

Realiza-se os cálculos para encontrar os valores da RSF do vaso de pressão para cada tipo de dano e uma análise da temperatura na parede do vaso é realizada para detectar possíveis *hot spots* (lugares quentes).

Por último, também o vaso de pressão para as seguintes temperaturas: 126,85°C (260,33°F), 66,85°C (152,33°F), 20°C (68°F), 204,44°C (400°F) e 229,03°C (444,32°F). As reduções de temperaturas propostas tem as suas propriedades tabeladas (INCROPERA, *et al.*, 2008) e a temperatura de 229,03°C coloca o fluido de trabalho a operar no estado de vapor saturado.

5.2 - Comportamento da Tensão na Região Crítica para Corrosão Externa

A finalidade é observar o comportamento da tensão na região crítica, essa região é exatamente a porção em vermelho quando foi feita as análises estruturais no capítulo anterior, essa análise será feita para as pressões encontradas nos três níveis da API 579

Para realizar isso, é feita a análise térmica com a estrutural, isto é, a partir dos resultados encontrados pelo software NX THERMAL, faz-se um mapeamento, no qual estabelece os tempos em que se deseja analisar as tensões nos vasos.

Como se dividiu o tempo de 100 em 100s, com um tempo total de 900s, as análises estruturais transientes também obedecem esse intervalo de tempo, portanto, o mapeamento foi feito de 0 a 900s, e no caso foi dado os resultados de tensões a cada 100s, assim como feito para análise térmica anteriormente.

Após feito as análises numéricas, tem-se os resultados das tensões desde o tempo 0 até 900s, a cada 100s. A seguir na Fig. (5.1) mostra-se o comportamento da tensão em relação ao tempo com o vaso de pressão sem corrosão para verificar a distribuição de tensão e com a pressão de trabalho original de 2,76 MPa (400 psi).

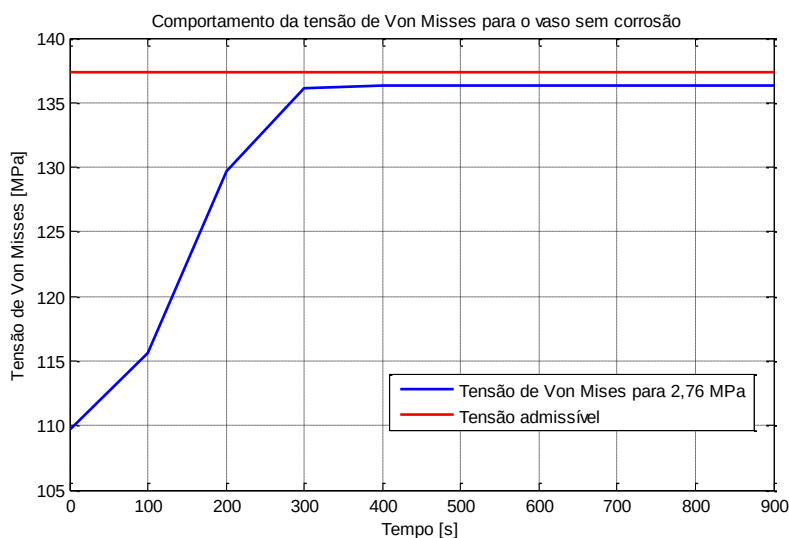


Figura 5.1 - Distribuição de tensão para 2,76 MPa para o vaso sem dano.

A tensão encontrada foi de 136,28 MPa (19,75 kpsi), menor que a tensão admissível, essa é a tensão suportada pelo equipamento em condições normais de uso (sem dano). A seguir mostra-se as análises numéricas com as *MAWPs* encontradas nos níveis da API 579.

5.2.1 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi)

Realizou-se uma análise da distribuição de tensão com o tempo para o vaso com dano externo se obter as tensões em relação ao tempo, a Fig. (5.2) mostra o comportamento da tensão em relação ao tempo.

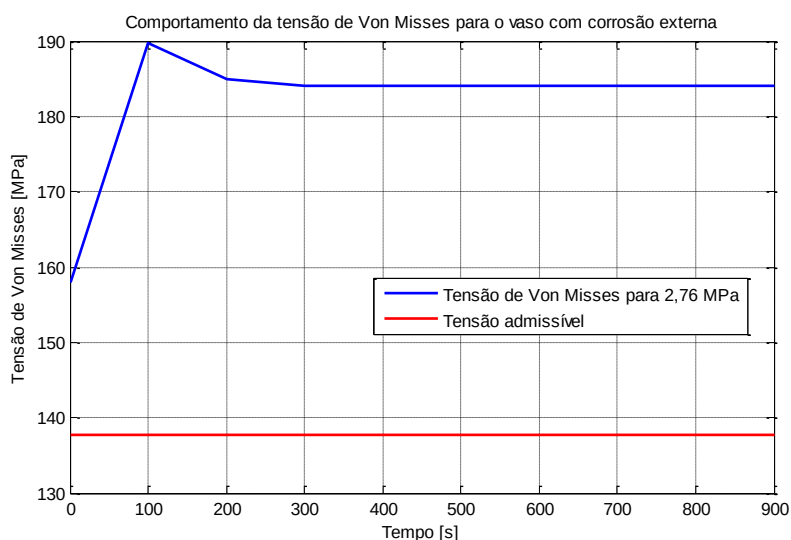


Figura 5.2 - Distribuição de tensão para 2,76 MPa para o dano externo.

Para as condições de trabalho, o vaso não pode operar com segurança, pois o valor da tensão em todo tempo foi maior que a tensão admissível e o seu valor de regime estacionário foi de 184,03 MPa (26,61 kpsi), e a tensão ultrapassou a tensão admissível do material, além disso, para esse tipo de corrosão, houve um pico de tensão em 100s, esse valor foi de 190,09 MPa (27,57 kpsi).

5.2.2 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 1 da API 579

A Figura (5.3) mostra a tensão máxima para o instante inicial que ocorre nos pontos destacados em vermelho para a MAWP de 2,18 MPa (316,97 psi), local onde existe a menor espessura da corrosão.

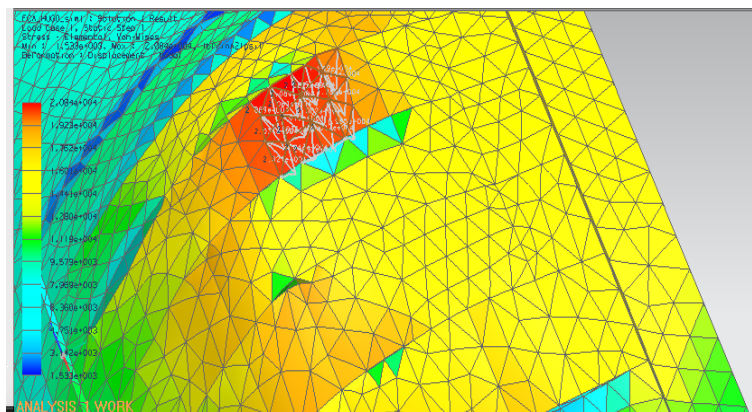


Figura 5.3 - Tensão máxima para a MAWP do nível 1 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.

Verifica-se que a maior tensão nessa região é dada por 171,33 MPa (24,85 kpsi), enquanto que a tensão de regime estacionário foi de 168,71 MPa (24,47 kpsi). De fato, logo no tempo inicial, a tensão já é maior que a admissível, portanto, a MAWP de nível 1 que a norma API 579 recomenda com corrosão externa não satisfaz a tensão admissível, levando o vaso de pressão a operar sem segurança nenhuma.

Como o nível 1 não satisfaz o primeiro parâmetro, não há a necessidade de analisar o estado da água.

5.2.3 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 2 da API 579

O próximo passo analisa a MAWP de nível 2 de 2,42 MPa (351,77 psi). Com essa pressão, a tensão no material também será maior que a tensão admissível, já que o do nível 1 é uma pressão menor e ultrapassou a tensão admissível. A Figura (5.4) mostra a região crítica do vaso de pressão.

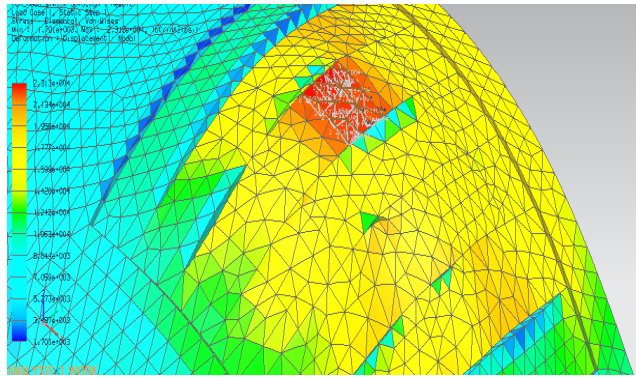


Figura 5.4 - Tensão máxima para a MAWP do nível 2 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.

A maior tensão é de 186,99 MPa (27,12 kpsi) e a de regime estacionário é de 184,43 MPa (26,75 kpsi). Como a *MAWP* de nível 2 é maior que a de nível 1, é de se esperar que as tensões ficassem maiores, consequentemente o vaso também não opera com segurança. Portanto as *MAWPs* que a norma API 579 recomendou para a situação de corrosão externa coloca o vaso de pressão a continuar operando em risco.

5.2.4 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão externa para a MAWP de nível 3 da API 579

A Figura (5.5) mostra a tensão para o instante inicial, para a pressão de 1,64 MPa (236 psi):

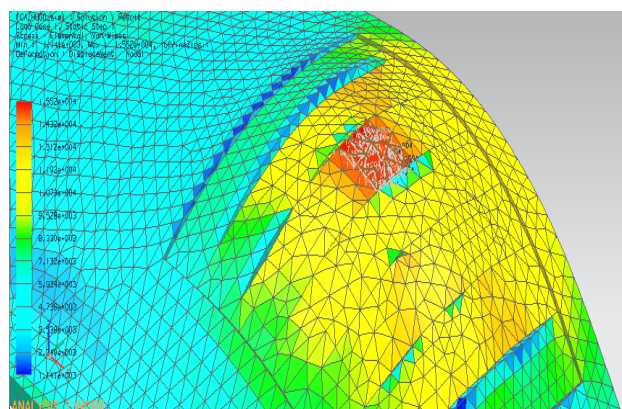


Figura 5.5 - Tensão máxima para o nível 3 na região de menor espessura com corrosão externa para o instante inicial.

A análise mostra que no instante inicial a tensão máxima é de 107 MPa (15,52 kpsi), tensão abaixo da tensão admissível do material de 137,70 MPa (19,9 kpsi). E a

tensão encontrada no regime permanente é de 132,18 MPa (19,17 kpsi). Logo, a tensão máxima que é encontrada ao chegar no regime estacionário foi menor que a tensão admissível que é de 137,70 MPa (19,9 kpsi).

Portanto, para a MAWP de nível 3, o primeiro parâmetro foi obedecido, agora analisa-se o estado da água através da Fig. (5.6).

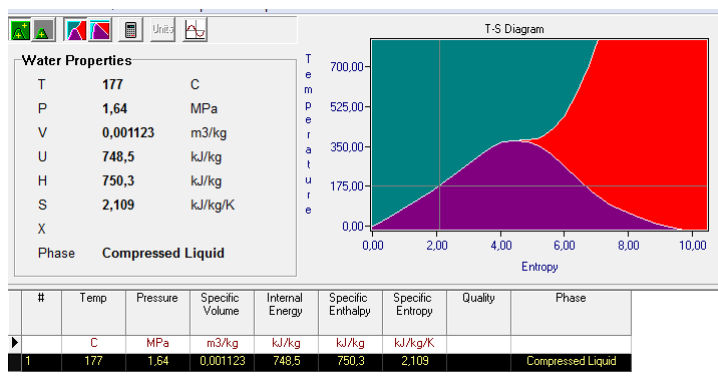


Figura 5.6 - Estado da água para MAWP de nível 3 com dano externo.

O fluido de trabalho permanece no seu estado de líquido comprimido, pois pela Fig. (5.6) nas condições de 1,64MPa (236 psi) e 177°C (350°F) a água não muda de estado. Portanto, para a situação de corrosão externa, apenas o nível 3 da API 579 satisfaz os parâmetros estabelecidos e o vaso de pressão pode operar com segurança.

Uma visão geral sobre a distribuição da tensões pelos três níveis da API 579 em relação ao tempo pode ser vista na Fig. (5.7):

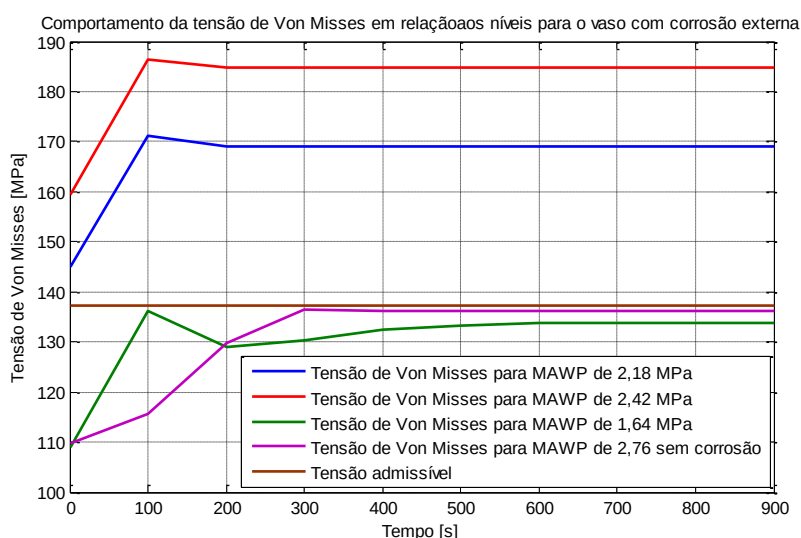


Figura 5.7 - Comportamento da tensão em relação ao tempo para os 3 níveis da API 579 com corrosão externa.

Portanto, a *MAWP* de nível 3 da API 579 é recomendável para o uso com segurança, pois além da tensão máxima ser menor que a admissível, não muda o estado da água que continua líquida comprimida.

5.3 - Comportamento da Tensão na Região Crítica para Corrosão Interna

Analogamente, procedimento semelhante aplica-se para a análise da tensão máxima que ocorre quando se considera a corrosão interna. Será avaliado os 3 níveis e a verificação do estado do fluido de trabalho com as reduções da PMTA.

5.3.1 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi)

Assim como foi feito para o dano externo, a Fig. (5.8) mostra o comportamento da tensão máxima em relação ao tempo.

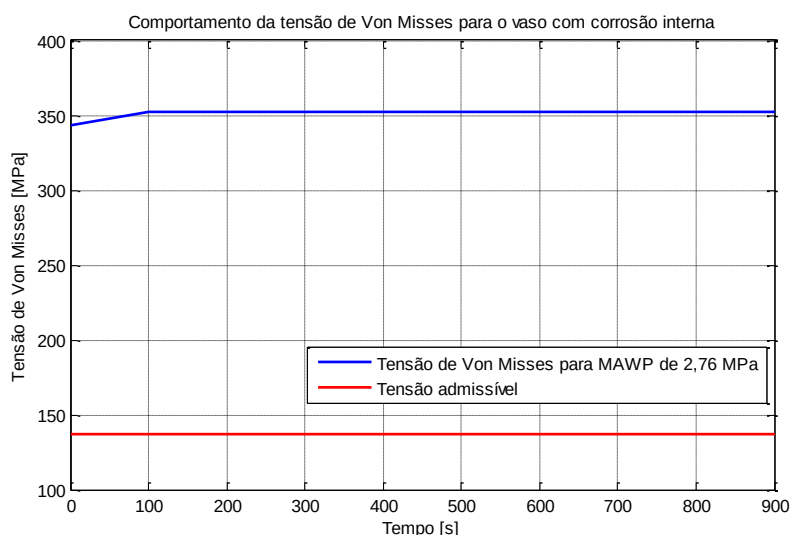


Figura 5.8 - Distribuição de tensão para 400 psi para o dano interno.

Além da tensão máxima ser maior que a tensão admissível, o dano interno é bem mais crítico que o externo, pois encontra-se uma tensão máxima de 351,08 MPa (50,92 kpsi), bem superior que a encontrada para o dano externo que foi de 206,22 MPa (29,91 kpsi).

5.3.2 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 1 da API 579

No nível 1, encontrou-se uma pressão de 0,89 MPa (128,73 psi), e a Fig. (5.9) mostra o local de maior tensão encontrada para o instante inicial.

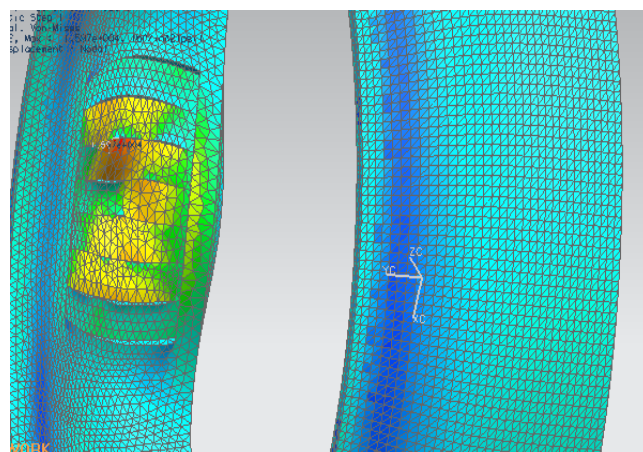


Figura 5.9 - Tensão máxima para o nível 1 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.

A tensão máxima encontrada de 124,80 MPa (18,10 kpsi) é menor que a tensão admissível, logo, pode-se concluir que de fato a MAWP recomendada pelo nível 1 traz segurança ao vaso de pressão. Para o estado da água, nas condições de 0,89 MPa (128,731 psi) e 177°C (350°F), a Fig. (5.10) mostra que a água se encontra em vapor superaquecido.

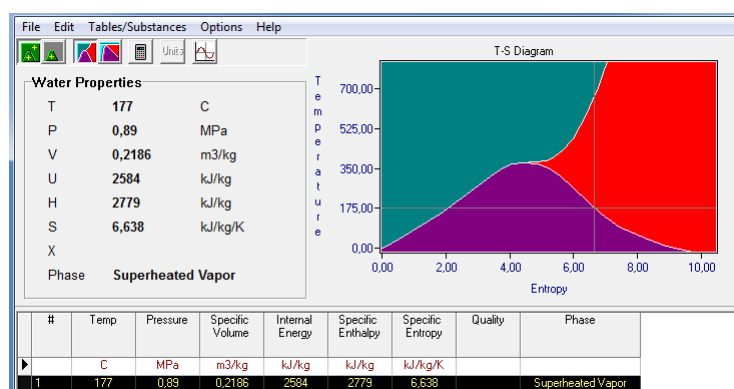


Figura 5.10 - Estado da água para a MAWP de nível 1 com dano interno.

O nível 1 da API 579 para o dano interno não satisfaz o segundo parâmetro estabelecido, portanto não traz segurança para o vaso de pressão em relação ao estado da água.

5.3.3 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 2 da API 579

A análise seguinte constitui da pressão encontrada pelo nível 2, a mesma foi de 0,98 MPa (142,78 psi). A Figura (5.11) mostra a maior tensão encontrada no instante inicial.

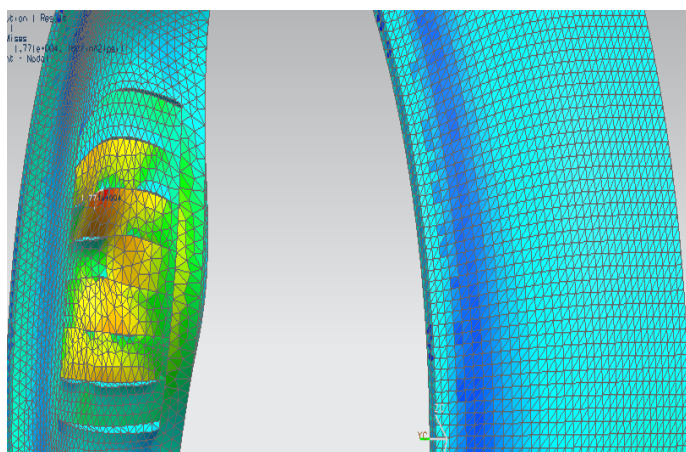


Figura 5.11 - Tensão máxima para o nível 2 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.

Essa tensão equivale a 122,11 MPa (17,71 kpsi), isto significa que para o instante inicial, a tensão também não ultrapassou a tensão admissível do material, para o regime estacionário o vaso ainda opera com segurança, pois a tensão encontrada é de 136,04 MPa (19,75 kpsi).

O próximo passo é analisar o estado da água que de fato, pela Fig. (5.12), o fluido de trabalho está líquido comprimido.

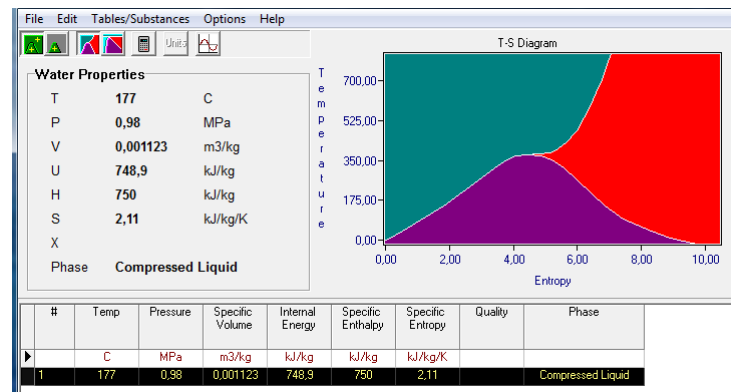


Figura 5.12 - Estado da água para MAWP de nível 2 com dano interno.

Logo, o nível 2 está dentro dos parâmetros realizados, podendo-se colocar o vaso de pressão nessas condições com segurança.

5.3.4 - Comportamento da tensão no vaso de pressão com corrosão interna para a MAWP de nível 3 da API 579

A última análise consiste no comportamento da tensão para a MAWP encontrada pelo nível 3 que foi de 0,86 MPa (125 psi), a Fig. (5.13) mostra a localização da maior tensão para o instante inicial.

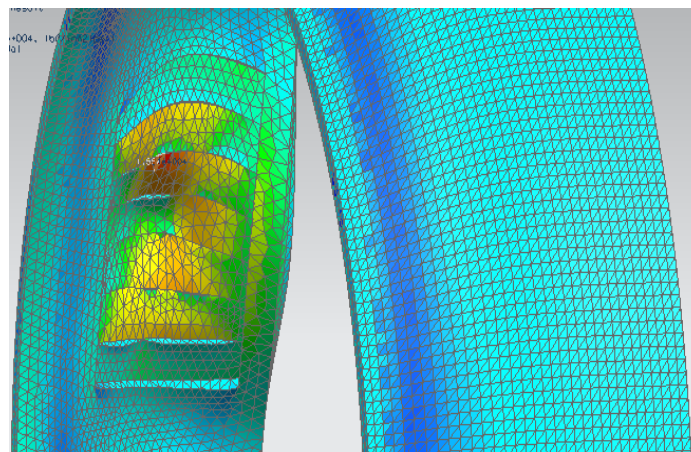


Figura 5.13 - Tensão máxima para o nível 3 na região de menor espessura com corrosão interna para o instante inicial.

A tensão inicial encontrada foi de 106,94 MPa (15,51 kpsi), bem abaixo da tensão admissível do material e a tensão de regime estacionária é de 121,83 MPa (17,67 kpsi), logo, o nível 3 está dentro do primeiro parâmetro.

Agora analisa-se o estado da água nessas condições pela Fig. (5.14):

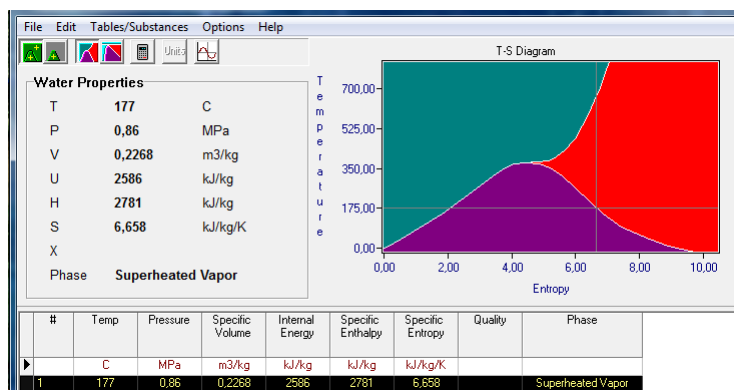


Figura 5.14 - Estado da água para a MAWP de nível 3 com dano interno.

A análise de estado da água indica que a mesma se transformou em vapor superaquecido, sendo assim, a MAWP de nível 3 da API 579 não satisfaz o segundo parâmetro.

Analogamente, uma visão geral sobre a distribuição da tensões pelos 3 níveis da API 579 em relação ao tempo pode ser vista na Fig. (5.15):

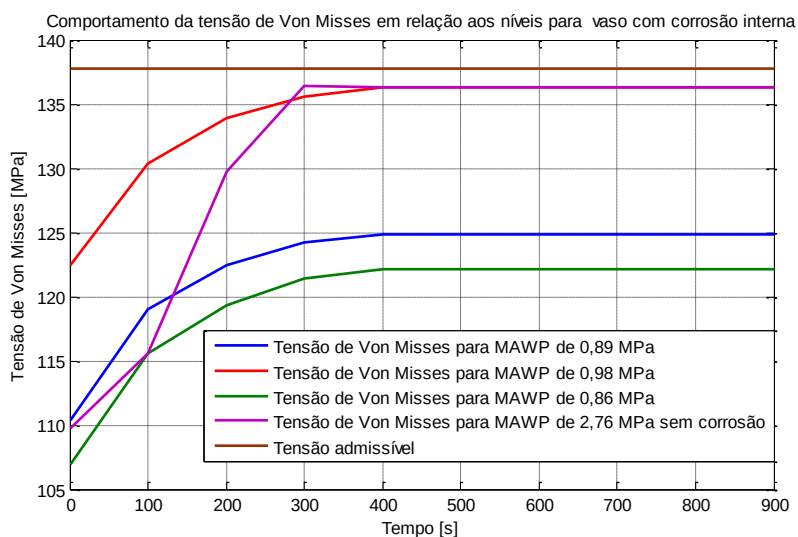


Figura 5.15 - Comportamento da tensão em relação ao tempo para os 3 níveis da API 579 com corrosão interna.

Observa-se que para a corrosão interna, considerando o parâmetro da tensão admissível, os três níveis da API satisfazem essa condição, porém apenas o nível 2 mantém o estado da água em líquido comprimido, sendo desta forma, o nível que coloca o vaso a operar com segurança.

Por fim, ficou-se comprovado que as análises estruturais realizadas no capítulo anterior não levando em conta a influência da temperatura, mostrou-se que a tensão encontrada quando não há transferência de calor é equivalente para a encontrada para o tempo inicial considerando a análise transiente. Tal fato também ocorre com a análise analítica por von Mises, pois o mesmo não leva em conta a influência da temperatura e a tensão encontrada de 108,06 MPa (15,68 kpsi) é bem próximo a encontrada pela análise numérica sem influência de temperatura que foi de 110,32 MPa (16 kpsi). Esse pequeno detalhe pode comprometer um equipamento ou toda instalação se não forem tomadas medidas como um coeficiente de segurança já levando em consideração esse aumento de tensão devido a temperatura.

5.4 - Cálculo das *RSF*

Como definido anteriormente, a *RSF* é definido como a razão da carga limite para que ocorra o colapso plástico do vaso com dano pela carga limite que provoque o colapso plástico do componente sem dano. Se o *RSF* for maior que 0,9, o vaso de pressão pode ser colocado de volta em operação com segurança (API, 2000) caso contrário, diminui-se a *MAWP* para os valores recomendados pela API 579, (que como foi visto, nem sempre oferece segurança), repara ou substitui o vaso de pressão.

*5.4.1 - Cálculo da *RSF* para a corrosão externa*

A carga para colapso plástico pode ser aproximada pela pressão de trabalho inicial de 2,76 MPa (400 psi), essa aproximação é válida, dado que a tensão atuante nessa situação é bem próxima da tensão admissível. Através de várias simulações, foi encontrado que a mínima pressão que traz riscos ao vaso de pressão foi aproximadamente 1,66 MPa (240 psi), a Fig. (5.16) traz a distribuição da tensão para essa pressão.

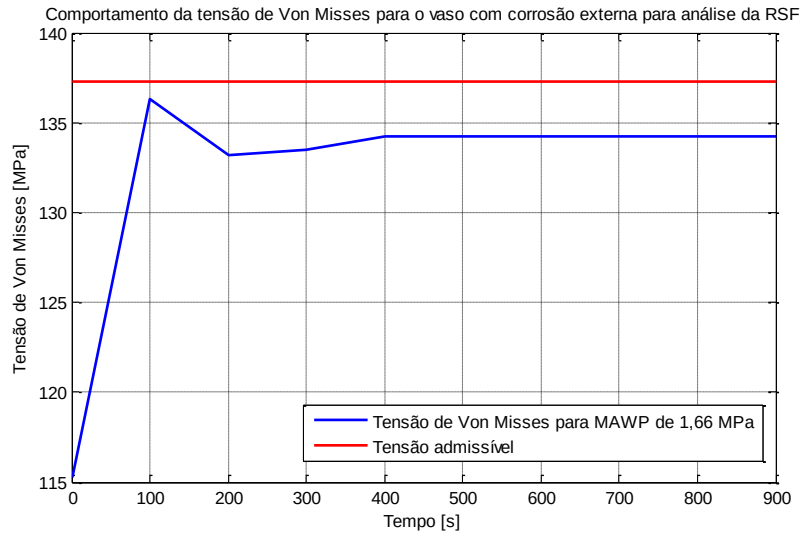


Figura 5.16 - Comportamento da tensão para a MAWP 1,66 MPa para o vaso com dano externo.

Logo, a *RSF* baseado na corrosão externa será:

$$RSF_e = \frac{240}{400} = 0,6$$

Como é menor que 0,9; o vaso de pressão não pode operar nas condições iniciais de trabalho. Para que o vaso possa operar novamente com segurança na pressão de trabalho de 2,76 MPa (400 psi), tem-se que a *MAWP* mínima de operação é dada pela Eq. (5.1):

$$MAWP_a = 400 \cdot RSF_a = 400 \cdot 0,9 = 360 \text{ psi} = 2,48 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

Onde 2,76 MPa é a pressão de trabalho inicial. Portanto, caso a redução de pressão não seja possível no vaso de pressão, a outra solução disponível é aplicar uma reparação no equipamento para amenizar os efeitos da corrosão, ou no pior das hipóteses, construir um novo vaso de pressão.

5.4.2 - Cálculo da RSF para a corrosão interna

Analogamente, para a corrosão interna, encontra-se que a mínima *MAWP* que causa o colapso plástico do equipamento é de 1 MPa (145 psi), a Fig. (5.17) mostra a distribuição dessa *MAWP*.

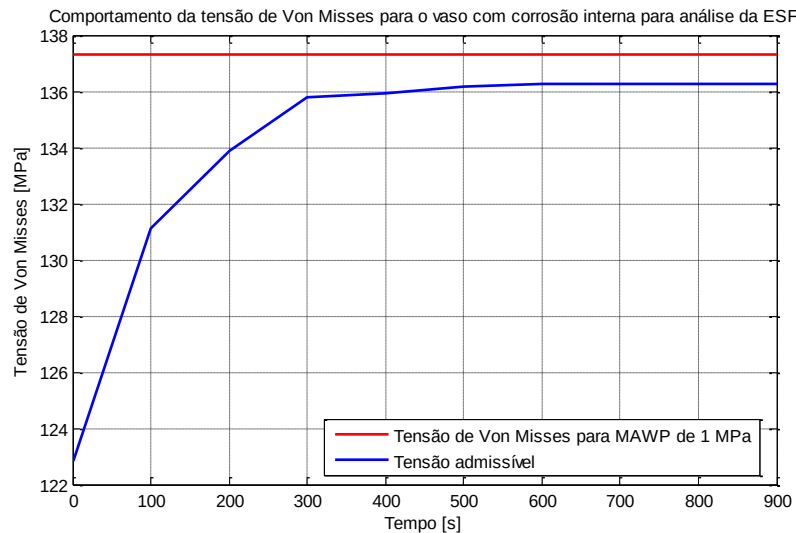


Figura 5.17 - Distribuição de tensão para a MAWP 1 MPa para o vaso com dano interno.

Por sua vez, a RSF para esse caso é:

$$RSF_i = \frac{145}{400} = 0,36$$

Menor ainda para a corrosão interna. O vaso está operando com menos da metade da sua capacidade de carga devido a esse dano interno. Da mesma forma que a corrosão externa, o vaso com esse dano para conseguir operar nas condições de projeto inicial precisa que sua RSF seja maior que 0,9. Mas, como a RSF_i é muito baixa, a melhor alternativa não seja o reparo, e sim a substituição do equipamento existente.

5.5 - Análise das Temperaturas Máximas e Mínimas Para Cada Tipo de Corrosão

No capítulo anterior mostrou-se o comportamento da temperatura máxima e mínima para cada tipo de corrosão, esta seção será destinado a detalhar o comportamento térmico e avaliar em qual tipo de corrosão tem-se uma maior temperatura, tanto na parede interna como na externa.

A Figura (5.18) mostra o comportamento térmico da parede interna para a corrosão externa e interna.

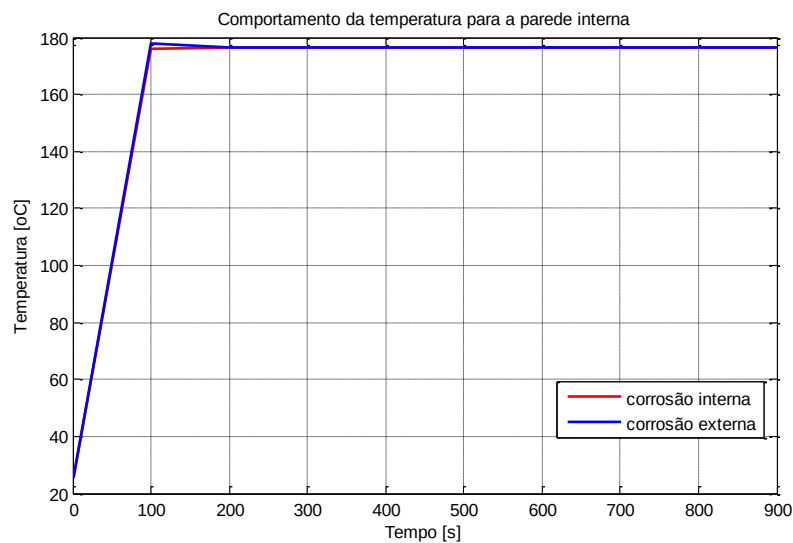


Figura 5.18 - Comportamento da temperatura para a parede interna.

Analogamente, a Fig. (5.19) mostra a o comportamento térmico da parede externa do vaso de pressão.

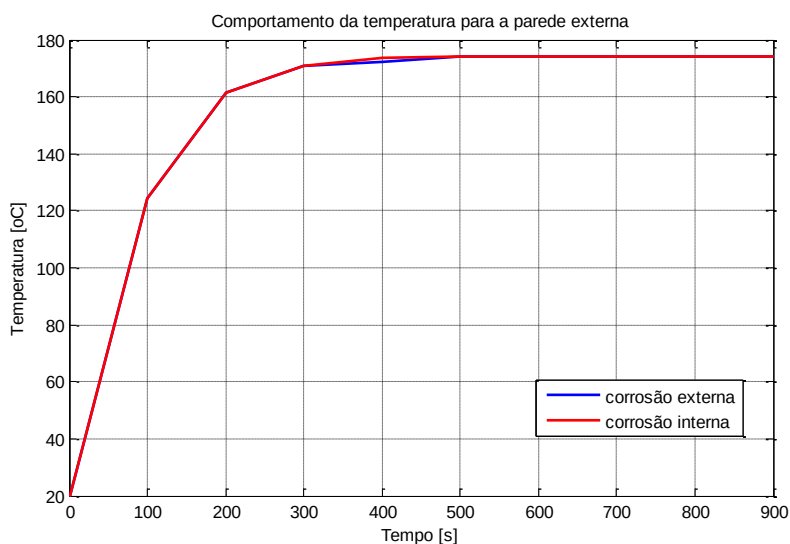


Figura 5.19 - Comportamento da temperatura para a parede externa.

A Tabela (5.1) traz uma análise mais detalhada das Fig. (5.18) e (5.19):

Tabela 5.1 - Máximas temperaturas nas paredes para os tipos de corrosão.

	Máxima temperatura para corrosão externa [°C]	Máxima temperatura para corrosão interna [°C]
Parede Interna	177,67 (tempo 100s)	176,44 (tempo 400s)
Parede Externa	174,28 (tempo 700s)	174,28 (tempo 700s)

Um pequeno pico de temperatura ocorre para a corrosão externa dentro do vaso (parede interna), antes que o sistema entre em regime estacionário. Esse pico chama-se lugar quente (*hot spot*), já mencionado anteriormente. Esse é o motivo pelo qual existe também um pico de tensão para a corrosão externa no tempo de 100s. Portanto, esse hot spots são perigosos e sempre que existir deve-se ser estudar o comportamento da tensão nesses lugares. Para a corrosão interna nenhuma anormalidade foi observada, a temperatura cresce gradualmente tanto na parede externa quanto na interna até chegarem no regime estacionário de aproximadamente 700s.

5.6 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Redução da Temperatura de Trabalho com Corrosão Externa

A seguir realiza-se a análise da integridade estrutural do vaso de pressão operando com uma redução de temperatura para observar o que acontece com a distribuição da tensão. As temperaturas de análises propostas foram: 126,85°C (260,33°F), 66,85°C (152,33°F) e a temperatura ambiente 20°C (68°F). Considera-se para essa análise o vaso de pressão com corrosão externa e interna.

A Tabela (5.2) mostra as propriedades da água a 126,85°C (260,33°F), 66,85°C (152,33°F) e a 20°C (68°F).

Tabela 5.2 - Propriedades termofísicas da água saturada para as temperaturas analisadas. (INCROPERA, et al., 2008).

Temperatura [K]	Massa específica [Kg/m ³]	Viscosidade [N.s/m ²]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Número de Prandtl	Coeficiente de convecção [W/m ² .K]
126,85°C (400K)	937,207	0,000217	0,688	1,34	4024,21
66,85°C (340K)	979,432	0,00042	0,66	2,66	3101,89
20°C (273,15K)	998	0,00102	0,603	7,08	998

A *MAWP* utilizada para observar o comportamento de tensão é a do nível 3 da API 579, pois é a *MAWP* que traz segurança ao vaso. A Fig. (5.20) mostra a distribuição de tensão para a pressão de 1,64 MPa (236 psi) em função das temperaturas de trabalho de 177°C (350°F), 126,85°C (260,33°F), 66,85°C (152,33°F) e a temperatura ambiente 20°C (68°F).

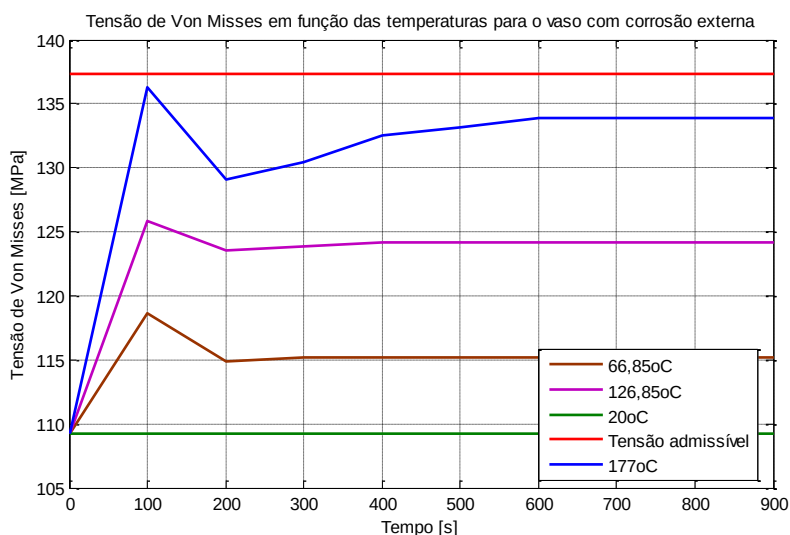


Figura 5.20 - Tensão para a MAWP nível 3 em relação as temperaturas.

A Tabela (5.3) mostra a tensão máxima encontrada para cada temperatura para a MAWP de nível 3.

Tabela 5.3 - Tensão máxima para as temperaturas analisadas para o vaso com corrosão externa.

Temperatura [°C]	Tensão [MPa]
177	136,17
126,85	125,35
66,85	118,18
20	107

Com base nesses resultados, é possível calcular uma nova *RSF*, portanto, é seguro dizer que para cada mudança na temperatura de trabalho no vaso tem-se uma nova *RSF* devido ao aumento da MAWP.

A Figura (5.21) mostra os novos valores da MAWP para as temperaturas.

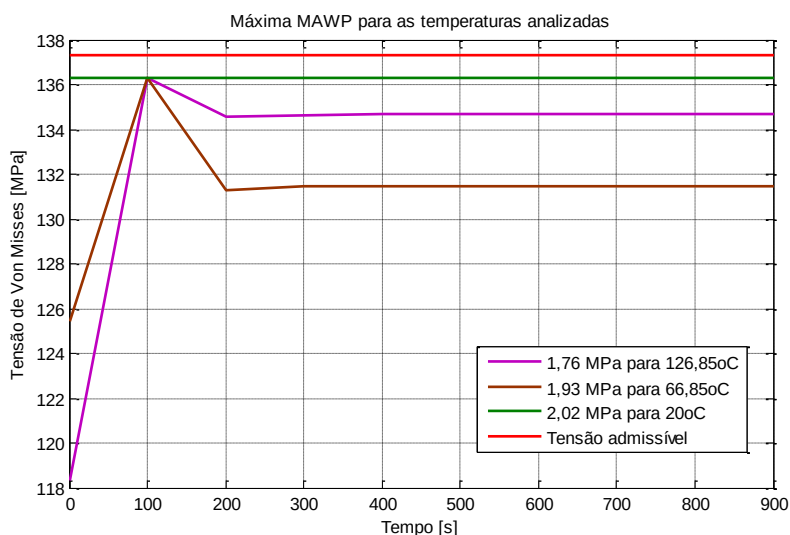


Figura 5.21 - Máxima MAWP para as temperaturas analisadas para corrosão externa.

A Tabela (5.4) mostra o ganho de *RSF* com a redução de temperatura:

Tabela 5.4 - Ganho de *RSF* com a redução de temperatura para corrosão externa.

Temperatura [°C]	MAWP [MPa]	RSF
177	1,63	0,6
126,85	1,76	0,64
66,85	1,93	0,7
20	2,02	0,73

A redução da temperatura do fluido se mostra a melhor maneira de colocar o vaso de pressão em operação aumentando-se sua *MAWP* sem por o mesmo em risco. E o ideal seria que a temperatura do fluido estivesse na mesma temperatura do vaso de pressão, pois assim não haveria transferência de calor e consequentemente distribuição de tensão, evitando também os hot spots que causam picos de tensão.

5.7 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Redução da Temperatura de Trabalho com Corrosão Interna

Análise semelhante se faz para a corrosão interna, porém a *MAWP* usada nesse caso é a do nível 2 da API 579, que vale 0,98MPa (142,78 psi), pois foi a pressão que satisfaz os critérios estabelecidos. A Figura (5.22) mostra a redução de tensão ao trabalhar com as novas temperaturas.

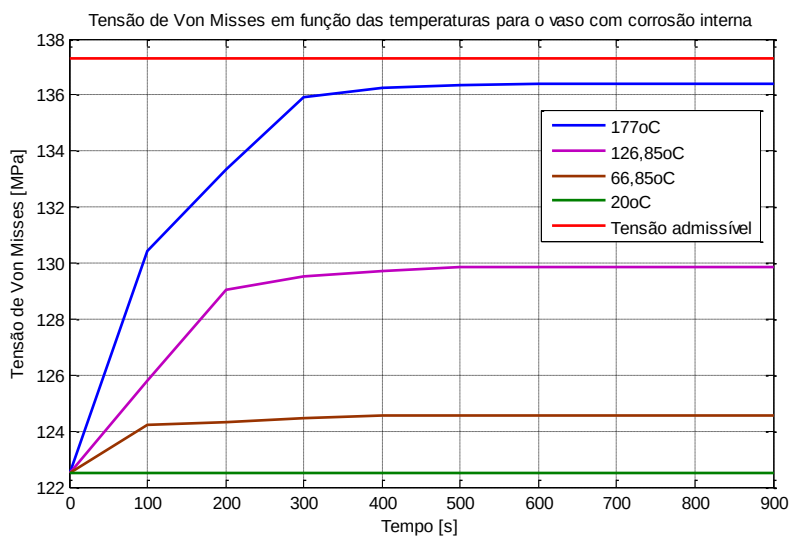


Figura 5.22 - Tensão para a MAWP nível 2 em relação as temperaturas.

De maneira análoga, verifica-se a redução de tensão para a *MAWP* de nível 2, a Tab. (5.5) mostra as máximas tensões para cada valor de temperatura.

Tabela 5.5 - Tensão máxima para as temperaturas analisadas para o vaso com corrosão interna.

Temperatura [°C]	Tensão [MPa]
177	136,17
126,85	129,97
66,85	124,66
20	122,11

Com isso, as novas *MAWPs* para cada temperatura são mostradas na Fig. (5.23):

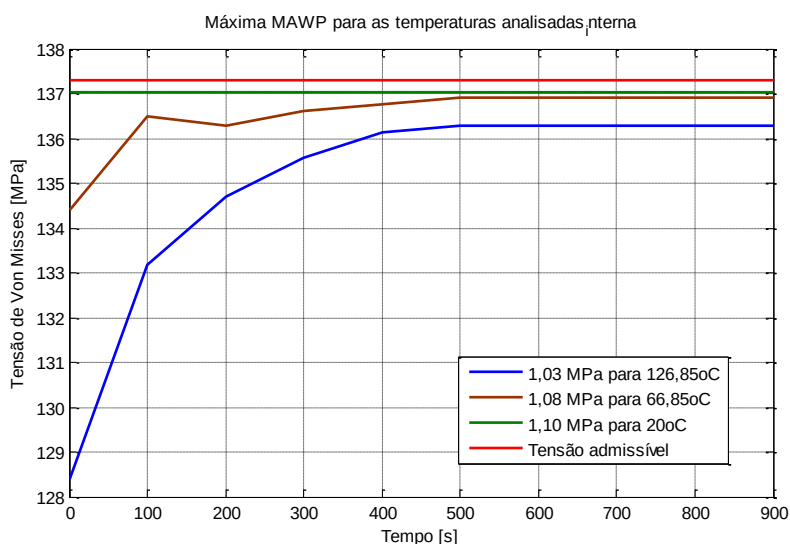


Figura 5.23 - Máxima MAWP para as temperaturas analisadas para corrosão interna.

Por sua vez, as *RSF* para a corrosão interna variam de acordo com a Tab. (5.6):

Tabela 5.6 - Ganho de *RSF* com a redução de temperatura para corrosão interna.

Temperatura [°C]	MAWP [MPa]	RSF
177	0,98	0,36
126,85	1,03	0,38
66,85	1,08	0,39
20	1,10	0,4

Portanto, mesmo com a diminuição de temperatura, não houve uma grande variação da *RSF* para o vaso com corrosão interna, então a melhor solução nesse caso para se conseguir um considerável aumento da *MAWP* será reparar o dano causado pela corrosão.

5.8 - Análise Estrutural do Vaso de Pressão com Aumento da Temperatura de Trabalho

As temperaturas propostas são: 204,44°C (400°F) e 229,03°C (444,33°F), esta última temperatura é a temperatura de saturação da água para os 2,76 MPa. O objetivo é analisar o comportamento da tensão quando a água está em vapor saturado. Para esta seção analisa-se o vaso sem corrosão e com os danos externo e interno.

5.8.1 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso sem dano

As propriedades da água a 204,44°C (400°F) são mostradas na Tab. (5.7)

Tabela 5.7 - Propriedades termofísicas da água saturada a 204,44°C. (INCROPERA, et al., 2008).

Temperatura [K]	Massa específica [Kg/m ³]	Viscosidade [N.s/m ²]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Número de Prandtl	Coeficiente de convecção [W/m ² .K]
477,59	859,561	0,00013069	0,66169	0,9	4620,921

A Figura (5.24) mostra os valores da tensão para a pressão de 2,76 MPa (400 psi) e para o novo valor recomendado para a *MAWP* que é de 2,72 MPa (394 psi).

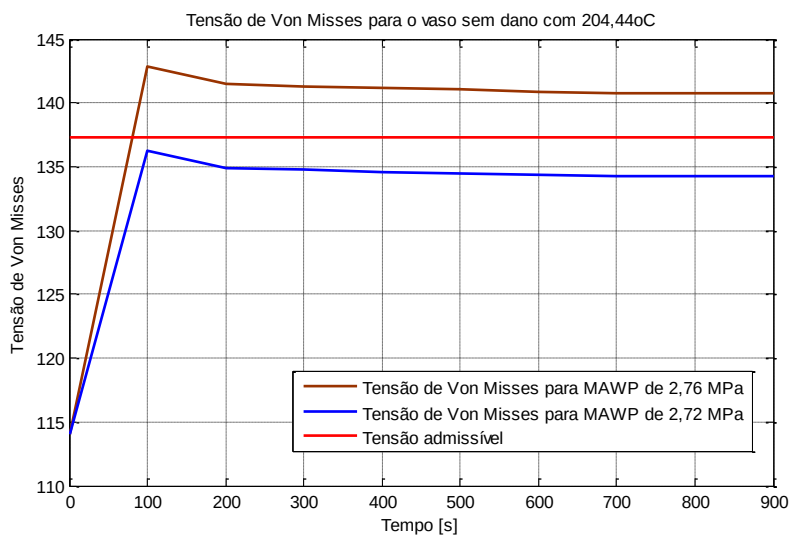


Figura 5.24 - Comportamento da tensão no vaso sem dano para 204,44°C.

O pico de tensão de 136,38 MPa (19,78 kpsi), portanto, com esse aumento de temperatura, é necessário uma pequena diminuição da *MAWP*.

5.8.2 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso com corrosão externa

Para as análises do vaso corroído, foram considerados duas *MAWPs*: a de trabalho de 2,76 MPa (400 psi) e a de 1,70 MPa (247 psi), essa é a pressão de líquido saturado para a temperatura de 204,44°C (400°F), portanto, qualquer redução de *MAWP* além dessa, o estado da água muda para vapor superaquecido. o que não satisfaz os parâmetros.

A Figura (5.25) mostra o resultado do comportamento da tensão para essas *MAWPs* com 204,44°C (400°F).

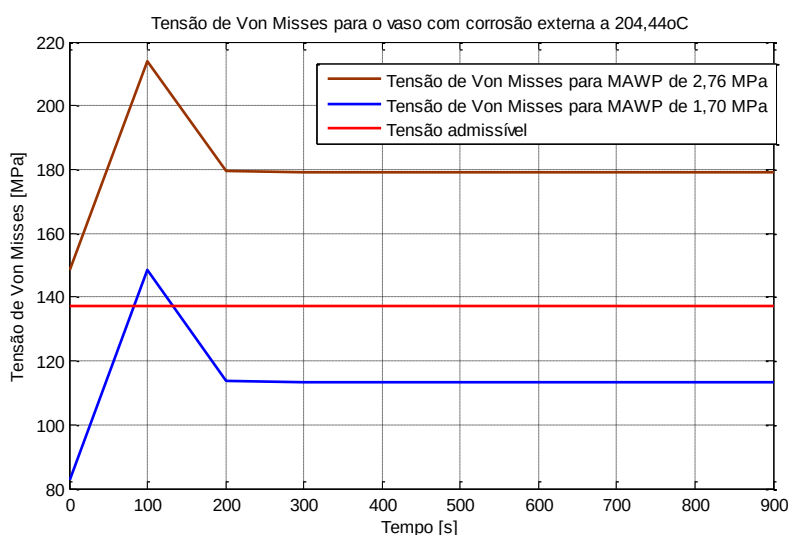


Figura 5.25 - Comportamento da tensão no vaso com corrosão externa para 204,44°C.

Nessa situação, o vaso precisa de uma reparação, pois nem mesmo a mínima *MAWP* de 1,7 MPa (247 psi) possível para que a água continue líquida satisfaz devido a um pico de tensão no tempo 100s de valor 143,48 MPa (20,81 kpsi) que se configura maior que a tensão admissível de 137,7 MPa (19,9 kpsi).

5.8.3 - Análise da distribuição da tensão para 204,44°C (400°F) para o vaso com corrosão interna

A última análise refere-se a análise para a corrosão interna com as MAWPs de 2,76 MPa (400 psi) e 1,7 MPa (247 psi). A Fig. (5.26) mostra o comportamento da tensão para essas MAWPs.

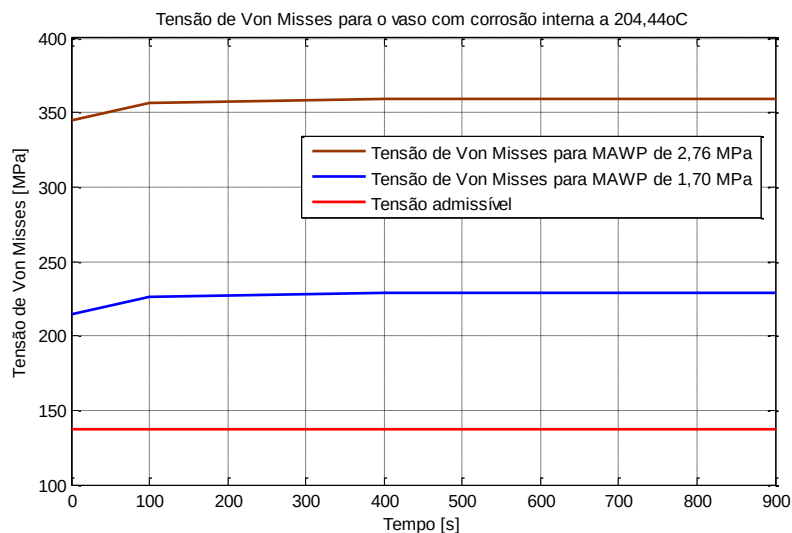


Figura 5.26 - Comportamento da tensão no vaso com corrosão interna para 204,44°C.

A situação é ainda mais agravante para a corrosão interna, pois durante todo o período o material está submetido a ações elásticas e pode ocorrer o rompimento do vaso de pressão em qualquer momento.

5.8.4 - Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso sem dano

Nessa etapa analisa-se a integridade estrutural do vaso de pressão com a água no estado de vapor saturado, pois essa temperatura corresponde a temperatura de vapor saturado para a pressão de 2,76 MPa (400 psi).

A Tabela (5.8) mostra as propriedades da água nesse estado:

Tabela 5.8 - Propriedades termofísicas da água saturada a 229,03°C. (INCROPERA, et al., 2008).

Temperatura [K]	Massa específica [Kg/m ³]	Viscosidade [N.s/m ²]	Condutividade Térmica [W/m.K]	Número de Prandtl	Coeficiente de convecção [W/m ² .K]
502,24	13,586	0,00001667	0,04283	1,28	64,79132

Observa-se um coeficiente de convecção bem abaixo em relação a água líquida, mas esse valor está de acordo com a Tab. (3.4), pois está entre 25 e 250. A Figura (5.27) mostra o comportamento da tensão para a água no estado de vapor saturado no vaso sem dano.

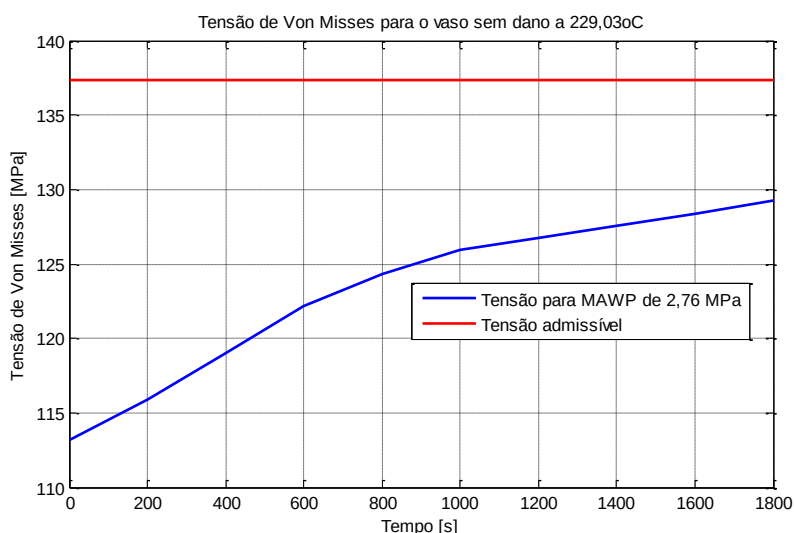


Figura. 5.27 - Comportamento da tensão para o vaso sem dano a 229,03°C.

Percebe-se que o tempo para chegar no estado permanente foi para 1800s, isso acontece pelo fato do coeficiente convectivo ter diminuído significativamente, e com isso a transferência de calor acontecer de uma forma mais lenta. A curva da distribuição de tensão mostrou-se suave, sem a presença de picos. Nessa situação do vaso sem dano, a temperatura pode ser aumentada para o estado de vapor saturado da água a 2,76 MPa (400 psi), pois o valor da tensão final para o vaso sem dano é 127,48 MPa (18,49 kpsi).

5.8.5 - Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso com corrosão externa

A Figura (5.28) mostra o comportamento da tensão para o vaso com dano externo.

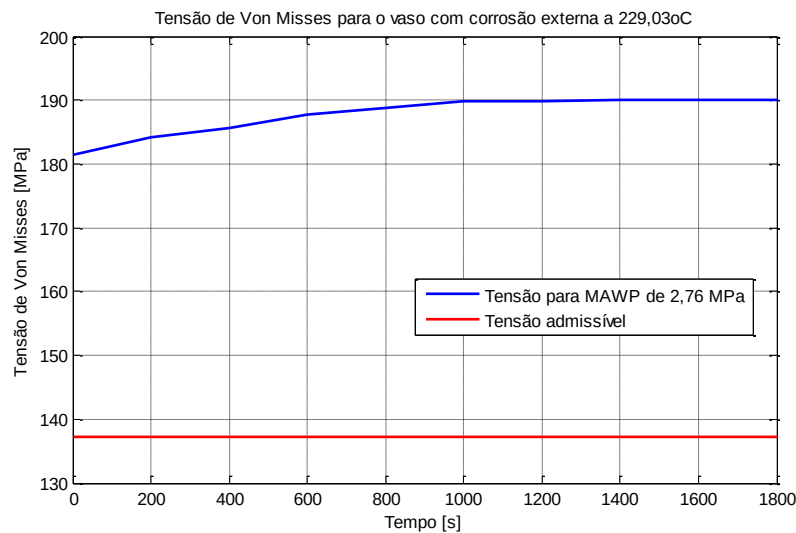


Figura. 5.28 - Comportamento da tensão para o vaso com corrosão externa a 229,03°C.

Neste caso, o vaso opera em completo risco quando transportando água no estado de vapor saturado.

5.8.6 - Análise da distribuição da tensão para 229,03°C (444,32°F) para o vaso com corrosão interna

A última análise é para a corrosão interna nessas condições de água no estado de vapor saturado. A Figura (5.29) mostra o comportamento da tensão no vaso com dano interno.

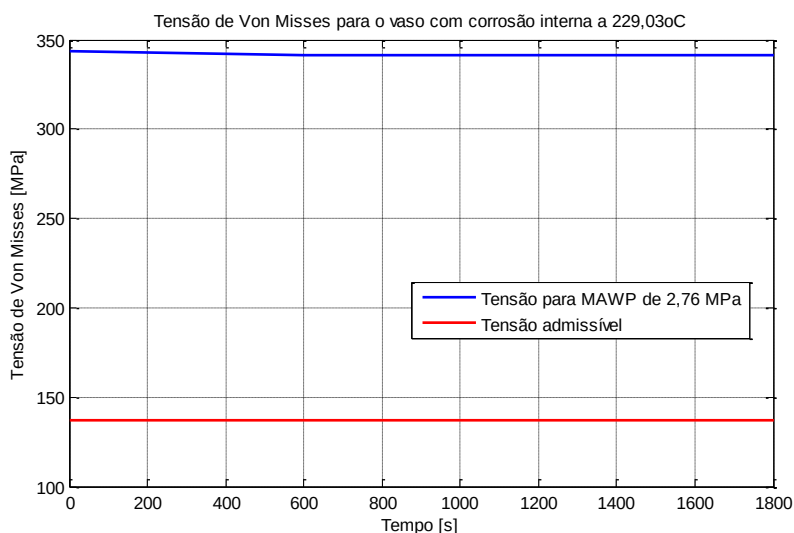


Figura. 5.29 - Comportamento da tensão para o vaso com corrosão interna a 229,03°C.

Analogamente, para o dano interno o vaso não é capaz de operar com segurança. Apenas para o vaso sem dano pode-se aumentar a temperatura para 229,03°C de modo que o estado da água seja vapor saturado.

De uma forma geral, constatou-se que as tensões são mais suaves para a água no estado vapor saturado, com isso, não houve a presença de *hot spots* para a corrosão externa e consequentemente picos de tensão. Porém, o vaso opera em riscos mesmo no estado vapor saturado da água quando submetido aos danos provocados pela corrosão.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

6.1 - Considerações Finais

Esse trabalho de dissertação teve como objetivo analisar a integridade estrutural de um vaso de pressão sujeito a corrosão via solução numérica por meio da norma API 579. Para isso, apresentou-se os conceitos de vasos de pressão e corrosão, além de uma revisão bibliográfica abordando alguns estudos sobre a integridade estrutural desses equipamentos e sobre os conceitos de *hot spots* que podem aparecer em vasos de pressão corroídos.

De acordo com o trabalho, as principais conclusões desta dissertação podem ser descritas abaixo:

- Tanto a análise numérica estrutural e térmica foram validados de maneira bastante satisfatória quando comparadas com as equações analíticas existentes para o cálculo da tensão e temperatura, respectivamente;
- As equações analíticas para cálculo de tensão não levam em consideração as transferências de calor que ocorre entre o fluido e o vaso de pressão;
- A presença dos hot spots agrava ainda mais a integridade do vaso de pressão, pois houve picos de tensão nesse locais;
- Para a análise da corrosão externa, a API 579 ficou de acordo com o encontrado numericamente, no qual apenas a MAWP de nível 3 colocou o vaso a operar com segurança seguindo os parâmetros pré-estabelecidos anteriormente, porém as reduções de pressões propostas não satisfizeram e pôs o vaso de pressão a operar em risco;

- A corrosão interna mostrou-se mais grave que a externa, pois na equação adicionou-se o termo LOSS, fazendo com que as novas MAWP reduzissem consideravelmente, além disso, a carga é interna de 2,76 MPa (400 psi),
- Houve uma pequena discrepância em relação a análise estrutural do vaso com corrosão interna, na qual a MAWP de nível 2 não obedeceu os critérios de acordo com a API 579, enquanto que para a análise numérica essa MAWP foi a única que satisfaz os parâmetros para colocar o vaso de pressão operando com segurança;
- A redução de temperatura mostrou um meio eficiente de aumentar a MAWP e consequentemente a RSF do vaso para a corrosão externa, pois diminui-se o hot spot provocado por esse dano, porém para a corrosão interna esse aumento de RSF foi mínimo;
- O estado de vapor saturado aumenta o intervalo de tempo para chegar no regime estacionário, devido ao seu baixo coeficiente de convecção, além disso, não foi observado picos de tensão para a corrosão externa;

Diante disso, pode-se concluir que uma análise numérica bem elaborada pode-se mostrar a melhor opção para a análise estrutural em equipamentos em geral, devido a objetividade e agilidade com o que possa chegar aos resultados mais próximos da realidade.

6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

- Mudar o fluido de trabalho e verificar as tensões atuantes e se também ocorre hot spot;
- Encontrar analiticamente o tempo em que o sistema entra em estado permanente;
- Realizar a inspeção ultrassônica em um vaso de pressão e otimizar a medição de espessura;
- Encontrar a vida útil do vaso de pressão com base na API 579.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, A.G., SOUSA, A.R., 2008, *"Fundamentos de Metrologia"*, 1^a Edição, Manole, São Paulo.

ALBUQUERQUE, L.B., 1999 *"Categorização de Tensões em Modelos de Elementos Finitos de Conexões Bocal-Vaso de Pressão"*, Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, São Paulo, SP, Brasil;

ALMEIDA, J.I.L., RODRIGUES, M.C., ROCHA, C.V., DA SILVA, H.S.R., 2012 *"Análise Numérica da Integridade Estrutural de Vasos de Pressão com Corrosão Usando a Norma API 579"*, XXX Congresso Nacional de Ensaaios Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo - SP.

ALMEIDA, J.I.L., RODRIGUES, M.C., ROCHA, C.V., DA SILVA, H.S.R., 2012 *"Numerical Analysis Of The Structural Integrity Of Pressure Vessels With Corrosion Using The Standard API 579"*, 3rd International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro - RJ, Brazil.

ALMEIDA, J.I.L., RODRIGUES, M.C., SILVA, J.B.A., DA SILVA, H.S.R., 2012 *"Análise Numérica da Integridade Estrutural de Vasos de Pressão com Corrosão Usando a Norma API 579"*, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís - MA.

ANDREUCCI, R., 2002, *"Ensaio por Ultra-som - Aspectos Básicos"*, Apostila ABENDE, 3ª edição.

API 579, 2000 *"Recommended practice for Fitness-for-Service."*, Washington, DC, American Petroleum Institute;

ASME., 1984, *"Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines."* American National Standards Institute (ANSI)/ American Society of Mechanical Engineers (ASME) B31G.

BARROSO, F.A., 2011, *"Projeto e desenvolvimento de um sistema intercambiável para inspeção em dutos de petróleo e gás"*, Dissertação de Mestrado, UFPB –PB.

BEDNAR, H.H., 1981, *"Pressure Vessel design handbook"*, 1ª Edição, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

FARR, J.R., JAWARD, M.H., 2001, *"Guidebook for the design o ASME section VIII pressure vessels"*, 2ª edição, New York, ASME Press.

FONTANA, M.G., 1986, *"Corrosion Engineering"* 3ª Edição, McGraw-Hill, New York.

GENTIL, V., 2011, *"Corrosão"*, 6ª Edição, LTC, Rio de Janeiro.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., BERGMAN, T.L., et al., 2008, *"Fundamentos de transferência de calor e de massa"*, 6ª Edição, LTC, Rio de Janeiro.

KIEFNER, J.F., VIETH, P.H., 1989, *"A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe (with RSTRENG)."*, American Gas Association, Catalogue L51609, PR3-805, December.

MURA, T., LEE, S.L., 1963, *"Application of variational principles to limit analysis."* Quart Appl Math, 21(3):243-348.

NACE Standard TM-01-69, 1969, "National Association of Corrosion Engineers".

R6., 1995, *"Assessing the Integrity of Structures Containing Defects."* British Energy, Gloucester, UK.

REINHARDT, W.D., SESHADRI, R., 2003, *"Limit Load Bounds for the m_α -multipliers."*, J Pressure Vessels Technol, 125:11-8;

RODRIGUES, M.C., ALMEIDA J.I.L., RODRIGUES, R.N., 2010, *"Desenvolvimento de um sistema automático de varredura por inspeção ultrassônica em dutos"*, XVIII Encontro de Iniciação Científica, João Pessoa – PB.

SANTIM, J.L., 2003, *"Ultra-som: Técnica e Aplicação"*, Ed.: Pró END Consultoria.

SESHADRI, R., 2005 *"Integrity assessment of pressure components with local hot spots."* J Pressure Vessel Technol;127:137 e42.

SESHADRI, R., MANGALARAMANAN, S.P., 1997, *"Lower bound limit loads using variational concepts: the m_α -method."* Int Journal Pressure Vessels Piping, 71:93-106.

SIMS, J.R., HANTZ, B.F., KUEHN, K.E., 2006, *"A Basis for the Fitness for Service Evaluation of Thin Areas in Pressure Vessels and Storage Tanks"*. Int J Pressure Vessels Piping.

SPENCE, J., TOOTH, A.S., 1994, *"Pressure vessel design principles"*, 1^a Edição, London, E&FN Spon.

TANTICHATTANONT, P, ADLURI, S.M.R., SESHADRI, R., 2009, *"Fitness-for-Service evaluation of thermal hot spots and corrosion damage"* Int J Pressure Vessels Piping; 84:749 e61.

TELLES, P.C.S., 1986, "*Materiais para Equipamentos de Processo*", 3ª Edição, Interciência, Rio de Janeiro.

TELLES, P.C.S., 1996 "*Vasos de Pressão*", 2ª Edição, LTC, Rio de Janeiro.

VERNON, W.H.J., 1957 "*Metallic Corrosion and Conservation of Natural Resources*", Institute of Civil Engineers, London, pp. 105-133

WINTERTON, R.H.S., 1998, "*Int. J. heat mass transfer*", 41, 809.

ZOCOLER, J.L., FILHO, F.C.B., OLIVEIRA, L.A.F., HERNANDEZ, F.B.T., 2004, "*Modelo para determinação do diâmetro e velocidade de escoamento econômica em sistemas elevatórios de água.*", Congresso Temático de Dinâmica e Controle, São Paulo.