

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Daniel Grandinetti**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES EM VASO DE  
PRESSÃO DE PAREDE FINA POR MEIO DA ANÁLISE TEÓRICA,  
NUMÉRICA E EXPERIMENTAL**

Taubaté – SP

2022

**Daniel Grandinetti**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES EM VASO DE  
PRESSÃO DE PAREDE FINA POR MEIO DA ANÁLISE TEÓRICA,  
NUMÉRICA E EXPERIMENTAL**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso de Mestrado  
Profissional em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio  
Martins

Taubaté – SP

2022

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi**  
**Universidade de Taubaté - Unitau**

G753a Grandinetti, Daniel  
Análise do comportamento das tensões em vaso de pressão de parede  
fina por meio da análise teórica, numérica e experimental / Daniel  
Grandinetti. – 2022.  
144 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Pró-reitoria de  
Pesquisa e Pós-graduação, Taubaté, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins, Departamento de  
Engenharia Mecânica.

1. Descontinuidade geométrica. 2. Vaso de pressão. 3. Extensometria.  
4. Elementos finitos. 5. Linearização de tensão. I. Universidade de Taubaté.  
Dep. de Engenharia Mecânica. Mestrado em Engenharia Mecânica.  
II. Título.

CDD – 681.76041

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

Daniel Grandinetti

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES EM VASO DE  
PRESSÃO DE PAREDE FINA POR MEIO DA ANÁLISE TEÓRICA,  
NUMÉRICA E EXPERIMENTAL**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo Curso Mestrado  
Profissionalizante de Engenharia Mecânica  
do Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

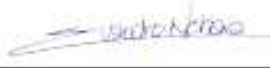
Área de Concentração: Projeto Mecânico

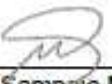
Data: 29/03/2022

Resultado: Aprovado

**COMISSÃO JULGADORA:**

Assinatura   
Prof. Dr. José Elias Tomazini  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (UNESP)

Assinatura   
Prof. Dr. Evandro Luis Nohara  
Universidade de Taubaté (UNITAU)

Assinatura   
Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (UNESP)  
Professor Orientador – Presidente da Banca Examinadora

Dedico este trabalho à todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para meu desenvolvimento nesta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelas oportunidades oferecidas.

À minha família por todo o suporte e paciência.

Ao meu orientador, pela sabedoria e experiência na condução dessa caminhada.

À Universidade de Taubaté e Professores, pelo suporte, recursos e conhecimento.

“Quando os ventos de mudança sopram, umas pessoas levantam barreiras, outras constroem moinhos de vento.”

*Érico Veríssimo*

## RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos muito utilizados em diversas indústrias, e podem operar com pressão e temperatura elevadas, podendo causar acidentes de grandes proporções caso haja alguma falha. Como consequência das variações de pressão e temperatura durante a operação do vaso de pressão, tensões e deformações são geradas em toda a parede do equipamento. O presente trabalho foi realizado em uma organização privada na área petrolífera, e tem como objetivo analisar o comportamento das tensões longitudinal e circunferencial em três pontos específicos da parede de um vaso de pressão, sendo dois pontos distantes de descontinuidade geométrica (no tampo superior e no costado) e um ponto próximo de descontinuidade geométrica (na intersecção do tampo superior com a conexão) por meio das análises teórica, numérica e experimental. As tensões teóricas foram obtidas por meio da teoria de membrana (ou parede fina) e formulações do código ASME seção VIII divisão 2, as tensões numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF) no *software* ANSYS versão estudante e as tensões experimentais com auxílio da extensometria elétrica de resistência durante o teste hidrostático do equipamento. Na análise numérica, o *software* ANSYS permitiu a linearização da tensão nos três pontos específicos. O vaso de pressão deste trabalho é um equipamento chamado de adsorvedor de peneira molecular, localizado em plataforma de petróleo *offshore* e integrante de um sistema de desidratação de gás natural. Os resultados mostraram que as tensões na intersecção do tampo superior com a conexão foram superiores aos valores das tensões no tampo superior e no costado para as análises experimental e numérica, devido à influência das tensões de flexão em regiões de descontinuidade geométrica. Outro ponto importante foi a boa correlação dos resultados entre as análises experimental e a numérica por meio do MEF no *software* ANSYS, mostrando que essa metodologia se apresenta como uma ferramenta poderosa e confiável nas análises de tensões em vasos de pressão.

**Palavras-chave:** descontinuidade geométrica, vaso de pressão, extensometria, método dos elementos finitos, linearização de tensão



## ABSTRACT

Pressure vessels are equipment widely used in several industries, and can operate with high pressure and temperature, which can cause major accidents if any failure happens. As a consequence of pressure and temperature variations during pressure vessel operation, stresses and strains are produced throughout the equipment wall. The present work was carried out in a private organization in the oil area, and aims to analyze the behavior of longitudinal and circumferential stresses at three specific points on the wall of a pressure vessel, two distant points of geometric discontinuity (on the top head and the shell) and a point close to geometric discontinuity (on the intersection of the top head with the nuzzle) through theoretical, numerical and experimental analyses. Theoretical stresses were obtained through membrane theory (or thin wall) and ASME section VIII division 2 formulations, numerical stresses through the finite element method (FEM) in the student version ANSYS software and experimental stresses through electrical resistance strain gauge during the hydrostatic test of the equipment. In the numerical analysis, the ANSYS software allowed the linearization of the tension in the três specific points. The pressure vessel of this work is an equipment called molecular sieve adsorber, located in an offshore oil platform and part of a natural gas dehydration system. The results showed that the stresses at the intersection of the top head with the nuzzle were higher than the values of the stresses in the top head and shell for the experimental and numerical analysis, due to the influence of bending stresses in regions of geometric discontinuity. Another important issue was the good correlation of the results between the experimental and numerical analyzes through the FEM in the ANSYS software, showing that this methodology presents itself as a powerful and reliable tool in the analysis of tensions in pressure vessels.

**Keywords:** geometric discontinuity, pressure vessel, extensometry, finite element method, stress linearization

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vaso de pressão padrão .....	16
Figura 2: Principais partes do vaso de pressão.....	22
Figura 3: Alguns formatos de tampos.....	23
Figura 4: Tipos de tampos planos .....	23
Figura 5: Disposição dos vasos de pressão.....	24
Figura 6: Formatos dos suportes.....	25
Figura 7: Tubulação ligada à conexão .....	25
Figura 8: Etapas da extração e tratamento de gás natural.....	27
Figura 9: Vaso de pressão genérico com peneira molecular para adsorção .....	28
Figura 10: Tensões atuantes na parede de um vaso de pressão.....	29
Figura 11: Tensões a) membrana b) flexão c) total .....	30
Figura 12: Variação da tensão a) em parede fina b) em parede grossa .....	30
Figura 13: Tensões em vaso de pressão cilíndrico .....	31
Figura 14: Seção longitudinal e transversal do vaso de pressão cilíndrico .....	31
Figura 15: Seção transversal do vaso de pressão cilíndrico .....	32
Figura 16: Tensões em vaso de pressão esférico.....	32
Figura 17: Seção do vaso de pressão esférico .....	33
Figura 18: Tensões de flexão na junção costado e tampo .....	34
Figura 19: Formato da resistência elétrica do extensômetro a) de fio b) de lâmina .....	35
Figura 20: Características de um extensômetro.....	35
Figura 21: Extensômetro roseta retangular .....	36
Figura 22: Variedades de extensômetros.....	37
Figura 23: Ponte de Wheatstone com ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte .....	37
Figura 24: Diagrama do sistema de medição para medição de deformação por extensômetro.....	38
Figura 25: Diferentes tipos de elementos finitos.....	48
Figura 26: Discretização de um corpo contínuo .....	49
Figura 27: Tensão principal máxima no costado (distante de descontinuidade geométrica) .....	50
Figura 28: Tensão principal máxima na região da conexão (próximo de descontinuidade geométrica) .....	51
Figura 29: Distribuição da tensão circunferencial.....	52
Figura 30: Tensão de membrana .....	53
Figura 31: Distribuição de tensão.....	54
Figura 32: Distribuição de tensões na região da conexão.....	55
Figura 33: Tensão no contorno da junção .....	56
Figura 34: Tensões no bocal com carga da tubulação.....	56
Figura 35: Tensões na região de interesse .....	57
Figura 36: Visão geral do vaso de pressão deste trabalho.....	59
Figura 37: Vaso de pressão posicionado para o teste hidrostático .....	60
Figura 38: Flange com manômetro .....	61
Figura 39: Especificações do extensômetro.....	61
Figura 40: Visão geral do vaso de pressão com os três pontos específicos .....	62
Figura 41: Posicionamento do extensômetro próximo à intersecção a) visão geral b) detalhe .....	62
Figura 42: Posicionamento do extensômetro no tampo superior a) visão geral b) detalhe.....	63

Figura 43: Posicionamento do extensômetro no costado a) visão geral b) detalhe .....	63
Figura 44: Direções consideradas para as deformações e tensões no tampo .....	64
Figura 45: Direções consideradas para as deformações e tensões no costado ...	64
Figura 46: Visão geral do tampo superior.....	70
Figura 47: Visão geral da conexão.....	70
Figura 48: Dimensões da conexão.....	71
Figura 49: Visão geral da tampa da conexão.....	71
Figura 50: Visão geral do costado.....	72
Figura 51: Detalhe da transição do costado para o tampo superior .....	72
Figura 52: Visão geral do tampo inferior.....	73
Figura 53: Corte do tampo inferior.....	73
Figura 54: Detalhe do anel de ligação do costado com o tampo inferior .....	73
Figura 55: Visão geral do vaso de pressão sobre os suportes.....	74
Figura 56: Visão geral do modelo do vaso de pressão sobre os suportes .....	74
Figura 57: Visão geral do modelo completo do vaso de pressão.....	76
Figura 58: Visão geral do modelo simplificado do vaso de pressão.....	77
Figura 59: Área de contato entre conexão e tampa da conexão.....	78
Figura 60: Área de contato entre abertura no tampo superior e a conexão .....	78
Figura 61: Área de contato entre costado e tampo superior.....	79
Figura 62: Área de contato entre costado e tampo inferior.....	79
Figura 63: Área de contato entre costado e suportes.....	80
Figura 64: Condição de contorno para os suportes.....	80
Figura 65: Variação da pressão hidrostática na parede interna .....	80
Figura 66: Área de aplicação da pressão interna .....	81
Figura 67: Área de aplicação da pressão interna na tampa da conexão.....	81
Figura 68: Orientação da gravidade .....	82
Figura 69: Linearização da tensão circunferencial na parede do costado.....	83
Figura 70: Resultado da linearização da tensão circunferencial no ANSYS .....	83
Figura 71: Planos para secção do costado e tampo superior.....	84
Figura 72: Malha gerada no costado .....	85
Figura 73: Malha gerada no tampo superior e conexão .....	85
Figura 74: Malha gerada no tampo inferior, suportes e tampa da conexão.....	86
Figura 75: Qualidade do elemento para a malha do modelo.....	86
Figura 76: Localização dos pontos específicos no tampo superior do vaso de pressão.....	87
Figura 77: Localização dos pontos específicos no tampo superior do modelo.....	87
Figura 78: Localização do ponto específico no costado do vaso de pressão.....	88
Figura 79: Localização do ponto específico no costado do modelo .....	88
Figura 80: Tensões longitudinal e circunferencial 0° da teoria de membrana .....	92
Figura 81: Tensões circunferencial e circunferencial 90° da teoria de membrana	92
Figura 82: Tensões longitudinal e circunferencial 0° do ASME .....	94
Figura 83: Tensões circunferencial e circunferencial 90° do ASME .....	94
Figura 84: Tensões longitudinal e circunferencial 0° experimentais.....	96
Figura 85: Tensões circunferencial e circunferencial 90° experimentais.....	97
Figura 86: Tensões longitudinal e circunferencial 0° pelo MEF.....	99
Figura 87: Tensões circunferencial e circunferencial 90° pelo MEF .....	99
Figura 88: Vista externa do costado.....	100
Figura 89: Corte com vista interna do costado .....	101

Figura 90: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do costado.....	102
Figura 91: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície interna do costado.....	102
Figura 92: Vista externa do tampo superior.....	103
Figura 93: Vista interna do tampo superior.....	104
Figura 94: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do tampo .....	105
Figura 95: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do tampo .....	105
Figura 96: Vista externa do vaso de pressão .....	106
Figura 97: Vista interna do vaso de pressão .....	106
Figura 98: Detalhe da região com o maior valor da tensão principal máxima do vaso de pressão .....	107
Figura 99: Visão geral do vaso de pressão .....	107
Figura 100: Tensão longitudinal consolidada no costado.....	109
Figura 101: Tensão circunferencial consolidada no costado.....	109
Figura 102: Tensão circunferencial 0° consolidada no tampo superior .....	111
Figura 103: Tensão circunferencial 90° consolidada no tampo superior .....	112
Figura 104: Tensão circunferencial 0° consolidada na intersecção.....	114
Figura 105: Tensão circunferencial 90° consolidada na intersecção.....	114
Figura 106: Linearização da tensão circunferencial no ponto específico do costado .....	120
Figura 107: Variação da tensão circunferencial de membrana e membrana + flexão no costado .....	120
Figura 108: Comparativo da tensão longitudinal de membrana no costado.....	124
Figura 109: Comparativo da tensão circunferencial de membrana no costado... ..	124
Figura 110: Comparativo da tensão circunferencial 0° de membrana no tampo superior .....	125
Figura 111: Comparativo da tensão circunferencial 90° de membrana no tampo superior .....	125
Figura 112: Comparativo da tensão longitudinal para o costado.....	128
Figura 113: Comparativo da tensão circunferencial para o costado.....	128
Figura 114: Comparativo da tensão circunferencial 0° no tampo superior .....	130
Figura 115: Comparativo da tensão circunferencial 90° no tampo superior .....	130
Figura 116: Comparativo da tensão circunferencial 0° na intersecção.....	132
Figura 117: Comparativo da tensão circunferencial 90° na intersecção.....	132
Figura 118: Linearização da tensão equivalente de von-Mises no ponto específico do costado.....	134
Figura 119: Tensão de membrana e de membrana + flexão no ponto específico do costado.....	135
Figura 120: Tensão de flexão no ponto específico do costado .....	135
Figura 121: Linearização da tensão equivalente de von-Mises no ponto específico do tampo superior .....	136
Figura 122: Tensão de membrana e de membrana + flexão no ponto específico do tampo superior .....	137
Figura 123: Tensão de flexão no ponto específico do tampo superior .....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Informações básicas do vaso de pressão .....	59
Tabela 2: Deformações no ponto específico do tampo superior .....	65
Tabela 3: Deformações no ponto específico do costado .....	66
Tabela 4: Deformações no ponto específico da intersecção .....	66
Tabela 5: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior .....	91
Tabela 6: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado .....	91
Tabela 7: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior .....	93
Tabela 8: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado .....	93
Tabela 9: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior .....	95
Tabela 10: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado .....	95
Tabela 11: Tensões circunferenciais 0° e 90° para a intersecção .....	96
Tabela 12: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior .....	98
Tabela 13: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado .....	98
Tabela 14: Tensões circunferenciais 0° e 90° para a intersecção .....	98
Tabela 15: Tensões consolidadas no costado .....	108
Tabela 16: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica no costado .....	109
Tabela 17: Tensões consolidadas no tampo superior .....	110
Tabela 18: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica no tampo superior .....	111
Tabela 19: Tensões consolidadas na intersecção .....	113
Tabela 20: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica na intersecção .....	114
Tabela 21: Tensões de von-Mises consolidadas no costado .....	116
Tabela 22: Tensões de von-Mises consolidadas no tampo superior .....	117
Tabela 23: Tensões de von-Mises consolidadas na intersecção .....	118
Tabela 24: Tensões circunferenciais 0° e 90° de membrana no tampo superior .....	121
Tabela 25: Tensões circunferencial e longitudinal de membrana no costado .....	121
Tabela 26: Comparativo da tensão de membrana no costado .....	122
Tabela 27: Comparativo da tensão de membrana no tampo superior .....	123
Tabela 28: Comparativo das tensões longitudinal e circunferencial no costado .....	127
Tabela 29: Comparativo das tensões circunferenciais 0° e 90° no tampo superior .....	129
Tabela 30: Comparativo da tensão na intersecção .....	131

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Exemplos de normas para vaso de pressão no mundo.....	40
Quadro 2: Características dos fluidos da classe A .....	41
Quadro 3: Divisão do código ASME seção VIII .....	41
Quadro 4: Principais características entre as divisões do código ASME seção VIII .....	42

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Contextualização e motivação .....	16
1.2	Hipótese.....	18
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Objetivo geral.....	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
1.4	Relevância .....	19
1.5	Metodologia .....	19
1.6	Delimitações .....	20
1.7	Estrutura do trabalho .....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1	Vasos de pressão .....	22
2.2	Adsorvedor de peneira molecular .....	26
2.3	Teoria de membrana (ou paredes finas).....	28
2.4	Extensometria.....	34
2.5	Normas e códigos de projeto .....	39
2.5.1	Norma Regulamentadora NR13 .....	40
2.5.2	ASME.....	41
2.6	Teste hidrostático.....	45
2.7	Método dos elementos finitos (MEF) .....	47
2.8	Estado da arte.....	50
3	METODOLOGIA.....	58
3.1	Teste hidrostático.....	58
3.1.1	Informações do equipamento .....	58
3.1.2	Realização do teste hidrostático e coleta dos dados .....	59
3.2	Cálculo das tensões experimentais .....	67
3.3	Cálculos teóricos.....	67
3.3.1	Cálculo das tensões por meio da teoria de membrana.....	68
3.3.2	Cálculo das tensões por meio das formulações do código ASME .....	68
3.4	Análise numérica .....	69
3.4.1	Modelagem do vaso de pressão.....	69
3.4.2	Condições de contorno .....	77
3.4.3	Linearização da tensão.....	82
3.4.4	Geração da malha .....	84
3.4.5	Localização dos três pontos específicos no modelo.....	86

3.4.6	Obtenção das tensões longitudinal e circunferencial .....	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
4.1	Análises individuais.....	90
4.1.1	Teoria de membrana.....	90
4.1.2	Formulações do código ASME .....	93
4.1.3	Análise experimental.....	95
4.1.4	Método dos elementos finitos no <i>software</i> ANSYS.....	97
4.2	Consolidação dos resultados das quatro análises .....	107
4.2.1	Consolidação das tensões longitudinal e circunferencial.....	108
4.2.2	Consolidado da tensão de von-Mises.....	115
4.3	Validação do método dos elementos finitos em relação à teoria .....	119
4.3.1	Linearização da tensão.....	119
4.3.2	Comparação do método dos elementos finitos com a teoria de membrana.....	121
4.4	Comparação da análise experimental com o método dos elementos finitos.....	126
4.4.1	Costado .....	126
4.4.2	Tampo superior.....	128
4.4.3	Intersecção do tampo superior com a conexão .....	130
4.5	Tensões admissíveis do ASME na pressão do teste hidrostático.....	133
4.5.1	Costado .....	134
4.5.2	Tampo superior.....	136
5	CONCLUSÃO .....	139
	REFERÊNCIAS.....	141



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e motivação

Segundo Telles (2012), o nome vaso de pressão refere-se genericamente à recipientes estanques de qualquer tipo, dimensão, formato ou finalidade, com a capacidade de armazenar um fluido pressurizado, seja gás ou líquido. Desde uma simples panela de pressão até reatores nucleares complexos se enquadram nessa definição.

Um vaso de pressão é composto basicamente pelo casco e pelos tampos de fechamento, ambos com formatos de superfícies de revolução (cilíndrica, esférica, elíptica e cônica mais comuns), pelas aberturas para instalação de bocais para conexão com a tubulação e por suportes para sustentação do equipamento. Dependendo da posição de instalação os vasos de pressão podem ser caracterizados como vertical, horizontal e inclinado.

São equipamentos muito utilizados em plantas industriais de diversos segmentos, como petroquímico, alimentício, farmacêutico, nuclear, químico, açúcar e álcool, geralmente fabricados em aço, sendo o processo de soldagem utilizado para a união das partes. Os tipos mais comuns são torres de processo, caldeiras, reatores, tanques e tubulações.

Como exemplo, na Figura 1 pode-se visualizar um vaso de pressão padrão, formado pelo costado, tampos, bocais e suportes. A definição do formato do equipamento depende de sua aplicação dentro do processo industrial no qual está inserido.

Figura 1: Vaso de pressão padrão



Fonte: <http://fitzerincorporation.com/pressure-vessel.html>

Segundo Krüger (2014), estes equipamentos operam com variações de pressão (pressão interna maior que a pressão atmosférica), armazenando uma grande quantidade de energia no seu interior proporcional à pressão de operação, que pode ser liberada em caso de alguma falha no equipamento, causando explosão e/ou vazamento de produtos inflamáveis ou tóxicos.

As razões para as falhas dos vasos de pressão são: projeto inadequado, aplicação incorreta, fabricação, instalação, manutenção, reparação e operação. (DUBAL e KADAM, 2017)

Normas ou códigos de projeto foram criados para estabelecer padrões, regras e recomendações para a elaboração de projetos, construção, inspeção, montagem e manutenção de vasos de pressão, visando a integridade estrutural destes equipamentos. O código ASME teve sua primeira edição lançada após um trágico acidente com vaso de pressão em uma fábrica na cidade de Massachusetts no ano de 1905, com 58 mortes e 117 feridos.

Como consequência das variações de pressão e temperatura durante a operação do vaso de pressão, tensões e deformações são geradas em toda a parede do vaso de pressão, porém em algumas regiões da parede existem descontinuidades geométricas que as tornam mais críticas em relação à outras regiões.

De acordo com Kharat e Kulkarni (2013), as aberturas nas paredes dos vasos de pressão são necessárias, e estas aberturas geram descontinuidades geométricas que alteram a distribuição das tensões na vizinhança da descontinuidade, com os valores das tensões divergindo das equações da teoria clássica.

Conforme Gonçalves (2016), as descontinuidades geométricas como mudança de formato, desalinhamento em juntas ou diferença entre espessuras da parede alteram a distribuição de tensões nas regiões de transição.

A análise das tensões em vasos de pressão é fundamental para que os pontos com tensões mais elevadas sejam identificados e que estas tensões estejam abaixo dos valores admissíveis de projeto, garantindo assim o pleno funcionamento do equipamento com segurança.

Os vasos de pressão falham quando o estado de tensão em algum ponto da parede excede algum critério de falha. (JEGATHEESAN, ZAKARIA, 2018)

As tensões em um vaso de pressão podem ser analisadas de uma maneira geral por intermédio das análises teórica, experimental e numérica, sendo possível encontrar na literatura diversos trabalhos. Para este trabalho, a análise teórica terá duas opções de análise: teoria de membrana (ou paredes finas) e formulações do código ASME seção VIII divisão 2. A análise numérica será pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS versão estudante e a análise experimental será com o auxílio da extensometria elétrica de resistência durante o teste hidrostático do equipamento.

## **1.2 Hipótese**

O comportamento das tensões nas paredes de um vaso de pressão em regiões de descontinuidade geométrica, que neste caso é a intersecção do tampo superior com a conexão, é diferente do comportamento das tensões em regiões distantes de descontinuidade geométrica por conta das tensões de flexão, o que pode gerar pontos suscetíveis a falhas do vaso de pressão.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento das tensões atuantes em três pontos específicos da parede de um vaso de pressão, sendo dois pontos distantes de descontinuidade geométrica (um no costado e um no tampo superior) e um ponto próximo de descontinuidade geométrica (na intersecção do tampo superior com conexão), por intermédio da análise teórica pela teoria de membrana e formulações do código ASME seção VIII divisão 2, da análise numérica pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS versão estudante e da análise experimental obtidas no teste hidrostático do equipamento com o auxílio da extensometria elétrica de resistência.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- verificar a existência das tensões de flexão geradas por descontinuidades geométricas;
- comparação de várias análises e suas correlações;

- demonstração da confiabilidade em modelos computacionais para análise de tensões em vasos de pressão.

#### **1.4 Relevância**

A análise de tensão em vasos de pressão, por si só, é um assunto relevante, tendo em vista diversos trabalhos que são encontrados na literatura. A relevância se dá pelo fato de vasos de pressão serem equipamentos amplamente utilizados em diversas indústrias, e que qualquer falha pode causar acidentes de grandes proporções. Por isso, identificar os pontos mais críticos, nos quais as tensões são mais elevadas e acima das tensões admissíveis, nos permite obter equipamentos mais seguros, confiáveis e economicamente mais viáveis.

Pode-se mencionar duas situações que acrescentam relevância a este trabalho: a localização do equipamento e a realização da análise experimental.

O equipamento alvo deste trabalho faz parte de um sistema de desidratação de gás instalado em uma plataforma marítima, a qual se tem acesso somente por barco ou helicóptero. Assim, qualquer falha que necessite de reparo em fábrica ou substituição do equipamento após o mesmo ser instalado seria altamente custoso devido ao acesso restrito.

Muitos trabalhos encontrados na literatura analisam as tensões em vasos de pressão projetados com base em normas ou códigos de projeto, principalmente o código ASME, por intermédio da análise numérica pelo método dos elementos finitos, e por isso a realização da análise experimental acrescenta relevância a este trabalho. A análise experimental foi realizada com o teste hidrostático do equipamento após sua fabricação, o qual foi submetido ao dobro de sua pressão normal de operação.

#### **1.5 Metodologia**

A metodologia utilizada para alcançar os objetivos inicia com a realização da medição das deformações atuantes em três pontos específicos (costado, tampo superior e intersecção do tampo superior com conexão) da parede externa do vaso de pressão com o auxílio da extensometria elétrica de resistência durante o teste hidrostático do equipamento, no qual a pressão interna foi variada em um intervalo especificado pelo procedimento de inspeção e teste do equipamento. Para este intervalo de variação da pressão interna, o valor da deformação experimental foi

obtido com auxílio dos extensômetros instrumentados nos três pontos específicos, e posteriormente, calculado o valor da tensão correspondente com a utilização de equações que se baseiam na relação tensão e deformação.

De acordo com a teoria de membrana e formulações do código ASME, nas quais o vaso de pressão deste trabalho se enquadra, calculou-se para cada pressão considerada no ensaio experimental as tensões teóricas correspondentes em cada um dos três pontos específicos.

Construiu-se um modelo computacional no *software* ANSYS do vaso de pressão deste trabalho, e neste modelo foram inseridas as condições de contorno para melhor representação do ensaio experimental. Recorrendo a esse modelo, foram obtidas as tensões atuantes pela análise numérica com o método dos elementos finitos (MEF) no *software* ANSYS versão estudante para cada um dos três pontos específicos em cada pressão considerada no ensaio experimental.

De posse de todos os valores de tensão obtidos nas quatro análises (teoria de membrana, formulações do código ASME, numérica e experimental), esses valores foram organizados em tabelas e gráficos, possibilitando a análise do comportamento das tensões.

## **1.6 Delimitações**

O objetivo do trabalho é analisar o comportamento das tensões em três pontos distintos da parede do vaso de pressão: costado, tampo superior e intersecção do tampo superior com a conexão. Não foram analisadas as demais regiões com descontinuidades geométricas, como a intersecção dos tampos com o costado, do costado com o costado e a intersecção das demais conexões.

A análise das tensões limitou-se somente à fase de pressurização do teste hidrostático, não levando em conta a despressurização.

A intersecção da conexão com o tampo superior analisada não contém chapa de reforço.

O estudo das tensões foi realizado em um vaso de pressão de parede fina de acordo com a relação  $r/t > 10$ , onde  $r$  é o raio interno e  $t$  é a espessura.

Durante o teste hidrostático não há carregamentos além da pressão interna e o peso próprio do equipamento e da água.

Houve limitação no número de nós no valor de 32 mil, devido à versão estudante do *software* ANSYS.

O modelo computacional gerado para análise numérica não representa o vaso de pressão completo, e sim os componentes mais importantes.

### **1.7 Estrutura do trabalho**

O conteúdo desse trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 02: Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo foram abordadas literaturas relacionadas ao tema, como a teoria de membrana para vaso de pressão, formulações do código ASME, análise e categorização das tensões atuantes, extensometria elétrica de resistência, introdução ao método dos elementos finitos e definições sobre teste hidrostático.

Também foi apresentada uma revisão dos principais trabalhos encontrados na literatura relacionados a este trabalho.

- **Capítulo 03: Metodologia**

Neste capítulo foram detalhados os métodos para a realização do teste hidrostático no vaso de pressão e obtenção das deformações e tensões, as formulações utilizadas para cálculo das tensões teóricas pela teoria de membrana e formulações do código ASME e as considerações adotadas na construção do modelo computacional no *software* ANSYS para obtenção das tensões por meio da análise numérica pelo método dos elementos finitos.

- **Capítulo 04: Resultados e discussão**

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados para as tensões obtidas nos três pontos específicos do vaso de pressão por meio das análises da teoria de membrana, formulações do código ASME, experimental e numérica pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS.

- **Capítulo 05: Conclusão**

Neste capítulo foram expostas as conclusões com base no capítulo anterior e a correlação com o objetivo do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Vasos de pressão

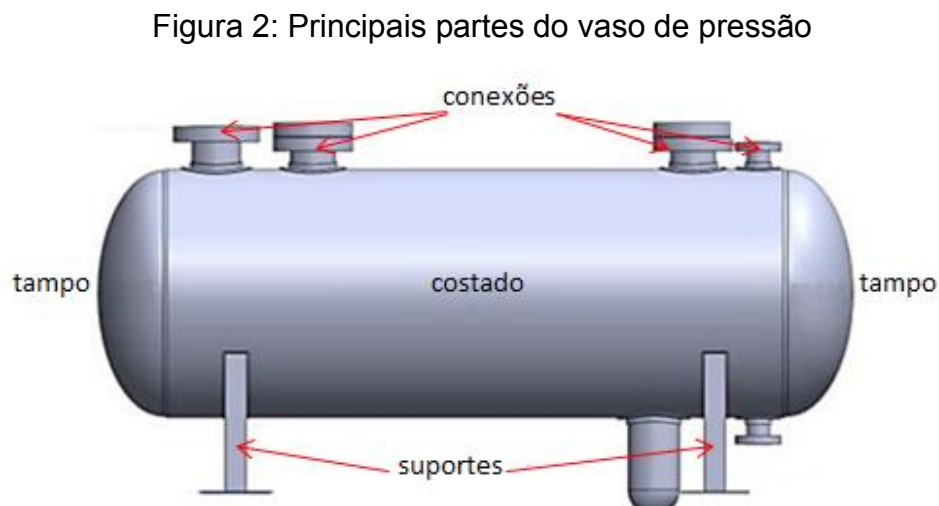
Vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica. (NR-13)

São amplamente utilizados em diversos tipos de indústrias, como petroquímicas, alimentícias, químicas, farmacêuticas, siderúrgicas, açúcar e álcool, entre outras, podendo ter a função de armazenamento, acumulação intermediária ou de processamento, e podem ser fabricados em aço carbono, aço inoxidável, alumínio, materiais compostos, bronze, ferro fundido, entre outros. Operam com grandes variações de temperatura e pressão dependendo da sua finalidade dentro do processo industrial.

Conforme Telles (2012), de acordo com a aplicação, os vasos de pressão são classificados da seguinte forma:

- vasos sujeitos à chamas: incluem as caldeiras e os fornos
- vasos não sujeitos à chama: vasos de armazenamento e de acumulação, torres de destilação fracionada, retificação e absorção, reatores diversos, esferas de armazenamento de gases e trocadores de calor, incluindo trocadores propriamente ditos, aquecedores, resfriadores, condensadores, refeedores e resfriadores a ar.

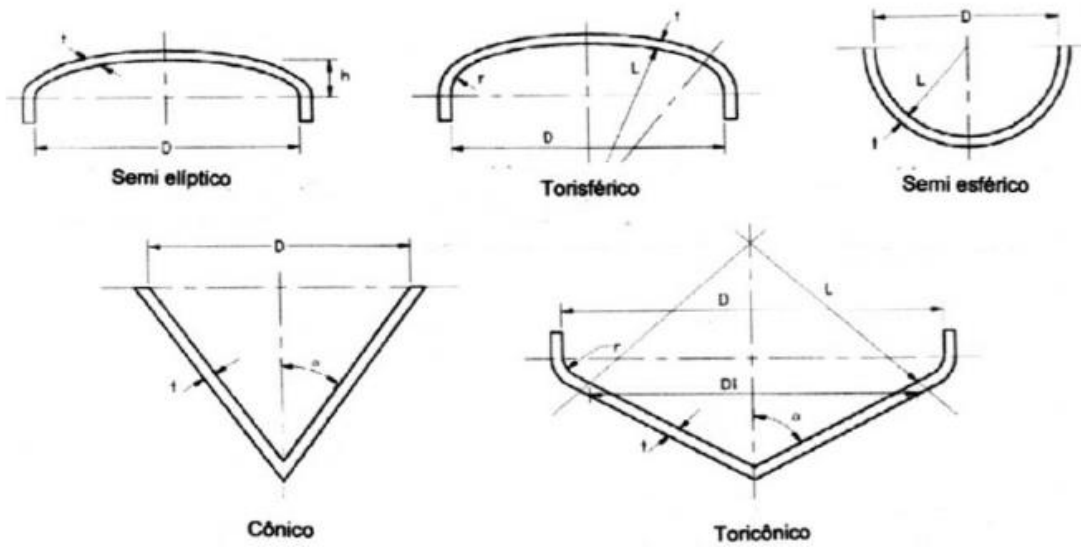
Os vasos de pressão são equipamentos compostos basicamente por quatro partes: tampos, costado ou corpo, suporte e conexão ou bocal, como se observa na Figura 2.



Fonte: adaptado de Silva (2015)

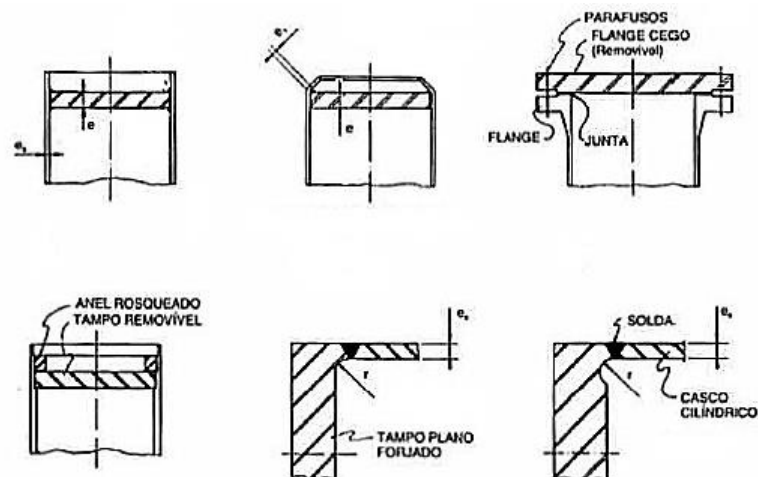
Cada parte do vaso de pressão pode ter vários formatos e funções, que variam de acordo com o projeto e a aplicação do equipamento dentro do processo industrial. Os tampos podem ter formatos semielíptico, torisférico, semiesférico, cônico, toricônico e plano, como ilustrado nas Figuras 3 e 4.

Figura 3: Alguns formatos de tampos



Fonte: Telles (2001)

Figura 4: Tipos de tampos planos



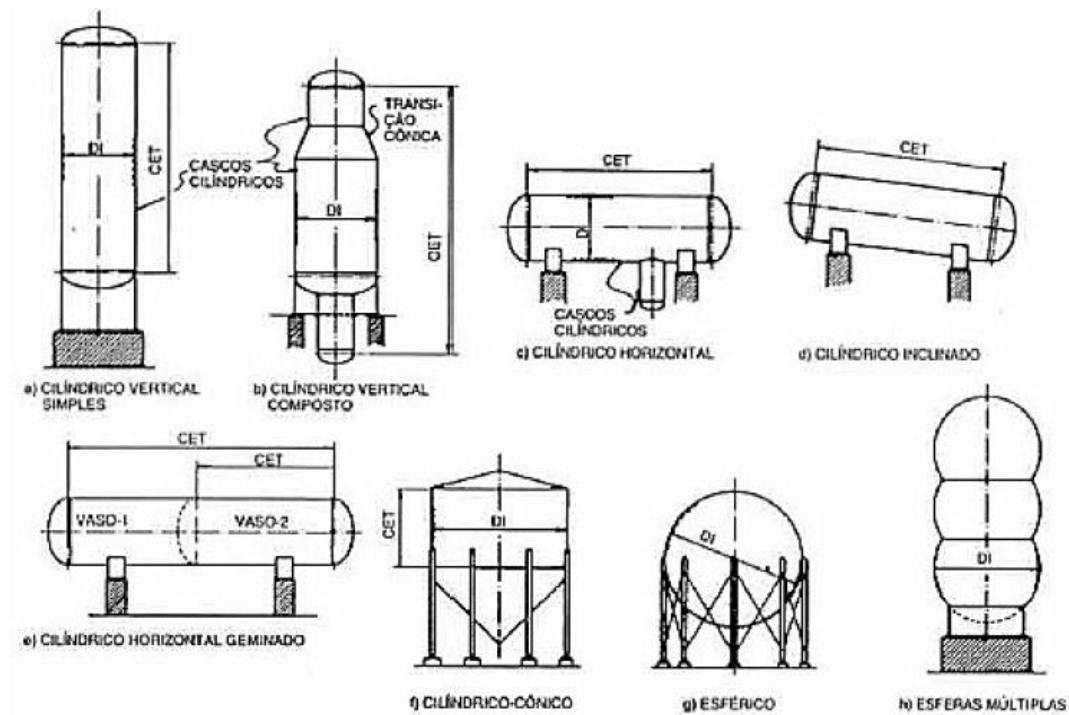
Fonte: Telles (2001)

De acordo com Lawate (2015), os tampos semiesféricos suportam cerca de duas vezes mais pressão que os tampos elípticos e torisféricos para uma mesma espessura, porém o custo de fabricação é uma desvantagem.



Os vasos de pressão podem ser dispostos na horizontal, vertical e inclinado, com costados que variam a geometria entre esférica, cilíndrica, cônica ou combinação destas, conforme mostrado na Figura 5. Os vasos horizontais são mais comuns e geralmente utilizados como trocadores e calor e vasos de acumulação, enquanto os vasos verticais são usados quando se necessita da ação da gravidade, como em torres de resfriamento ou reatores.

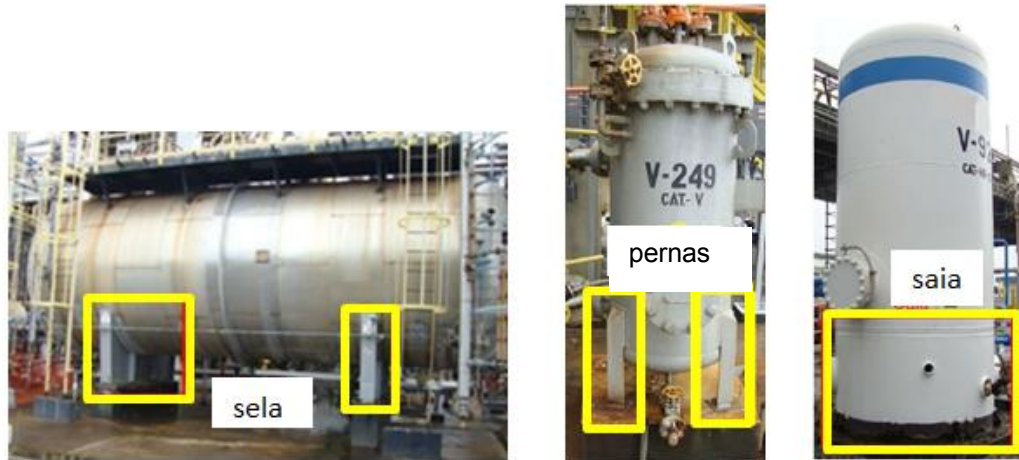
Figura 5: Disposição dos vasos de pressão



Fonte: Telles (2001)

Os suportes têm vários formatos, que no geral podem ser do tipo saia, berço ou sela e perna, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Formatos dos suportes



Fonte: adaptado de Krüger (2014)

Os bocais são aberturas nas paredes do vaso de pressão responsáveis pela interligação do equipamento com as tubulações de entrada e saída e com acessórios (manômetros, válvulas, drenos, etc). As bocas de visita e de inspeção também são alguns tipos de bocais encontrados em vasos de pressão. A Figura 7 mostra um vaso de pressão com a tubulação ligada à conexão.

Figura 7: Tubulação ligada à conexão



Fonte: <https://endteste.com.br/inspecao-nr-13/>

De modo geral, os vasos de pressão são fabricados em aço e o processo mais comum de união das partes do vaso de pressão é o processo de soldagem.

## **2.2 Adsorvedor de peneira molecular**

O vaso de pressão deste trabalho é um equipamento chamado de adsorvedor de peneira molecular, que faz parte de um sistema de desidratação de gás natural utilizado em plataformas de petróleo offshore.

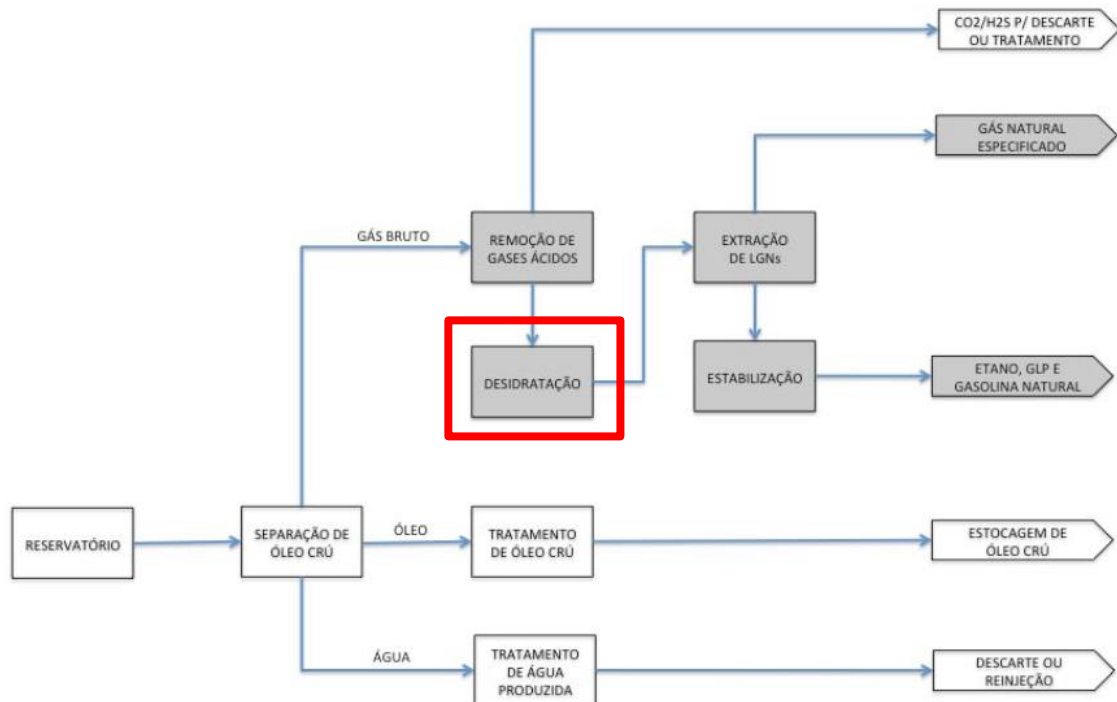
De acordo com a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), o gás natural é todo hidrocarboneto que permanece em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gaseíferos, cuja composição poderá conter gases úmidos, secos e residuais. Destina-se a diversos setores de consumo com fins energéticos e não energéticos, como geração de energia, matéria-prima em indústrias petroquímicas e de fertilizantes.

Segundo Pantoja (2009), o gás natural é composto por diversos hidrocarbonetos e outros compostos químicos, que normalmente são considerados impurezas, como por exemplo, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, além do gás bruto que vem normalmente saturado com vapor d'água de seus reservatórios de origem.

É necessário adequar o gás natural às especificações de órgãos competentes para sua distribuição por meio de tratamentos que visam reduzir o teor de água, de dióxido de carbono, de sulfeto de hidrogênio e de hidrocarbonetos mais pesados do que o metano.

Na Figura 8 observa-se as principais etapas do processo de produção de gás natural, e em destaque o processo de desidratação do gás.

Figura 8: Etapas da extração e tratamento de gás natural



Fonte: adaptado de Pantoja (2009)

De acordo com Gomes et al (2007), a combinação das moléculas de água com moléculas de hidrocarbonetos propicia a formação de meio corrosivo e hidratos, sendo estes compostos cristalinos que bloqueiam linhas, válvulas e equipamentos das Unidades de Tratamento de Gás (UTG).

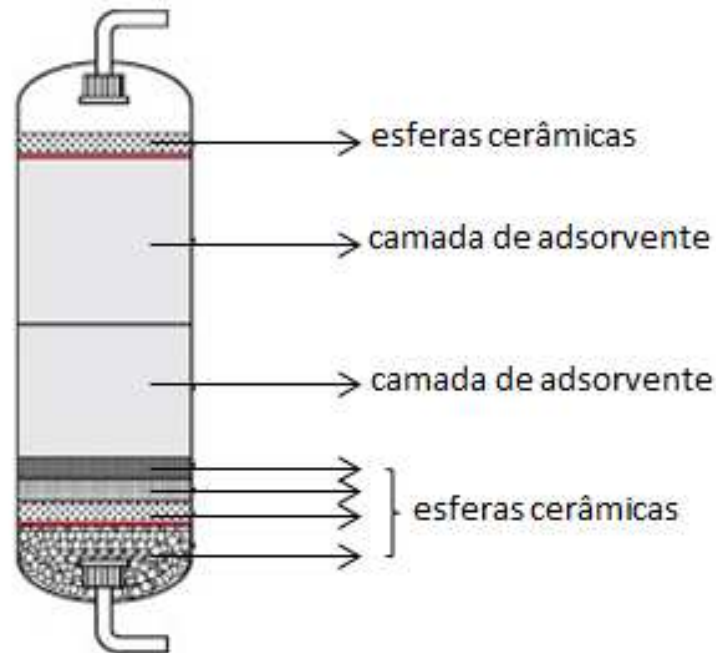
Os processos convencionais utilizados para desidratação são absorção química (trietilenoglicol, TEG), adsorção em leito sólido (peneiras moleculares, sílica gel ou alumina) e condensação. (MACHADO, 2012).

Adsorção em geral é uma operação de transferência de massa do tipo sólido-fluido na qual se explora a habilidade de sólidos em concentrar em sua superfície determinadas substâncias existentes em soluções líquidas ou gasosas, permitindo sua separação (GOMIDE, 1988).

Segundo Pantoja (2009), a água contida no gás bruto adere a uma fase sólida, que no caso é a peneira molecular.

As peneiras moleculares são fabricadas com materiais micro porosos, que aumentam a superfície de contato, proporcionando uma maior adsorção. Na Figura 9 observa-se um esquema genérico de um vaso de pressão com adsorção por peneira molecular.

Figura 9: Vaso de pressão genérico com peneira molecular para adsorção



Fonte: <http://www.gasprocessingnews.com/features/201710/optimal-design-and-operation-of-molecular-sieves-for-gas-dehydration%E2%80%94part-2.aspx>

Segundo Ambrósio (2014), o gás úmido entra pela parte superior, percorre um caminho descendente passando por diversas camadas de adsorventes, e sai pela parte inferior desidratado.

### 2.3 Teoria de membrana (ou paredes finas)

Dentro da classificação dos vasos de pressão, alguns vasos são classificados como vasos de parede fina e outros de parede grossa.

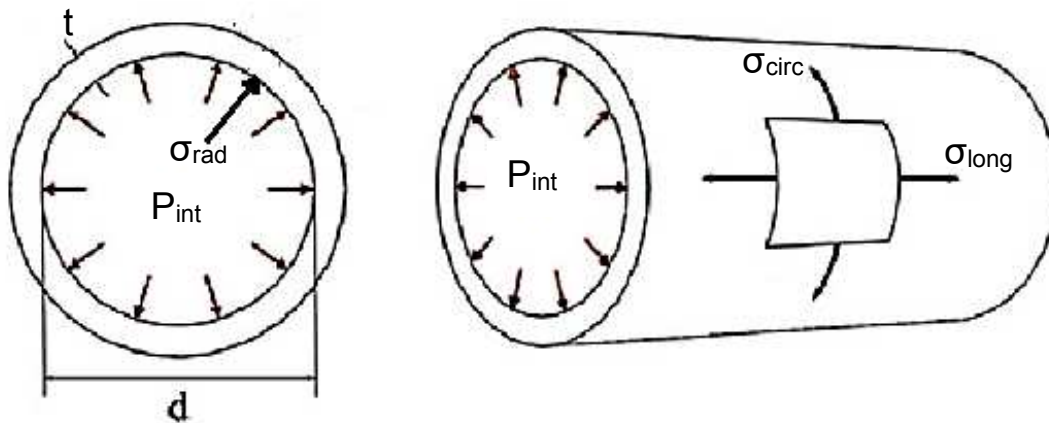
De acordo com Timoshenko (1977), quando a relação entre espessura  $t$  e raio interno  $r$  é menor que 10%, o dispositivo é caracterizado como um vaso de pressão de paredes finas.

Para o vaso de pressão deste trabalho, aplicando a relação  $t/r$  para os tampos e costado, o resultado é inferior a 10%, sendo o valor para o costado de 7,33% (99 dividido por 1350) e para os tampos de 3,68% (50 dividido por 1357). Portanto o vaso de pressão deste trabalho se enquadra na classificação de parede fina.

Nas paredes dos vasos de pressão sob pressão interna, surgem tensões em três direções chamadas de circunferencial ( $\sigma_{\text{circ}}$ ), longitudinal ( $\sigma_{\text{long}}$ ) e radial ( $\sigma_{\text{rad}}$ ), conforme Figura 10. A tensão radial varia de um valor igual a pressão interna na

superfície interna até o valor zero na superfície externa da parede do vaso de pressão, e no caso deste ser de paredes finas, a tensão radial é desprezada por ter valor muito menor que as demais tensões, em torno de 5 a 10 vezes comparada com as tensões circunferencial e longitudinal.

Figura 10: Tensões atuantes na parede de um vaso de pressão



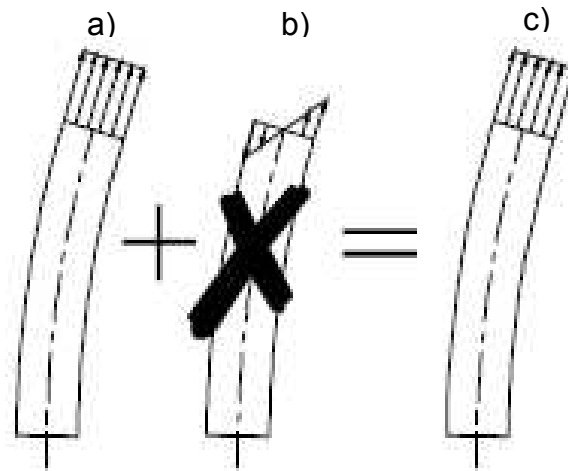
Fonte: adaptado de [https://www.researchgate.net/figure/A-Radial-stress-s-R-Longitudinal-stress-s-L-and-circumferential-stress-s-th-B\\_fig5\\_326812168](https://www.researchgate.net/figure/A-Radial-stress-s-R-Longitudinal-stress-s-L-and-circumferential-stress-s-th-B_fig5_326812168)

As tensões longitudinal e circunferencial, que atuam tangencialmente à superfície da parede do vaso de pressão, são chamadas de tensões de membrana, com valores constantes ao longo da espessura da parede do vaso de pressão. Considerando um estado plano de tensões, as tensões longitudinal e circunferencial são as tensões principais mínima e máxima respectivamente.

Ao longo da espessura da parede de um vaso de pressão, a tensão pode ser decomposta em tensão de membrana, que tem valor constante, e tensão de flexão, que tem valor variável.

A Figura 11 ilustra a composição da tensão ao longo da parede fina de um vaso de pressão, na qual a tensão de flexão é desconsiderada.

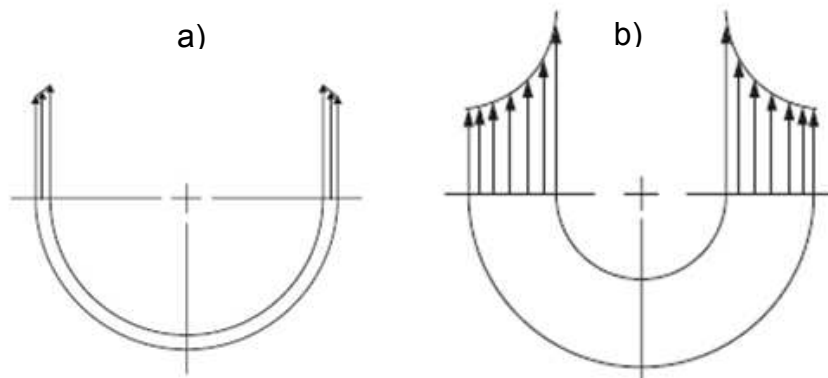
Figura 11: Tensões a) membrana b) flexão c) total



Fonte: <https://www.ufrgs.br/gmap/www-gmap.mecanica.ufrgs.br/html/sumulas/mec098/download/membrana.pdf>

A Figura 12 ilustra que em paredes finas a variação da tensão ao longo da espessura é muito menor que em paredes grossas, motivo pelo qual se considera como uniforme.

Figura 12: Variação da tensão a) em parede fina b) em parede grossa

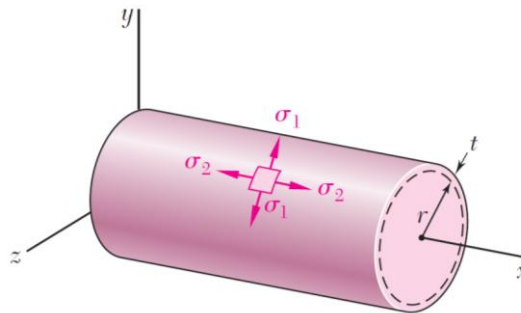


Fonte: <https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780750677400/9780750677400.PDF>

Como o vaso de pressão objeto deste trabalho é composto por costado cilíndrico e tampos esféricos, foram apresentadas as equações teóricas para cálculo das tensões atuantes no cilindro e na esfera devido à pressão interna.

Na Figura 13 tem-se um vaso de pressão cilíndrico fechado nas extremidades com raio interno  $r$ , espessura  $t$  e submetido a uma determinada pressão interna  $p$  que é maior que a pressão externa. Devido à pressão interna surgem tensões na parede do cilindro, chamadas de tensão circunferencial  $\sigma_1$  e tensão longitudinal  $\sigma_2$ .

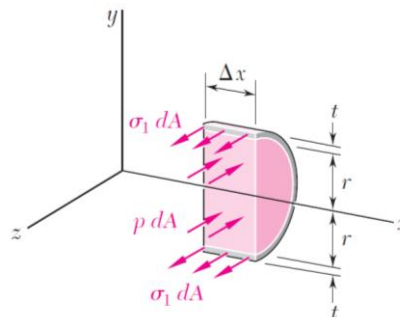
Figura 13: Tensões em vaso de pressão cilíndrico



Fonte: Beer & Johnston (2011)

Para análise das tensões foram estudadas seções da parede do vaso de pressão cilíndrico. Na Figura 14, mediante o somatório das forças na direção z em situação de equilíbrio, obtém-se a equação 1.

Figura 14: Seção longitudinal e transversal do vaso de pressão cilíndrico



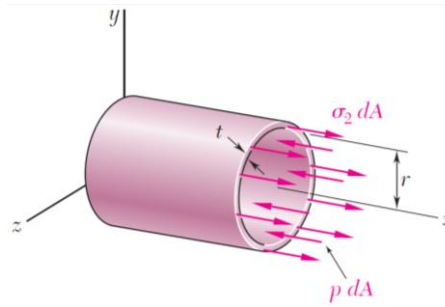
Fonte: Beer & Johnston (2011)

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{circunferencial}} = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

Na Figura 15, mediante o somatório das forças na direção x em situação de equilíbrio, obtém-se a equação 2.



Figura 15: Seção transversal do vaso de pressão cilíndrico

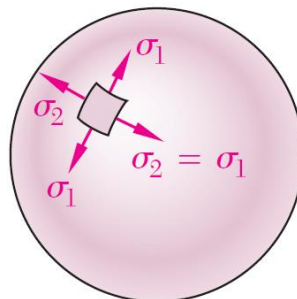


Fonte: Beer (2011)

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{longitudinal}} = \frac{pr}{2t} \quad (2)$$

Na Figura 16 tem-se um vaso de pressão esférico com raio interno  $r$ , espessura  $t$  e submetido a uma determinada pressão interna  $p$  que é maior que a pressão externa. Devido à pressão interna surgem tensões na parede da esfera, chamadas de tensões circunferenciais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ .

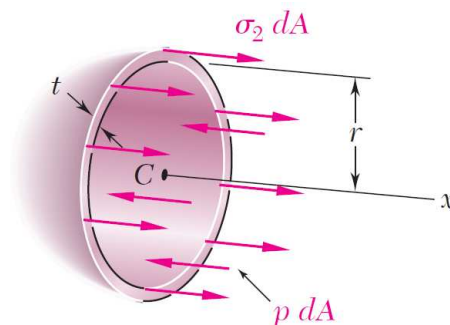
Figura 16: Tensões em vaso de pressão esférico



Fonte: Beer (2011)

Para analisar melhor as tensões, foi estudada uma seção da parede do vaso de pressão esférico, conforme Figura 17, que mediante o somatório das forças na direção  $x$  em situação de equilíbrio, obtém-se a equação 3.

Figura 17: Seção do vaso de pressão esférico



Fonte: Beer (2011)

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{\text{circunferencial}} = \frac{pr}{2t} \quad (3)$$

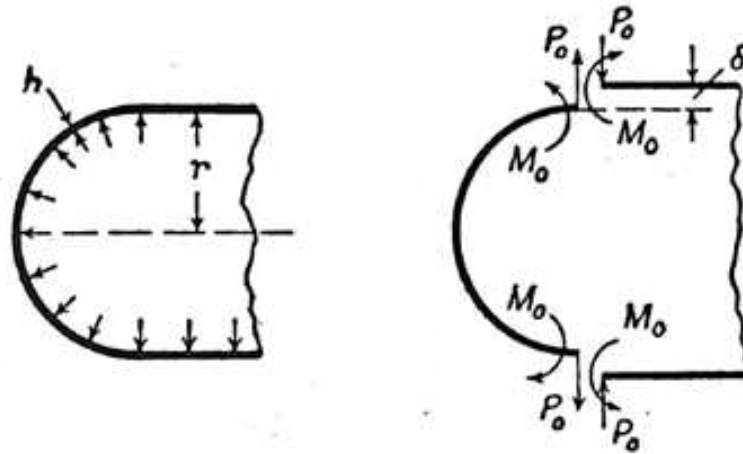
Nas paredes dos vasos de pressão são encontradas descontinuidades geométricas, que consistem em variações de espessura, aberturas para acessórios, transição de formatos, desalinhamentos e junções de partes do vaso, como por exemplo, costado com tampo ou tampo com conexão.

Com a aplicação de um carregamento no vaso de pressão, por exemplo, pressão interna, o vaso de pressão como um todo se deforma, porém, nas regiões de descontinuidade geométrica, elementos adjacentes se deformam de maneiras diferentes, mesmo estes formando uma estrutura contínua.

De acordo com Timoshenko (1977), existem momentos fletores na região de transição das duas geometrias, originando assim tensões de flexão.

Considerando a junção do tampo com o costado de um vaso de pressão genérico, submetido à pressão interna, conforme Figura 18, cada elemento, tampo e costado, tende a se deslocar de maneira diferente, gerando forças e momentos na junção que causam as tensões de flexão.

Figura 18: Tensões de flexão na junção costado e tampo



Fonte: Timoshenko (1977)

O efeito da flexão intensifica as tensões nas regiões próximas de descontinuidades geométricas, por isso são regiões com maior probabilidade de falhas. As equações teóricas definidas pela teoria de membrana apresentam limitações na sua aplicação em regiões do vaso de pressão com descontinuidades geométricas, por causa das tensões de flexão.

#### 2.4 Extensometria

De acordo com Dally e Riley (1978), extensometria é a metodologia utilizada para a medição experimental de deformações com o objetivo de obter as tensões atuantes em um determinado corpo.

Conforme Lara (2016), a medição experimental das deformações pode ser realizada com o auxílio de diversas técnicas, como relógio comparador, detector eletrônico de deslocamento, por camada frágil, por fotoelasticidade ou por extensômetros elétricos.

Neste trabalho a técnica utilizada para a medição experimental das deformações no vaso de pressão durante o teste hidrostático foi a extensometria elétrica de resistência, com a utilização de extensômetros (ou *strain gauges*) elétricos de resistência.

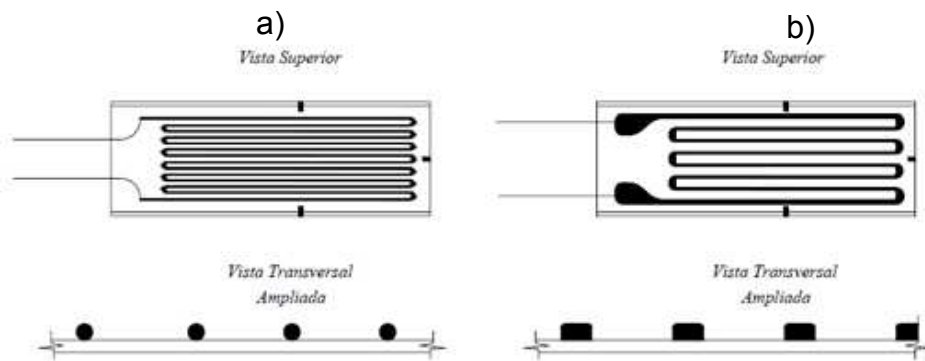
Segundo Hoffmann (2012), o princípio de funcionamento do extensômetro metálico é baseado na relação deformação / resistência de condutores elétricos, já que qualquer condutor elétrico altera sua resistência quando sofre deformação pela aplicação de esforços mecânicos.

Como exemplo, se um fio metálico é tracionado ou comprimido, este sofre uma deformação (variação no seu comprimento), alterando sua resistência elétrica.

Basicamente os extensômetros são constituídos de uma resistência elétrica tênue, com dois terminais, montados sobre um suporte, que serve como isolante, podendo ser constituído de papel ou de resina plástica, e coberto por uma capa de feltro ou de mesmo material do suporte. (MELO, 2014)

A resistência elétrica pode ser geralmente em forma de lâmina (*foil strain gauge*) ou de fio (*wire strain gauge*), como se observa na Figura 19.

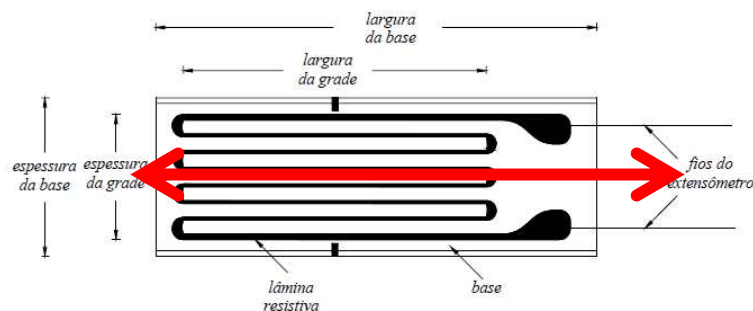
Figura 19: Formato da resistência elétrica do extensômetro a) de fio b) de lâmina



Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>

Os extensômetros medem a deformação de acordo com a orientação de sua grade, que pode ser uniaxial, biaxial, múltiplos eixos ou configuração especial. A Figura 20 ilustra um extensômetro com uma grade, e por isso, utilizado para medição de deformação uniaxial na direção da seta vermelha.

Figura 20: Características de um extensômetro



Fonte: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>

Para medição de deformações em várias direções, pode-se utilizar vários extensômetros uniaxiais ou o extensômetro roseta.

Um extensômetro roseta é um termo utilizado para uma disposição de dois ou mais extensômetros que são posicionados próximos para medir deformações ao longo de diferentes direções do componente que está sendo medido. A Figura 21 mostra um extensômetro roseta retangular que mede as deformações em três direções:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

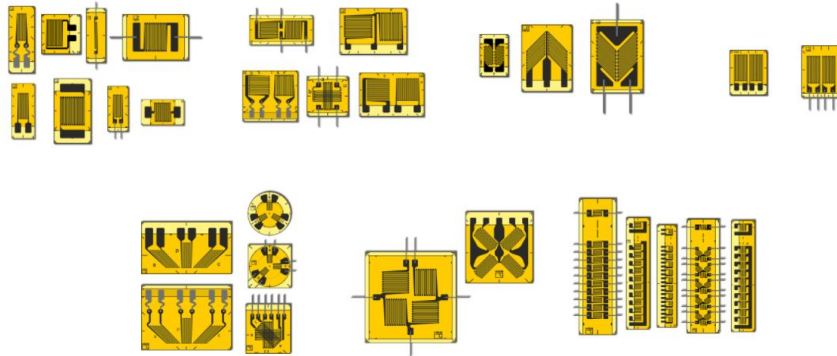
Figura 21: Extensômetro roseta retangular



Fonte: autor (2021)

Existem no mercado diversos tipos e formatos de extensômetros elétricos de resistência, que variam de acordo com o objetivo, por exemplo, medição de tensões normais, tensões de cisalhamento e tensões residuais, e com as condições da aplicação, por exemplo, baixas ou altas temperaturas, a prova d'água, medição estática ou dinâmica e curta ou longa duração. Na Figura 22 observam-se alguns dos diversos tipos de extensômetros elétricos de resistência disponíveis.

Figura 22: Variedades de extensômetros

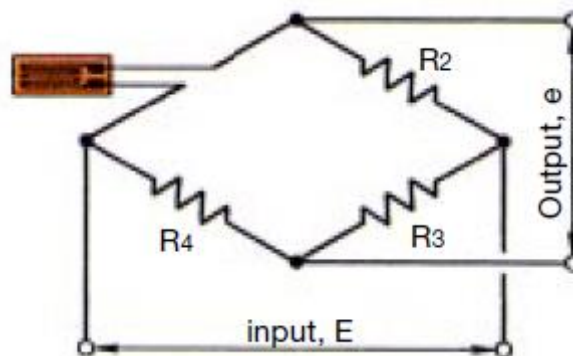


Fonte: <https://www.hbm.com/pt/0364/strain-gauge-para-analise-de-tensao/>

De acordo com Melo (2014), as variações de resistência dos extensômetros são muito pequenas, não sendo possível a medição com ohmímetro convencional, e por isso essas variações são medidas com o auxílio de um circuito elétrico chamado de Ponte de Wheatstone.

Na Figura 23 observa-se a configuração da Ponte de Wheatstone com ligação de  $\frac{1}{4}$  de ponte, a mesma configuração que foi utilizada neste trabalho, sendo que as demais resistências da ponte foram utilizadas a partir do condicionador de sinais. Além da ligação de  $\frac{1}{4}$  de ponte, existem as ligações de  $\frac{1}{2}$  ponte e ponte completa.

Figura 23: Ponte de Wheatstone com ligação de  $\frac{1}{4}$  de ponte

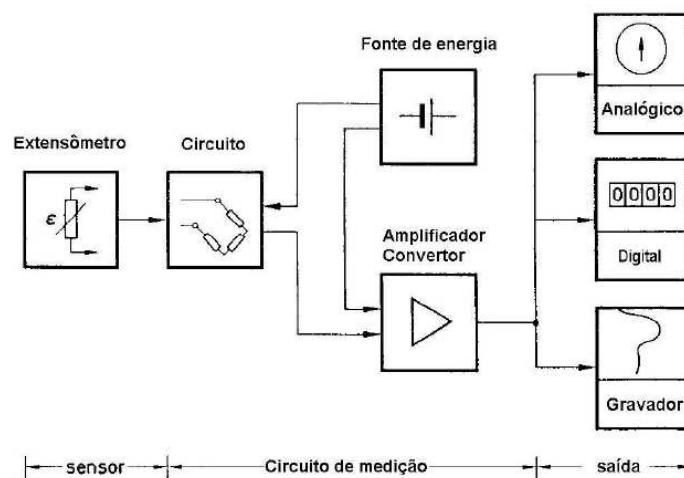


Fonte: adaptado de [http://catalogue.techno-test.com/products/4-Sensor\\_System\\_Solutions/223-Application\\_Note/555-Strain\\_Gage\\_Note-Application\\_Notes.pdf](http://catalogue.techno-test.com/products/4-Sensor_System_Solutions/223-Application_Note/555-Strain_Gage_Note-Application_Notes.pdf)

Segundo Motter (2015), os condicionadores de sinais fornecem a tensão de excitação da ponte de Wheatstone e ampliam o sinal recebido desta conforme os extensômetros se deformam, e adequam os sinais às características do equipamento de medição.

A Figura 24 ilustra o sistema de medição desde o extensômetro até a saída dos dados.

Figura 24: Diagrama do sistema de medição para medição de deformação por extensômetro



Fonte: <http://grante.ufsc.br/download/Extensometria/SG-Apostila.pdf>

Após a obtenção dos valores das deformações experimentais, são aplicadas fórmulas desenvolvidas para cada tipo de situação com o objetivo de converter a deformação em tensão. Neste trabalho foram utilizadas as relações entre tensão e deformação conforme equações 4 e 5 para roseta retangular desenvolvidas por Dally W.; Riley F. (1978) no tampo e no costado para cálculo das tensões principais máxima e mínima. Neste caso, por conta da ausência das tensões de cisalhamento, as tensões principais máxima e mínima para o costado (corpo cilíndrico) coincidem respectivamente com as tensões circunferencial e longitudinal. E para o tampo (corpo esférico), devido à simetria, as tensões principais máxima e mínima correspondem a uma única tensão principal circunferencial.

$$\sigma_1 = E \left[ \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_l}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_l)^2 + (2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_t - \varepsilon_l)^2} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E \left[ \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_l}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_l)^2 + (2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_t - \varepsilon_l)^2} \right] \quad (5)$$

onde:

$\sigma_1$  – tensão experimental principal máxima

$\sigma_2$  – tensão experimental principal mínima

E – módulo de elasticidade

$\nu$  – coeficiente de Poisson

$\varepsilon_t$  – deformação circunferencial experimental

$\varepsilon_l$  – deformação longitudinal experimental

$\varepsilon_{45^\circ}$  – deformação a 45° experimental

## 2.5 Normas e códigos de projeto

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), norma é o documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece regras, diretrizes ou características mínimas para atividades ou para seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto.

Durante os séculos 18 e 19 o vapor se tornou uma importante fonte de energia que estimulou a Revolução Industrial. A necessidade de se regulamentar a construção de vasos de pressão veio após o grande número de acidentes com caldeiras ocorridos na Revolução Industrial.

No Brasil a norma que regulamenta os serviços relacionados a vasos de pressão é a NR-13 (Norma Regulamentadora). No Quadro 1 são listadas outras normas que tratam sobre os vasos de pressão pelo mundo.



Quadro 1: Exemplos de normas para vaso de pressão no mundo

País	Norma	Instituição
United States	ASME - Boiler and Pressure Vessel Code	ASME - American Society of Mechanical Engineers
United Kingdom	PD 5500 - Unfired Fusion Welded Pressure Vessels	BSI - British Standard Institute
Germany	AD Merkblätter	AD - Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
Italy	ANCC - Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione	CTI - Comitato Termotecnico Italiano
Netherlands	Regels voor Toestellen	Dienst voor het Stoomwezen
Sweden	Tryckkärlskod	Tryckkärlskommissionen
Australia	AS 1210 - Unfired Pressure Vessels	SA - Standards Australia
Belgium	NBN EN 13445 - Récipients sous Pression non Soumis à la Flamme	NBN - Bureau voor Normalisatie
Japan	METI - Ministry of Economy, Trade and Industry	JIS - Japanese Industrial Standards
France	CODAP - Code de Construction des Appareils à Pression	SNCTTI - Syndicat National de la Chaudronnerie, Tolerie et Tuyauterie Industrielle
Brasil	NBR ISO 16528-1 - Caldeiras e Vasos de Pressão Parte 1: Requisitos de Desempenho	ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Fonte: Nogueira (2013)

No caso dos vasos de pressão, de um modo geral, as normas ou códigos de projeto abrangem as etapas de projeto, fabricação, inspeção e teste, montagem e manutenção destes equipamentos, proporcionando integridade estrutural e segurança durante a operação.

O Brasil não possui um código específico de projeto para vasos de pressão, mas possui a Norma Regulamentadora NR13 que exige a utilização de um código de projeto reconhecido internacionalmente. KRUGER (2014)

### 2.5.1 Norma Regulamentadora NR13

A Norma Regulamentadora NR13 foi publicada no diário oficial no ano de 1978, e desde então, vem passando por alterações e atualizações. Esta Norma Regulamentadora (NR) estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores. (NR13 2020)

A NR-13 deve ser aplicada nos equipamentos com as seguintes condições:

- todos os equipamentos enquadrados como caldeiras conforme subitens 13.4.1.1 e 13.4.1.2 da própria NR13;

- vasos de pressão cujo produto  $P \times V$  seja superior a 8 (oito), onde  $P$  é a pressão máxima de operação (em kPa) e  $V$  o seu volume interno (em  $m^3$ );
- vasos de pressão que contenham fluido da classe A, conforme Quadro 2, independente das dimensões e do produto  $P \times V$ .

Quadro 2: Características dos fluidos da classe A

Classe A	fluidos inflamáveis
	fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a 200 °C (duzentos graus Celsius)
	fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a 20 ppm (vinte partes por milhão);
	hidrogênio
	acetileno

Fonte: adaptado da NR13

### 2.5.2 ASME

De acordo com o site do ASME, duas grandes explosões (1905 e 1906) em fábricas de calçados no estado de Massachusetts, nos Estados Unidos, motivaram o governo por ações para melhoria da segurança pública, resultando na criação da lei de Massachusetts em 1909. Com o objetivo de mudar e padronizar a indústria, a ASME publica em 1915 a primeira edição do *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC), com foco maior em caldeiras. Em 1925 acontece a emissão do *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII*, com foco em vasos de pressão não sujeitos à chama.

O Quadro 3 mostra as três divisões do código ASME seção VIII e o Quadro 4 mostra as principais características de cada divisão.

Quadro 3: Divisão do código ASME seção VIII

ASME Seção VIII Divisão 01	Projeto e Fabricação de Vasos de Pressão
ASME Seção VIII Divisão 02	Regras alternativas para Construção de Vasos de Pressão
ASME Seção VIII Divisão 03	Regras alternativas para Construção de Vasos de Alta Pressão

Fonte: autor (2021)

Quadro 4: Principais características entre as divisões do código ASME seção VIII

	Divisão 1	Divisão 2	Divisão 3
Ano de Publicação Inicial	1925	1968	1997
Limite de Pressão	Até 206,8 bar	Sem Limites, normalmente acima de 41,4 bar	Sem Limites, normalmente acima de 689,5 bar
Fator Básico de Segurança	3,5 em relação a tensão de ruptura do material	3,0 em relação a tensão de ruptura do material	Baseado na tensão de escoamento do material
Critério Básico de Projeto	Tensão máxima de membrana	Tensão máxima de cisalhamento	Tensão máxima de cisalhamento
Análise Experimental de Tensões	Normalmente não requerida	Pode ser requerida	Requerida
Material	Poucas restrições quanto a qualidade	Mais restrições quanto a qualidade	Maiores restrições quanto a qualidade

Fonte: Kruger (2014)

Conforme Kruger (2014), o código ASME seção VIII divisão 1 e 2 adotam a tensão admissível para o dimensionamento do vaso de pressão, sendo esta a maior tensão que o material pode ser submetido sem comprometer sua integridade física. Para materiais dúcteis, normalmente, a tensão admissível é relacionada com a tensão de escoamento, e para materiais frágeis é relacionada com a tensão de ruptura, ou seja, em ambos os casos dependem das propriedades do material.

De acordo com Silva (2015), para o código ASME seção VIII divisão 1 as tensões primárias de membrana (normais às paredes do vaso) não devem ultrapassar os valores estabelecidos para as tensões admissíveis com a aplicação do carregamento.

No código ASME seção VIII divisão 1 foram estabelecidas regras de projeto e fabricação para limitar as elevadas tensões nas descontinuidades no vaso de pressão de modo seguro e consistente com a experiência adquirida. O código ASME seção VIII divisão 2 é uma alternativa à divisão 1, como o próprio nome informa no Quadro 3, adotando tensões admissíveis mais elevadas.

Conforme Silva (2015), o código ASME seção VIII divisão 2 apresenta um critério de projeto que adota as tensões para as combinações mais usuais de carregamento, análise de fadiga para condições cíclicas, gradientes térmicos e a análise de tensão em descontinuidades geométricas. Considera a teoria da máxima

tensão de cisalhamento (critério de Tresca), pela facilidade de aplicação e por ser adequada a análise por fadiga.

Conforme Mendonça (2011), até o lançamento da divisão 2 do ASME seção VIII em 1968, o critério de projeto vigente era “Projeto por norma”, mas após o lançamento da divisão 02, adotou-se o critério de projeto “Projeto por análise”. “Projeto por norma” emprega soluções analíticas consagradas para o dimensionamento de vasos com detalhes padronizados para a geometria dos componentes (casco, tampo, bocais, etc.) e “Projeto por análise” inclui componentes com geometrias e/ou carregamentos não convencionais, onde o dimensionamento depende de uma análise e classificação das tensões atuantes e comparação com valores admissíveis.

Quando comparamos a divisão 1 e 2, pelo fato da divisão 2 permitir uma tensão admissível mais elevada, a espessura da parede do vaso de pressão é menor, porém algumas exigências devem ser consideradas, por exemplo, em relação ao material, processos de fabricação e inspeções e testes, que acabam elevando o custo da fabricação. Portanto, nos casos em que as duas divisões podem ser aplicadas, deve-se analisar a relação custo-benefício de cada divisão.

De acordo com Kruger (2014), o código ASME seção VIII divisão 3 é direcionada para vasos de alta pressão, sendo parecida com a divisão 2 nos critérios de projeto, porém faz exigências adicionais em relação aos materiais e ensaios, restringindo sua aplicação para casos especiais, como espessuras elevadas e métodos de fabricação menos convencionais.

De acordo com o ASME seção VIII divisão 2, a verificação das tensões atuantes em vasos de pressão é realizada por meio da classificação das tensões em primárias, secundárias e de pico. E com base nessa classificação, pode-se atribuir valor diferente de tensão admissível para cada uma das tensões.

### **2.5.2.1 Classificação das tensões**

A análise das tensões é importante para que seja conhecido o comportamento das tensões distribuídas nas paredes dos equipamentos devido à aplicação de diferentes carregamentos, e assim identificar os pontos com os valores de tensão mais elevados, evitando a falha e mantendo a integridade estrutural e a operação segura dos equipamentos.

- Tensões primárias

São tensões desenvolvidas pela aplicação de carregamentos, por exemplo, pressão interna e peso próprio, necessárias para satisfazer o equilíbrio entre as forças e momentos externos e internos. São classificadas como não auto limitantes, o que significa que enquanto o carregamento é aplicado, as tensões se mantêm não sendo aliviadas em consequência de deformação.

As tensões primárias são proporcionais ao carregamento, portanto, quanto maior o carregamento, maior serão as tensões primárias, e caso estas excedam o limite de escoamento do material, poderá ocorrer o colapso plástico e a deformação plástica excessiva. As tensões primárias podem ser subdivididas em tensão primária geral de membrana ( $P_m$ ), tensão primária local de membrana ( $P_L$ ) e tensão primária de flexão ( $P_b$ ).

Segundo Kruger (2014) e Gonçalves (2016), a tensão primária geral de membrana é definida como a tensão primária média através da espessura da parede do equipamento produzida por um carregamento, e exclui descontinuidades e concentrações de tensões. A tensão primária local de membrana também é definida como a tensão primária média através da espessura da parede do equipamento produzida por um carregamento, mas inclui descontinuidades e atua em regiões limitadas. A tensão primária de flexão é produzida por um carregamento e varia através da espessura da parede do equipamento, e exclui descontinuidades e concentração de tensões. O conceito de tensão de flexão é semelhante ao caso de uma viga sob flexão, onde temos uma linha neutra e regiões com tração e compressão.

- Tensões secundárias (Q)

Conforme Neves (2016) e Telles (2012), são desenvolvidas pela auto restrição do equipamento à deformação em regiões de descontinuidade geométrica ou ligações com outras estruturas, e são classificadas como auto limitantes, pois são aliviadas em consequência de deformação plástica ou escoamento localizado do material.

Vale ressaltar que as concentrações de tensão locais não são consideradas como tensões secundárias. KRUGER (2014)

- Tensões de pico (F)

De acordo com Mendonça (2011), são as máximas tensões locais ocorridas em regiões limitadas com concentração de tensão, e tem como característica não causar distorções significativas, podendo ser uma possível origem de falha por fadiga.

## **2.6 Teste hidrostático**

Dentro da etapa de fabricação do vaso de pressão deste trabalho, este foi submetido à um rígido controle de qualidade, no qual o teste hidrostático foi obrigatório conforme requisitos da NR13 e ASME seção VIII divisão 2.

O teste hidrostático tem como objetivo detectar possíveis defeitos, falhas ou vazamentos em qualquer parte do equipamento, e consiste no preenchimento com água ou outro líquido até que todo o ar seja removido e pressurizado lentamente até uma determinada pressão chamada de pressão de teste hidrostático. É desejável que a pressão de teste hidrostático seja a maior possível, respeitando a segurança das partes menos resistentes, e sempre superior à pressão de projeto e máxima pressão de trabalho permitida. A água é bastante utilizada em teste hidrostático, pois tem grande disponibilidade, pequena compressibilidade, e em caso de uma ruptura do equipamento há baixa liberação de energia armazenada.

O teste hidrostático tem as seguintes vantagens e desvantagens. (FILHO 2004)

- vantagens: importante ferramenta para confirmar a ausência de vazamentos, confirmação do estado de integridade e capacidade de resistir às condições operacionais normais, no momento de sua realização e alívio de tensões residuais de soldagem de modo a que a estrutura testada funcione mais “relaxada”.
- desvantagens: possibilidade de crescimento crítico de descontinuidade e destruição do equipamento, seja na fabricação ou após ter sido colocado em serviço, possibilidade de crescimento subcrítico de descontinuidades pela sujeição de regiões danificadas por mecanismos de danos a solicitações mecânicas muito superiores às operacionais normais, e com isso a redução das margens de segurança do equipamento, sem que isto seja percebido e elevada relação custo/benefício da sua aplicação, pois

o teste hidrostático apenas informa se houve vazamento ou não, não sendo uma ferramenta de inspeção.

De acordo com o código ASME seção VIII divisão 2, a pressão de teste hidrostático ( $P_T$ ) é calculada como sendo o maior valor entre as equações 6 e 7.

$$P_T = 1,43 \cdot \text{MAWP} \quad (6)$$

$$P_T = 1,25 \cdot \text{MAWP} \cdot \text{LSR} \quad (7)$$

Onde:

MAWP – *Maximum Allowable Working Pressure* (Pressão máxima de trabalho admissível)

LSR – *Lowest Stress Ratio* (Menor taxa de tensão)

A LSR é a relação  $S_T / S$  na qual  $S_T$  é a tensão admissível na temperatura do teste e  $S$  é a tensão admissível na temperatura de projeto, e é calculada para cada parte do vaso de pressão, exceto parafusaria.

Em relação às tensões admissíveis para o teste hidrostático, o código ASME seção VIII divisão 2 estabelece algumas condições conforme equações 8, 9 e 10.

$$P_m \leq 0,95 \cdot S_y \quad (8)$$

$$P_m + P_b \leq 1,43 \cdot S_y \quad \text{para } P_m \leq 0,67 \cdot S_y \quad (9)$$

$$P_m + P_b \leq (2,43 \cdot S_y - 1,5 \cdot P_m) \quad \text{para } 0,67 \cdot S_y < P_m \leq 0,95 \cdot S_y \quad (10)$$

onde:

$P_m$  – tensão primária geral de membrana

$P_b$  – tensão primária de flexão

$S_y$  – tensão de escoamento

De acordo com o código ASME seção VIII divisão 2, pode-se calcular as tensões de membrana longitudinal e circunferencial do costado cilíndrico sujeito somente à pressão interna mediante as equações 11 e 12.

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{P.D^2}{E.(D_0^2 - D^2)} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P.D}{E.(D_0 - D)} \quad (12)$$

De acordo com o ASME seção VIII divisão 2, pode-se calcular as tensões de membrana circunferenciais dos tampos semiesféricos sujeitos somente à pressão interna mediante a equação 13:

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P.D^2}{E.(D_0^2 - D^2)} \quad (13)$$

Onde:

$\sigma_{\text{long}}$  – tensão de membrana longitudinal

$\sigma_{\text{circ}}$  – tensão de membrana circunferencial

P – pressão interna

D – diâmetro interno

$D_0$  – diâmetro externo

E – eficiência da junta soldada

## 2.7 Método dos elementos finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos vários tipos de métodos numéricos existentes. Método numérico é um algoritmo composto por um número finito de operações envolvendo apenas números (operações aritméticas elementares, cálculo de funções, consulta a uma tabela de valores, consulta a um gráfico, arbitramento de um valor, etc.). SANCHES e FURLAN (2007)

De acordo com Vaz (2011), o Método dos Elementos Finitos ganhou destaque internacional a partir dos anos 50 do século XX, sendo o trabalho do matemático alemão Richard Courant, publicado em 1943, considerado o pioneiro do método. No Brasil, a primeira tese defendida sobre o método dos elementos finitos foi em 1970.

Inicialmente as aplicações do MEF foram utilizadas para solução de problemas estruturais (análise de tensões e deformações). Porém, com o passar do



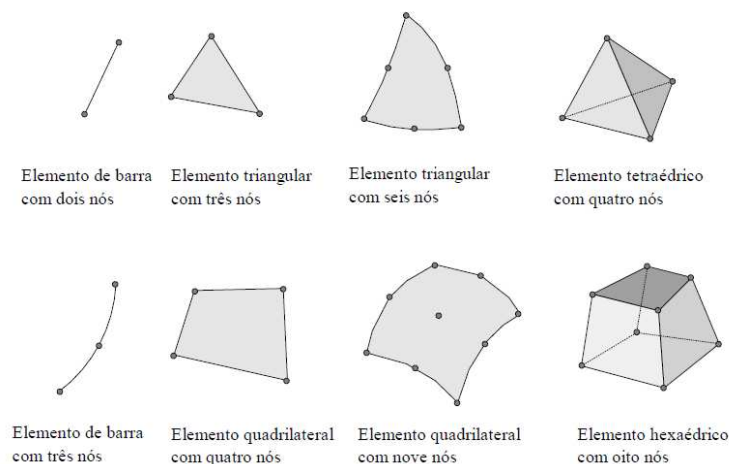
tempo, o MEF começou a ser aplicado na solução de diversos tipos de problemas, como fadiga, mecânica da fratura, transferência de calor, aerodinâmica, eletromagnetismo, propagação de ondas, entre outros. Com o aumento da complexidade dos problemas a serem resolvidos e o avanço na área computacional, o MEF se tornou uma ferramenta poderosa e muito difundida na solução numérica desses problemas. Como vantagens pode-se citar a redução de custos e tempo na realização de protótipos e análises experimentais, e análise de estruturas complexas que não são abrangidas por métodos analíticos.

Conforme Schiara (2016), o MEF tem se mostrado extremamente útil em aplicações de engenharia, já que pode gerar distribuição de tensões virtualmente em quaisquer condições de contorno, mesmo em geometrias complexas.

O MEF é baseado nos princípios gerais da Mecânica do Contínuo, no qual a matéria é tratada como sendo um meio contínuo e sem vazios interiores, desconsiderando sua estrutura molecular. No método dos elementos finitos o corpo em análise é aproximado pela consideração que o mesmo é equivalente a um conjunto de elementos finitos discretos agrupados, de forma adequada, pelos pontos nodais, também designados por nodos ou nós, localizados nas fronteiras dos mesmos. (TAVARES, 1998)

A Figura 25 ilustra alguns tipos de elementos finitos, que possuem formas geométricas diversas que variam em função do tipo de problema a ser analisado.

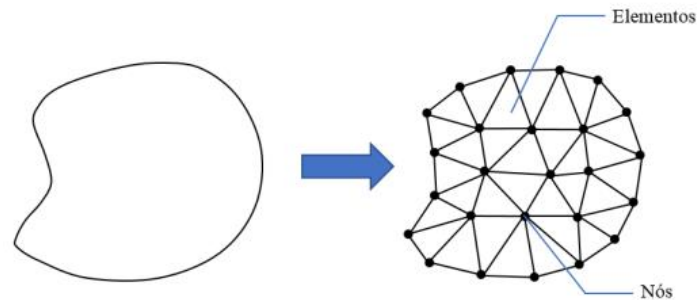
Figura 25: Diferentes tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2003)

O processo de subdividir o corpo analisado em pequenos elementos finitos se chama discretização. Todos os elementos discretizados são ligados pelos nós, formando a malha de elementos finitos. Na Figura 26 observa-se um corpo bidimensional com a malha formada pelos elementos finitos e os nós.

Figura 26: Discretização de um corpo contínuo



Fonte: [https://fei.edu.br/sites/sicfei/2019/mecanica/SICFEI\\_2019\\_paper\\_158.pdf](https://fei.edu.br/sites/sicfei/2019/mecanica/SICFEI_2019_paper_158.pdf)

De acordo com Souza (2003), a precisão do método dos elementos finitos depende dos elementos finitos (quantidade, tamanho e tipo) e dos nós (quantidade) presentes nas malhas. Apesar de ser um método aproximado, com a utilização de uma malha consistente na qual o tamanho dos elementos tende a zero, e por consequência, o número de nós tende ao infinito, pode-se obter um resultado que converge para a solução do problema. Ou seja, quanto mais refinada for a malha, mais precisos são os resultados, porém chega-se a uma subdivisão de elementos que não compensa subdividir mais, pois a precisão não aumenta.

A análise por meio do MEF pode ser dividida em três etapas:

- pré-processamento: definição do tipo de análise, da geometria, propriedades dos materiais, malha e condições de contorno (carregamentos, restrições, tipos de contato, etc)
- processamento (ou análise): configuração do tipo de análise
- pós-processamento: obtenção dos resultados, como tensões, deformações, fluxo de calor, campos magnéticos, etc

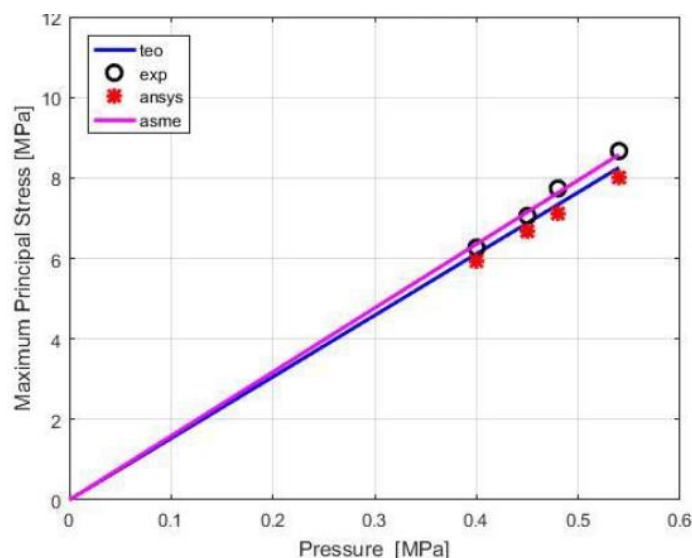
Existem atualmente diversos *softwares* comerciais que utilizam o MEF, como o ANSYS, SAP2000, ABAQUS, SIMULATION MECHANICAL, entre outros.

## 2.8 Estado da arte

Existem diversos trabalhos na literatura sobre análise de tensão em vaso de pressão e aqui são apresentados alguns relacionados a este trabalho.

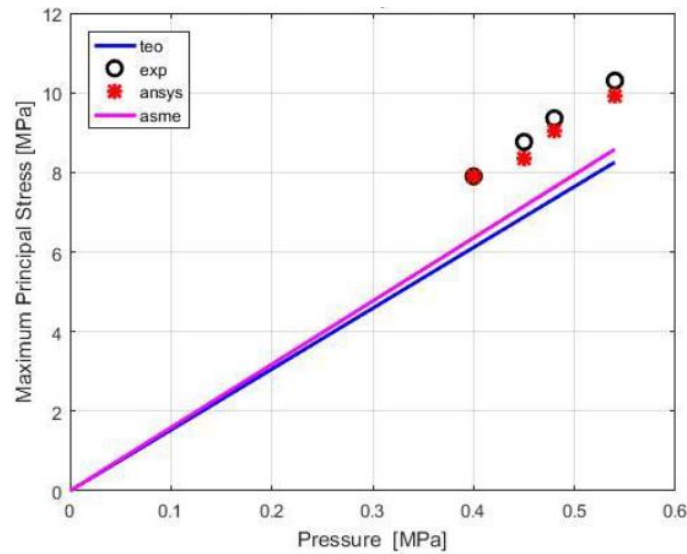
Glyniadakis (2019) analisou as tensões atuantes em um vaso de pressão construído para fins didáticos por meio da teoria de paredes finas, das formulações do código ASME, da análise numérica pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS e da análise experimental. O vaso de pressão tem corpo cilíndrico, tampos semielípticos e acessórios no aço SA 516 gr 60. Para a autora o dispositivo é importante no aperfeiçoamento do aprendizado sobre os conceitos que envolvem vasos de pressão, como deformação e tensão. O vaso de pressão foi submetido à um teste hidrostático e teve as deformações medidas em determinados pontos do vaso de pressão, próximos e distantes de descontinuidades geométricas, com auxílio da extensometria elétrica de resistência. Posteriormente as deformações foram convertidas em tensões e comparadas com as tensões obtidas pela teoria de paredes finas, formulações do código ASME seção VIII divisão 1 e análise numérica. Concluiu que nas regiões de transição e nas regiões das conexões, que são regiões próximas de descontinuidade geométrica, as tensões obtidas pela análise experimental e pela análise numérica com o *software* ANSYS divergiram das tensões obtidas pela teoria de parede fina e das formulações do código ASME por conta das tensões de flexão, como observado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27: Tensão principal máxima no costado (distante de descontinuidade geométrica)



Fonte: Glyniadakis (2019)

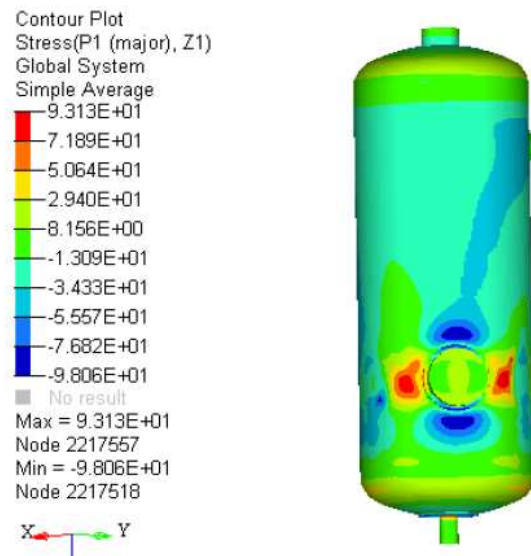
Figura 28: Tensão principal máxima na região da conexão (próximo de descontinuidade geométrica)



Fonte: Glyniadakis (2019)

Niranjana *et al* (2018) analisaram as tensões atuantes em um vaso de pressão vertical, projetado conforme as equações de dimensionamento do código ASME seção VIII divisão 1, pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS. O vaso de pressão tem corpo cilíndrico, tampos semielípticos, conexões e acessórios, e especificado com aço SA 516 GR 70. Para os autores os maiores valores de tensão ocorrem na intersecção das conexões por causa das descontinuidades geométricas e que a precisão do método dos elementos finitos depende do refinamento da malha. O equipamento foi projetado conforme o código ASME, modelado e analisado pelo método dos elementos finitos com o *software* ANSYS com aplicação de pressão interna. Concluíram que os maiores valores de tensão foram encontrados em torno da intersecção da conexão com o corpo, como mostrado na Figura 29.

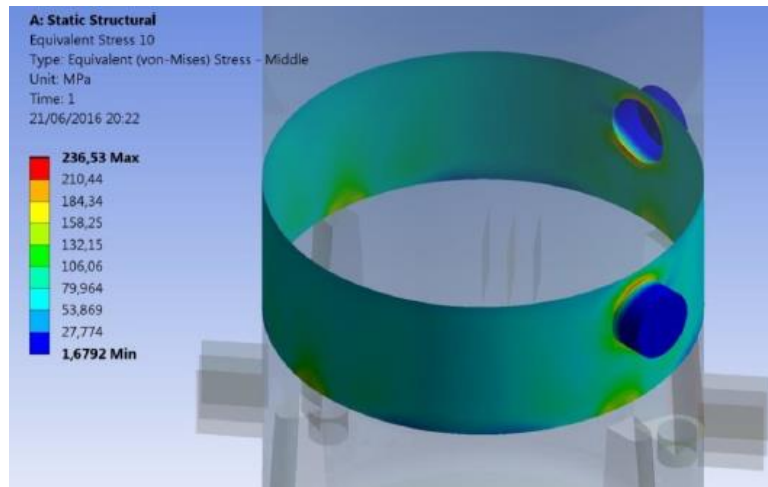
Figura 29: Distribuição da tensão circunferencial



Fonte: Niranjana (2018)

Gonçalves (2016) analisou as tensões atuantes em um de vaso de pressão vertical (pré-evaporador), projetado conforme as equações de dimensionamento do código ASME seção VIII divisão 1, pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS. O vaso de pressão tem tampo superior plano e tampo inferior toriesférico, corpo cilíndrico com transição cônica intermediária, conexões e acessórios, especificados no aço SA 283 GR C. Para o autor os vasos de pressão são equipamentos que merecem atenção especial devido às possibilidades de acidentes e por isso devem passar por análises estruturais. O equipamento foi projetado conforme o código ASME, modelado e analisado pelo método dos elementos finitos com o *software* ANSYS, com aplicação da pressão interna e da pressão hidrostática do fluido. A Figura 30 mostra que a tensão de membrana tem valores maiores nas regiões das conexões. Concluiu que as tensões de membrana nas regiões distantes das discontinuidades geométricas e concentradores de tensão apresentaram resultados mais próximos na comparação das equações do ASME com o método dos elementos finitos, diferentemente das regiões de maior complexidade geométrica, já que a teoria não leva em consideração algumas tensões que aparecem nestas regiões, mostrando a vantagem da utilização do método dos elementos finitos.

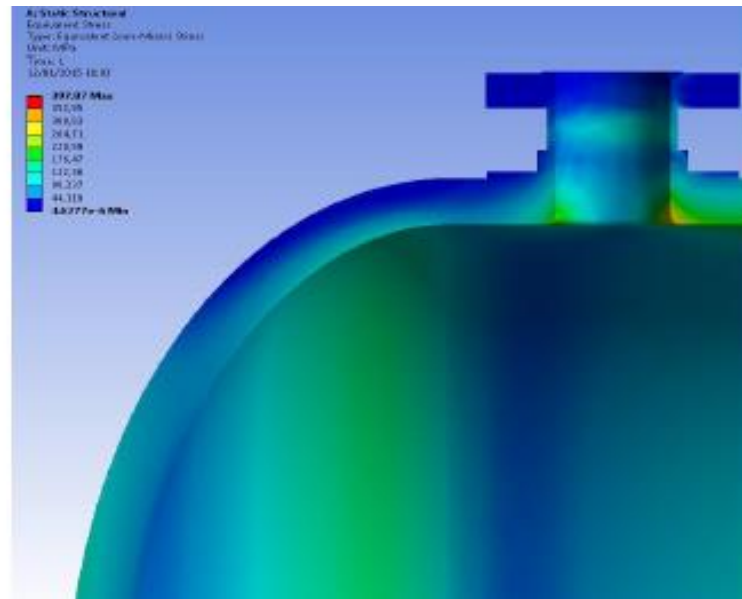
Figura 30: Tensão de membrana



Fonte: Gonçalves (2016)

Silva (2015) analisou, pelo método dos elementos finitos, dois projetos de vaso de pressão vertical com as mesmas condições de operação: um segundo o código ASME seção VIII divisão 1 e outro segundo a divisão 2. O equipamento foi composto por costado cilíndrico, tampos elipsoidais, conexões e acessórios, e especificados no aço ASTM A516 GR70. Para o autor, os vasos de pressão são equipamentos de alto risco que podem causar diversos tipos de acidentes, e por isso, os projetos necessitam de ferramentas computacionais mais sofisticadas que produzem resultados melhores que os métodos analíticos. O equipamento foi projetado conforme as divisões 1 e 2 da seção VIII do código ASME, modelado e submetido à pressão interna para análise das tensões atuantes com o *software* ANSYS. Concluiu que, em ambos os projetos, os valores de tensões no costado e tampos obtidos pelo método dos elementos finitos estão em conformidade com os critérios de aceitação dos vasos de pressão e que os valores das tensões mais elevados ocorreram na mudança de geometria entre costado e tampo e nas regiões das conexões, conforme observado na Figura 31.

Figura 31: Distribuição de tensão



Fonte: Silva (2015)

Kruger (2014) analisou a tensão em bocais de vasos de pressão cilíndricos, com e sem chapa de reforço, pelo método do boletim WRC 297 e pelo método dos elementos finitos com a utilização dos *softwares* ANSYS, Nozzle Pró e SolidWorks Simulations, e posteriormente comparou os resultados. O vaso de pressão foi representado somente por um corpo cilíndrico com uma conexão radial que teve o diâmetro variado em 6 valores diferentes, com aplicação de pressão interna e esforços externos nas conexões. Para o autor, a região dos bocais, como na Figura 32, tem maior probabilidade de falha, pois a abertura para instalação das conexões causa descontinuidades geométricas e por isso demandam uma atenção especial. Concluiu que o método dos elementos finitos é muito mais abrangente que o método do boletim WRC 297, já que o método do boletim calcula a tensão somente em alguns pontos específicos e tem limitações em relação à geometria.

Figura 32: Distribuição de tensões na região da conexão

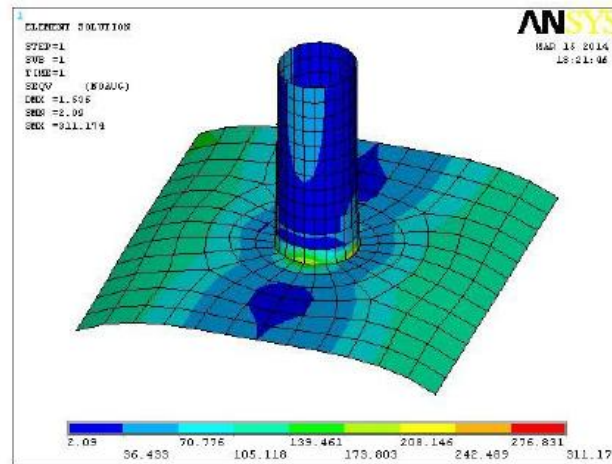


Figura 45 – Exemplo de distribuição de tensões gerada pelo Ansys

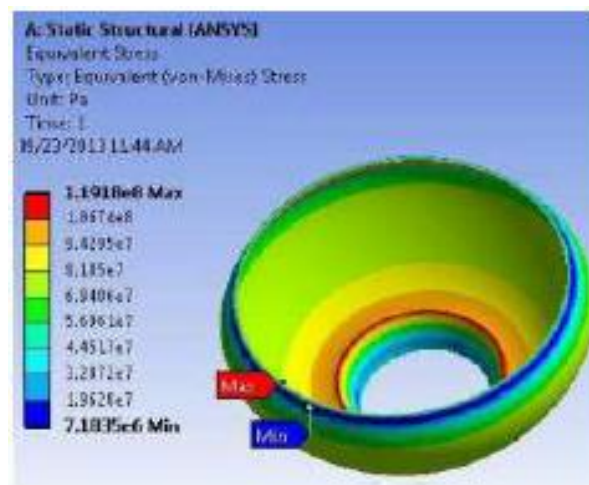
Fonte: Kruger (2014)

Gupta (2014) elaborou uma revisão de 28 trabalhos sobre projeto e análise de vasos de pressão, com ênfase nos fatores que causam concentração de tensão em vasos de pressão. Para o autor as aberturas para instalação de conexões em vasos de pressão geram descontinuidades geométricas que alteram a distribuição da tensão e que equações para cálculo das tensões não levam em consideração essas alterações. Concluiu que o código de norma ASME e outros códigos estão fornecendo soluções para casos mais padrões, que o método dos elementos finitos é uma ferramenta poderosa para análise de tensão em vasos de pressão e que analisar a concentração de tensões em aberturas nos vasos de pressão é de extrema importância.

Unnava (2013) projetou com base no código ASME seção VIII um vaso de pressão esférico com uma conexão radial e analisou pelo método dos elementos finitos com a utilização do *software* ANSYS. O vaso de pressão foi representado por uma meia esfera com conexão radial, com aplicação de pressão interna. Para o autor a distribuição da tensão na região de intersecção da conexão com a parede do vaso e as demais regiões será diferente, já que as conexões causam descontinuidades geométricas. Concluiu que as tensões aumentam na intersecção do vaso com a conexão por causa da descontinuidade geométrica, como observado na Figura 33.



Figura 33: Tensão no contorno da junção



Fonte: Gupta (2014)

Mendonça (2011) analisou as tensões de um vaso de pressão, projetado conforme o código ASME seção VIII divisão 2, pelo método dos elementos finitos com a utilização do *software* ANSYS. O vaso de pressão é um reator cilíndrico vertical com tampas semiesféricas, suporte, conexões e acessórios, especificado no aço A-336 GR F22V e aplicação de pressão interna e esforços externos. Para o autor, a busca por vasos de pressão com maior eficiência, maiores pressão e temperatura requer projetos cada vez mais complexos, que necessitam de ferramentas computacionais mais sofisticadas para análise do seu comportamento. Concluiu que o método dos elementos finitos é uma ferramenta com muito potencial, pois permite analisar geometrias complexas, como a Figura 34, e os pontos de concentração de tensão, e que para os casos mais simples há convergência com os resultados das fórmulas analíticas.

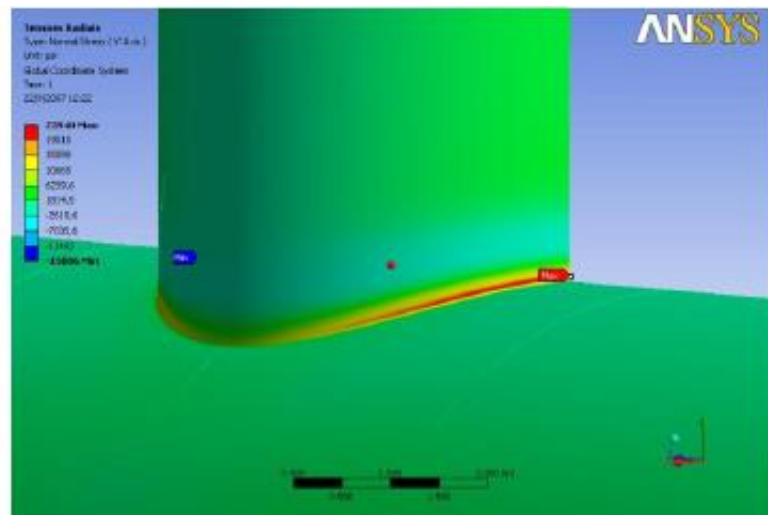
Figura 34: Tensões no bocal com carga da tubulação



Fonte: Mendonça (2011)

Miranda (2007) analisou as tensões atuantes na intersecção da conexão com vaso de pressão cilíndrico com e sem chapa de reforço, pelo método dos elementos finitos com a utilização do *software* ANSYS. O vaso de pressão foi representado como um corpo cilíndrico com conexão radial, projetado conforme o boletim WRC 493, especificado no aço Q235-A. Foram elaborados três modelos, sendo um sem chapa de reforço, outro com chapa de reforço integral e outro com reforço parcialmente soldado, todos com aplicação de pressão interna. Para o autor, na região de intersecção entre conexões e vasos, como a Figura 35, ocorrem elevados níveis de tensões devido à descontinuidade geométrica e que problemas na soldagem nessa região podem torna-las mais fracas e possivelmente fonte de falha. Concluiu que no modelo sem a chapa de reforço os resultados do método dos elementos finitos tiveram boa correlação comparados com análises experimental e numérica de outro trabalho, e que nos outros dois modelos com chapa de reforço, os valores das tensões na intersecção da conexão com o corpo cilíndrico do vaso foram reduzidos drasticamente.

Figura 35: Tensões na região de interesse



Fonte: Miranda (2007)

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este trabalho foi composta pelas seguintes etapas:

- realização do teste hidrostático no equipamento e obtenção dos valores das deformações nos três pontos específicos com auxílio da extensometria elétrica de resistência durante a pressurização do vaso de pressão;

- conversão dos valores das deformações experimentais obtidas no teste hidrostático para valores de tensões fazendo o uso de equações que se baseiam na relação tensão e deformação;

- aplicação das equações da teoria de membrana considerando as especificações de projeto e obtenção das tensões nos dois pontos específicos distantes de descontinuidade geométrica para as mesmas pressões do teste hidrostático;

- aplicação das equações do código ASME seção VIII divisão 2 considerando as especificações de projeto e obtenção das tensões nos dois pontos específicos distantes de descontinuidade geométrica para as mesmas pressões do teste hidrostático;

- elaboração do modelo computacional referente ao vaso de pressão considerado neste trabalho e obtenção das tensões nos três pontos específicos para as mesmas pressões do teste hidrostático pelo método dos elementos finitos pelo *software* ANSYS versão estudante.

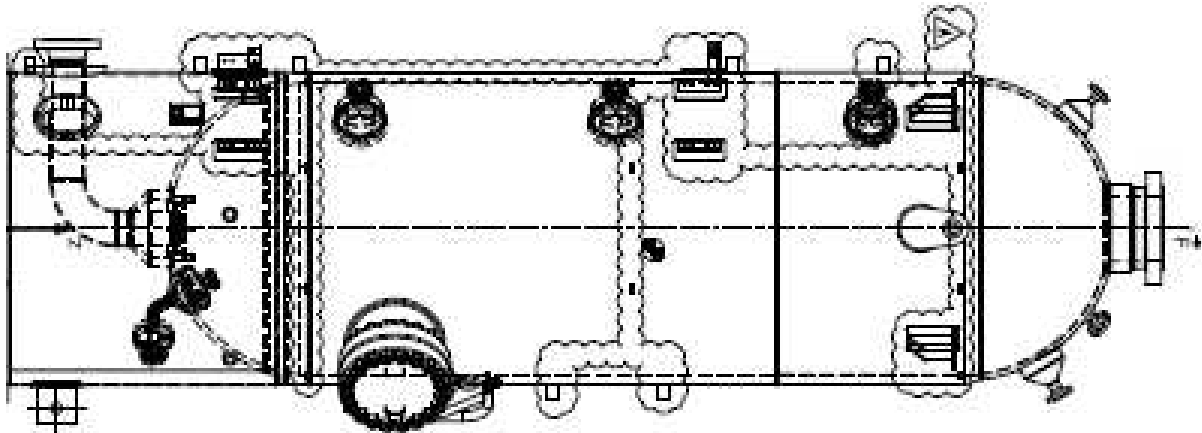
#### 3.1 Teste hidrostático

##### 3.1.1 Informações do equipamento

O vaso de pressão deste trabalho é um equipamento projetado e fabricado sob encomenda, de acordo com as necessidades do cliente. Neste caso, todas as etapas de projeto, fabricação, inspeção, teste e instalação do equipamento seguiram a NR13 e o código ASME seção VIII divisão 2.

A Figura 36 mostra uma visão geral do equipamento com suas principais partes: tampos superior e inferior, costado, saia de sustentação, conexões e acessórios.

Figura 36: Visão geral do vaso de pressão deste trabalho



Fonte: projeto do fabricante

Na Tabela 1 são apresentadas algumas informações básicas do equipamento que são utilizadas nos cálculos das tensões nas diversas análises.

Tabela 1: Informações básicas do vaso de pressão

Normas aplicadas	ASME SECTION VIII DIV. 2 (2013) + NR 13
Material do costado e tampo	SA 516 Gr 70 + CLAD 316 L
Tensão de escoamento - SA 516 Gr 70	262 MPa
Tensão de ruptura - SA 516 Gr 70	482 MPa
Módulo de elasticidade - SA 516 Gr 70	200 GPa
Coefficiente de Poisson - SA 516 Gr 70	0,30
Geometria do costado / tampos	cilíndrica / semiesférica
Espessura do costado	99 mm / 96 mm + 3 mm CLAD
Espessura dos tampos	inferior 50 mm / superior 47 mm + 3 mm CLAD
Pressão de operação	73,59 bar normal / 78,50 bar máxima
Temperatura de operação	25 °C normal / 260 °C máxima
Pressão de projeto	92,02 bar
Temperatura de projeto	-46 °C mínima / 290 °C máxima
Diâmetro interno do costado	2700 mm
Diâmetro interno dos tampos	2714 mm
Eficiência da junta soldada	1

Fonte: autor (2021)

### 3.1.2 Realização do teste hidrostático e coleta dos dados

A pressão mínima de teste hidrostático foi calculada pelo projetista do equipamento conforme explicado no Item 2.6, sendo o valor encontrado de

14,66 MPa, porém a pressão de teste hidrostático aplicada foi de 15 MPa. Essa pressão é mais que o dobro da pressão normal de trabalho especificada no projeto, que é de 7,36 MPa. Apesar do equipamento operar na vertical, o teste hidrostático foi realizado na horizontal.

O teste hidrostático no vaso de pressão foi realizado conforme procedimentos do fabricante e do cliente. Com o vaso de pressão posicionado no local do teste hidrostático, iniciou-se a preparação para o teste hidrostático com o fechamento de todas as conexões com os respectivos flanges, conforme Figura 37.

Figura 37: Vaso de pressão posicionado para o teste hidrostático



Fonte: autor (2021)

Em um dos flanges foi instalada a válvula de entrada de água, que estava conectada a uma bomba hidráulica de deslocamento positivo, responsável pela pressurização do equipamento. Em outro flange foi instalado o manômetro para acompanhamento da variação da pressão no interior do equipamento, conforme Figura 38. Após a instalação de todos os flanges, o equipamento foi preenchido com água.

Figura 38: Flange com manômetro



Fonte: autor (2021)

Os três pontos específicos para coleta dos dados foram: o costado, o tampo superior e a região de intersecção do tampo superior com a conexão. Estes três pontos foram preparados por intermédio do processo de lixamento para uma melhor aderência dos extensômetros na superfície. A colagem dos extensômetros seguiu procedimento padrão do fabricante.

Os extensômetros utilizados são do tipo roseta retangular e são da marca KYOWA, com especificações conforme Figura 39.

Figura 39: Especificações do extensômetro

KYOWA		MADE IN JAPAN		
TYPE	KFG-5-120-D17-23			
GAGE FACTOR (24°C, 50%RH)	2.12 ± 1.0%	LOT No.	Y373S	BATCH 050A T01
GAGE LENGTH	5 mm	TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR	+0.008 %/°C	
GAGE RESISTANCE(24°C, 50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω	APPLICABLE GAGE CEMENT	CC-33A , PC-600	
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	23.4 PPM/°C	QUANTITY	10	

Fonte: autor (2021)

Na Figura 40 tem-se uma visão geral dos pontos específicos de instalação dos extensômetros no tampo superior (círculo amarelo), na intersecção do tampo superior com a conexão (quadrado amarelo) e no costado (triângulo amarelo), sendo que os pontos do tampo e do costado se encontram distantes de descontinuidades geométricas, e o ponto da intersecção se encontra próximo de descontinuidade geométrica.

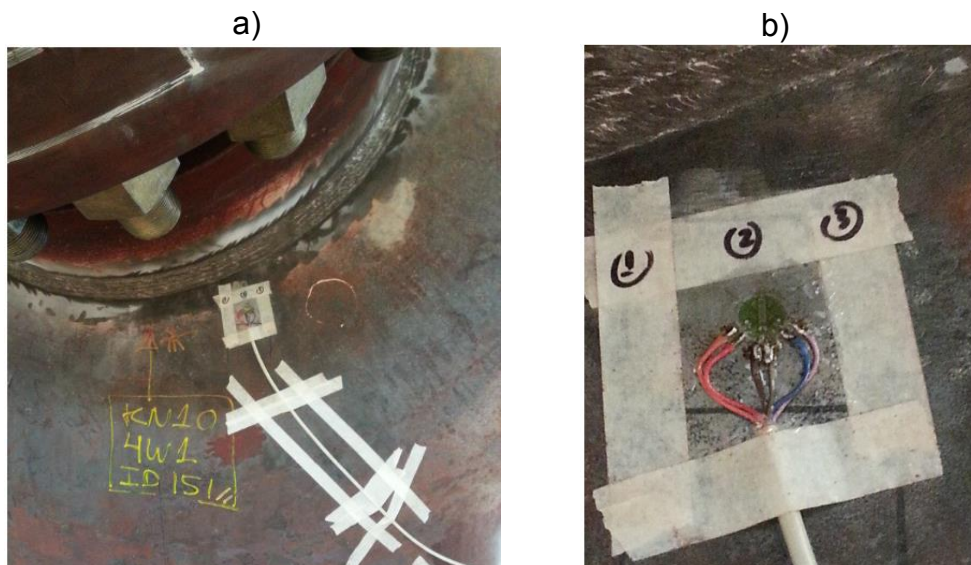
Figura 40: Visão geral do vaso de pressão com os três pontos específicos



Fonte: autor (2021)

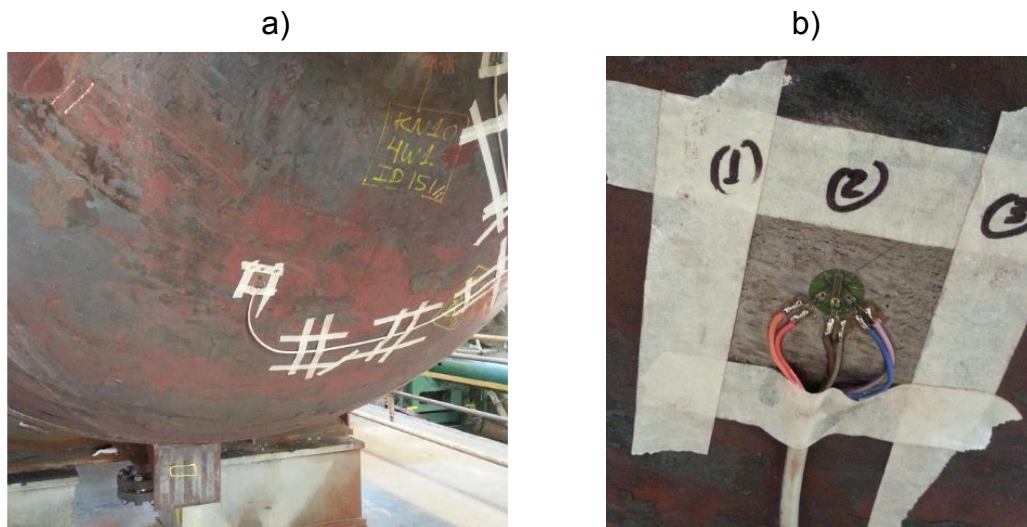
As Figuras 41, 42 e 43 mostram os extensômetros do tipo roseta retangular instalados em suas posições com maior detalhe.

Figura 41: Posicionamento do extensômetro próximo à intersecção a) visão geral b) detalhe



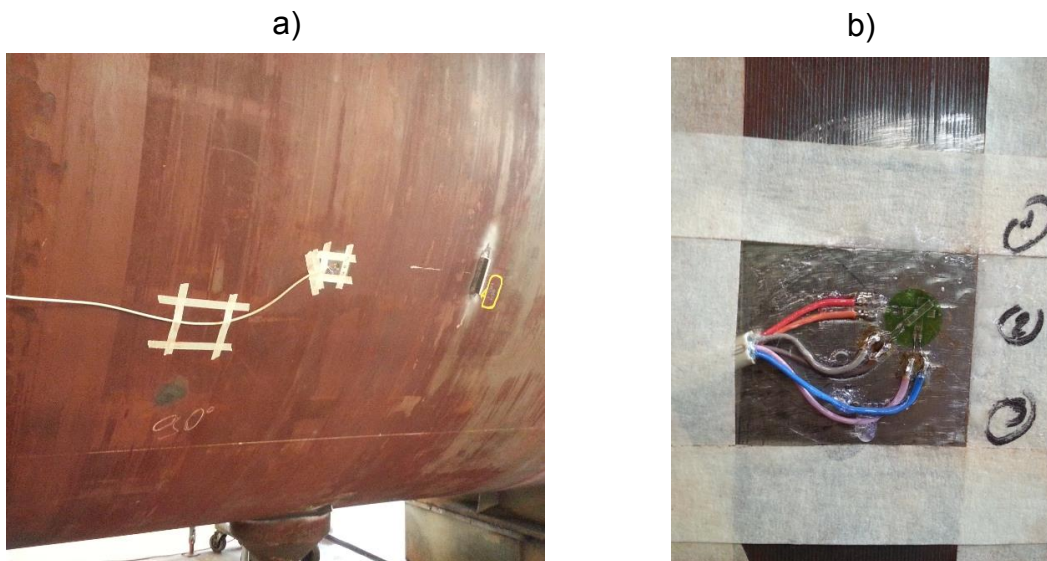
Fonte: autor (2021)

Figura 42: Posicionamento do extensômetro no tampo superior a) visão geral b) detalhe



Fonte: autor (2021)

Figura 43: Posicionamento do extensômetro no costado a) visão geral b) detalhe



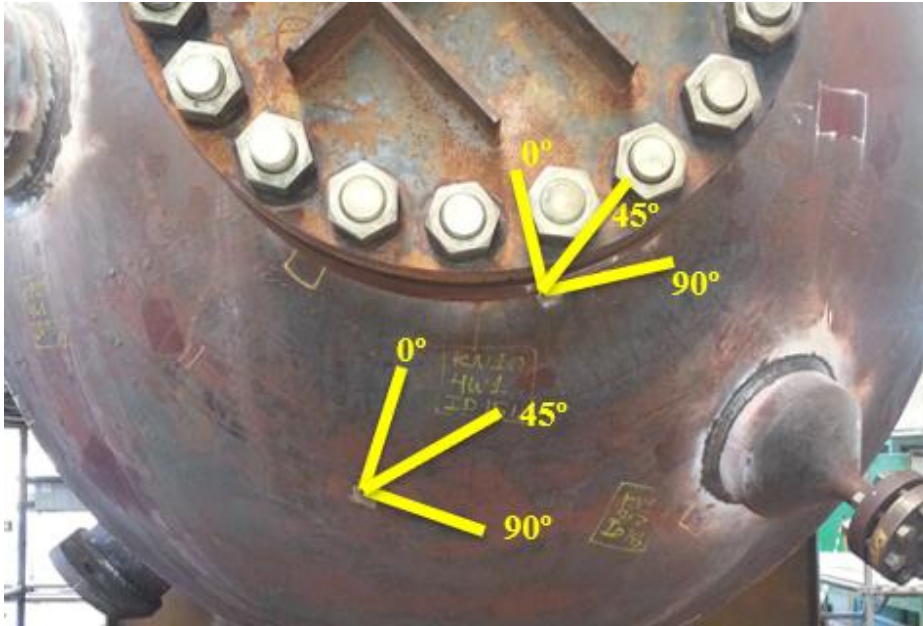
Fonte: autor (2021)

Os números anotados em cada roseta retangular serviram para identificar as deformações informadas no relatório emitido pelo condicionador de sinais.

A Figura 44 ilustra as direções consideradas para denominação das deformações e tensões nos dois pontos específicos do tampo superior, sendo o eixo  $0^\circ$  alinhado com o centro da conexão no tampo superior, as deformações alinhadas com os eixos  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  e as tensões circunferenciais alinhadas com os eixos  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .



Figura 44: Direções consideradas para as deformações e tensões no tampo



Fonte: autor (2021)

A Figura 45 ilustra as direções consideradas para denominação das deformações e tensões no ponto específico do costado, sendo as deformações alinhadas com os eixos 0°, 45° e 90°, a tensão longitudinal alinhada com o eixo 0° e a tensão circunferencial alinhada com o eixo 90°.

Figura 45: Direções consideradas para as deformações e tensões no costado



Fonte: autor (2021)

Após toda a preparação, iniciou-se o teste hidrostático do vaso de pressão. A pressão interna do equipamento foi variada de 0 até 15 MPa, com os valores de deformação medidos a cada 0,1 segundo e captados por um condicionador de sinais HBM® Quantumx MX1615. Para atingir a pressão de 15 MPa foram decorridos aproximadamente 2.603 segundos (aproximadamente 44 minutos). Cada extensômetro do tipo roseta retangular gerou três valores de deformação, portanto foram coletados 9 valores de deformação a cada 0,1 segundo, totalizando aproximadamente 234.270 valores de deformação.

Devido ao elevado número de valores de deformação e com o objetivo de agilizar as análises, foram anotados os tempos a cada 0,5 MPa de variação a partir de 0 até 15 MPa, sendo possível coletar os dados das deformações para os múltiplos de 0,5 MPa em todos os extensômetros, totalizando assim 270 valores de deformação, que são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2: Deformações no ponto específico do tampo superior

Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$
0,5	10,50	9,74	8,92	8,0	288,66	293,43	300,20
1,0	28,04	28,09	26,38	8,5	306,58	311,03	318,83
1,5	42,68	43,26	41,72	9,0	326,57	331,73	340,23
2,0	60,25	61,38	60,19	9,5	343,66	348,47	357,89
2,5	82,19	83,16	81,56	10,0	361,88	366,94	376,66
3,0	103,93	105,88	104,11	10,5	378,44	383,86	394,85
3,5	123,20	124,97	124,10	11,0	391,48	396,35	407,78
4,0	141,45	143,65	143,53	11,5	410,21	416,75	430,29
4,5	159,51	163,07	163,48	12,0	429,54	435,78	450,96
5,0	176,64	179,95	181,66	12,5	447,48	454,23	469,90
5,5	196,05	199,98	202,61	13,0	468,51	475,86	492,27
6,0	214,67	218,95	221,54	13,5	484,36	491,99	509,46
6,5	235,31	239,70	243,30	14,0	500,81	508,67	527,27
7,0	257,39	260,82	265,74	14,5	522,43	530,57	549,62
7,5	274,54	279,26	284,57	15,0	540,01	547,49	567,80

Fonte: autor (2021)

Tabela 3: Deformações no ponto específico do costado

Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$
0,5	2,82	7,17	13,24	8,0	100,25	212,21	387,86
1,0	8,21	20,79	37,89	8,5	101,65	223,47	410,38
1,5	9,98	30,37	57,92	9,0	108,51	238,09	437,84
2,0	16,93	44,06	82,55	9,5	111,67	250,58	459,66
2,5	27,81	61,80	111,50	10,0	116,21	263,22	483,92
3,0	36,48	78,72	140,37	10,5	116,92	275,74	507,63
3,5	42,30	93,37	165,46	11,0	122,81	285,60	524,69
4,0	47,21	106,71	190,13	11,5	130,16	293,35	548,64
4,5	53,21	118,10	214,36	12,0	138,12	310,58	576,26
5,0	57,74	130,58	237,49	12,5	143,18	324,58	601,96
5,5	63,41	145,51	263,73	13,0	148,63	339,51	629,61
6,0	70,86	160,12	289,03	13,5	153,25	351,83	651,45
6,5	93,68	176,34	317,34	14,0	157,99	363,80	673,41
7,0	96,41	191,71	345,04	14,5	164,05	379,95	702,40
7,5	99,74	203,70	368,37	15,0	169,21	392,41	725,13

Fonte: autor (2021)

Tabela 4: Deformações no ponto específico da intersecção

Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	Pressão (MPa)	$\epsilon_{0^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{45^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$	$\epsilon_{90^\circ}$ $\mu/\mu\text{m}$
0,5	13,90	13,31	16,42	8,0	401,77	397,15	468,46
1,0	38,68	37,70	44,46	8,5	426,35	421,78	497,95
1,5	60,54	59,06	69,56	9,0	454,64	449,99	532,93
2,0	84,63	83,85	98,44	9,5	478,30	472,96	559,13
2,5	112,90	111,78	130,47	10,0	503,68	498,80	589,99
3,0	142,90	141,24	164,51	10,5	527,77	522,36	618,59
3,5	169,27	166,69	194,13	11,0	545,69	540,12	639,99
4,0	194,97	192,17	224,41	11,5	575,71	570,46	676,57
4,5	222,34	218,77	256,68	12,0	601,29	595,90	706,76
5,0	246,09	242,31	284,32	12,5	626,83	621,10	737,18
5,5	273,35	269,01	315,90	13,0	655,28	650,40	771,68
6,0	298,13	294,16	345,61	13,5	678,30	673,33	799,40
6,5	326,51	322,02	378,79	14,0	700,87	696,50	826,61
7,0	355,62	351,00	412,80	14,5	731,85	726,80	863,60
7,5	380,58	376,41	443,11	15,0	754,45	750,65	891,89

Fonte: autor (2021)

### 3.2 Cálculo das tensões experimentais

Após a realização do teste hidrostático e obtenção das deformações nos três pontos específicos, o próximo passo foi a conversão das deformações em tensões principais máxima ( $\sigma_1$ ) e mínima ( $\sigma_2$ ), com a utilização das equações 4 e 5, conforme explicado no Item 2.4.

$$\sigma_1 = E \left[ \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_l}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_l)^2 + (2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_t - \varepsilon_l)^2} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E \left[ \frac{\varepsilon_t + \varepsilon_l}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_l)^2 + (2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_t - \varepsilon_l)^2} \right] \quad (5)$$

Os valores das constantes E e  $\nu$  foram retiradas da Tabela 1 e os valores das deformações foram retiradas das Tabelas 2, 3 e 4, de acordo com o ponto específico a ser calculado. Os resultados obtidos para as tensões pela análise experimental foram apresentados no Capítulo 4.

### 3.3 Cálculos teóricos

Os cálculos teóricos foram aplicados nos dois pontos específicos do teste hidrostático para o cálculo das tensões longitudinal e circunferencial atuantes conforme a variação de pressão interna no equipamento. Foram utilizadas duas equações para a teoria de membrana e duas para as formulações do código ASME, sendo uma para o costado e uma para o tampo superior.

A pressão hidrostática causada pela coluna de água nas paredes do equipamento não foi considerada em ambos os cálculos teóricos, já que o máximo valor da pressão hidrostática é muito inferior aos valores da pressão interna aplicada no equipamento. A máxima pressão hidrostática no vaso de pressão na horizontal seria no costado, com a altura da coluna d'água igual ao diâmetro interno do costado, que é 2,7 m. Considerando densidade da água de 997 kg/m<sup>3</sup> e aceleração da gravidade de 9,8 m/s<sup>2</sup>, calcula-se uma pressão hidrostática máxima de 26,38 KPa, resultado da multiplicação de 2,7 por 9,8 por 997. Em relação à pressão interna inicial do teste hidrostático de 0,5 MPa ou 500 KPa, a pressão hidrostática corresponde a aproximadamente 5%, e em relação à pressão final do teste hidrostático de 15 MPa ou 15000 KPa, corresponde a aproximadamente 0,2%.

### 3.3.1 Cálculo das tensões por meio da teoria de membrana

Para o cálculo das tensões por meio das equações da teoria de membrana foram utilizadas as equações 1, 2 e 3, explicadas no Item 2.3. As equações para cálculo das tensões longitudinal e circunferencial para o costado são:

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{P \cdot r_{\text{int}}}{2t} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P \cdot r_{\text{int}}}{t} \quad (2)$$

A equação para cálculo das tensões circunferenciais para o tampo superior é:

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P \cdot r_{\text{int}}}{2t} \quad (3)$$

Os valores da pressão interna variaram de 0,5 até 15 MPa, enquanto os valores do raio interno e espessura foram considerados respectivamente 1350 mm e 99 mm para o costado e 1357 mm e 50 mm para o tampo superior.

Após a substituição nas equações 1, 2 e 3, os resultados obtidos para as tensões pela análise da teoria de membrana foram apresentados no Capítulo 4.

### 3.3.2 Cálculo das tensões por meio das formulações do código ASME

Para o cálculo das tensões por meio das formulações do código ASME foram utilizadas as equações 11, 12 e 13, explicadas no Item 2.6.

As equações para cálculo das tensões longitudinal e circunferencial para o costado são:

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{P \cdot D^2}{E \cdot (D_0^2 - D^2)} \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P \cdot D}{E \cdot (D_0 - D)} \quad (12)$$

A equação para cálculo das tensões circunferenciais para o tampo superior é:

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{P.D^2}{E.(D_0^2 - D^2)} \quad (13)$$

Os valores da pressão interna variaram de 0,5 até 15 MPa, a eficiência da junta soldada foi considerada 1 (conforme projeto), enquanto os valores do raio interno e espessura foram considerados respectivamente 1350 mm e 99 mm para o costado e 1357 mm e 50 mm para o tampo superior.

Após a substituição nas equações 11, 12 e 13, os resultados da análise pelas formulações do código ASME foram apresentados no Capítulo 4.

### 3.4 Análise numérica

Para a realização da análise numérica pelo método dos elementos finitos foi utilizado o *software* ANSYS versão estudante 2020 R2, tendo esta versão limitação no número de nós de 32 mil. Toda a etapa de modelagem foi elaborada no *software* SPACECLAIM versão 2020 R2 que acompanha a versão do ANSYS mencionada.

#### 3.4.1 Modelagem do vaso de pressão

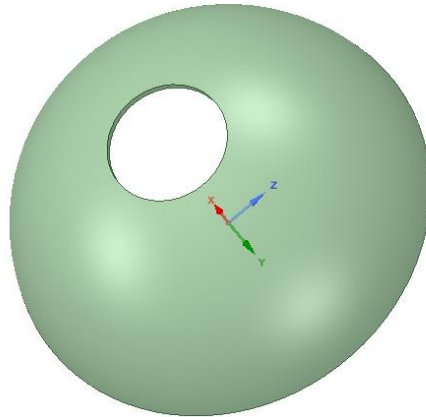
Cada componente do equipamento foi modelado independentemente como elemento sólido, e após a modelagem de todos os componentes, realizou-se a montagem do equipamento.

- Tampo superior

O tampo superior, Figura 46, foi modelado conforme projeto do fabricante com as seguintes dimensões e características:

- diâmetro interno da base (encontro com o costado): 2700 mm
- raio interno de curvatura: 1357 mm
- espessura: 50 mm
- aço SA 516 grau 70
- diâmetro do furo para conexão: 810 mm

Figura 46: Visão geral do tampo superior



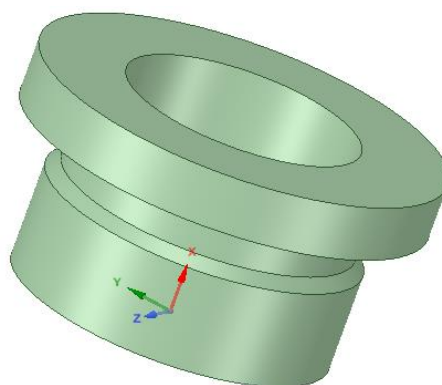
Fonte: autor (2021)

- Conexão

A conexão, Figura 47, foi modelada conforme projeto do fabricante com as seguintes dimensões e características:

- diâmetro interno: 600 mm
- diâmetro externo em contato com tampo superior: 810 mm
- espessura: variável conforme Figura 48
- aço SA 350 lf2 *class 1*
- o canal para anel de vedação com altura de 15,9 mm não foi modelado

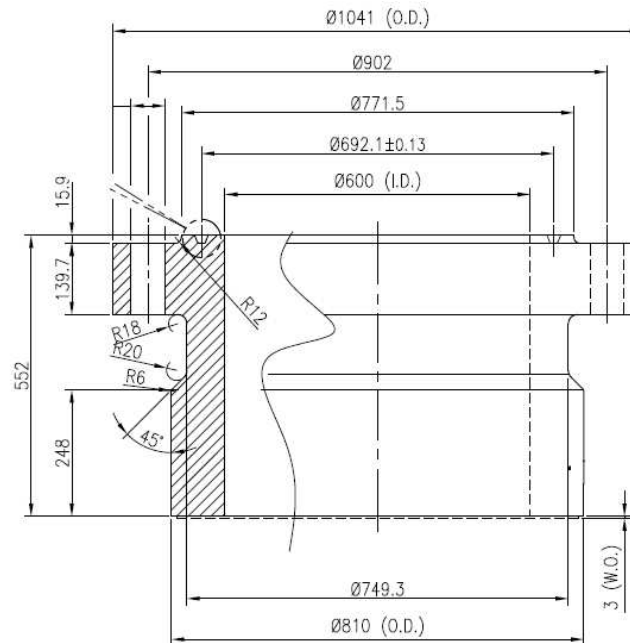
Figura 47: Visão geral da conexão



Fonte: autor (2021)

A Figura 48 mostra as dimensões da conexão.

Figura 48: Dimensões da conexão



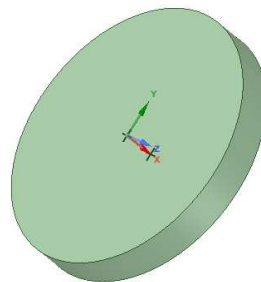
Fonte: projeto do fabricante

- Tampa da conexão

A tampa da conexão, Figura 49, não consta no projeto e foi modelada com base nas dimensões da conexão.

- diâmetro: 1041 mm
- espessura: 140 mm
- aço SA 350 lf2 class 1

Figura 49: Visão geral da tampa da conexão



Fonte: autor (2021)

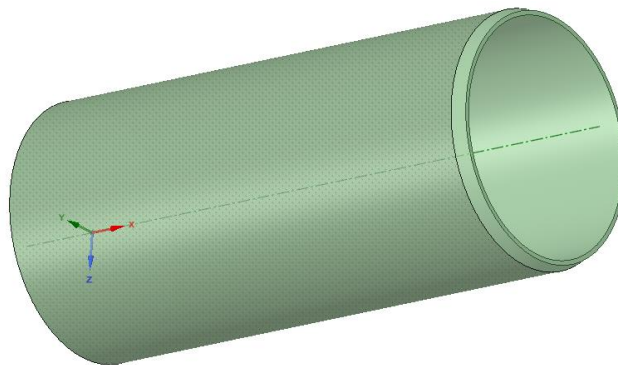


- Costado

O costado, Figura 50, foi modelado conforme projeto do fabricante com as seguintes dimensões e características:

- diâmetro interno: 2700 mm
- comprimento: 6259 mm
- espessura: 99 mm
- aço SA 516 grau 70

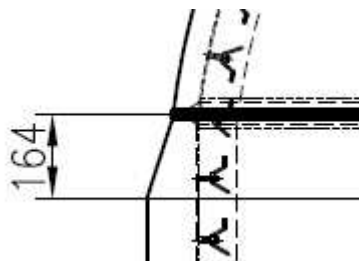
Figura 50: Visão geral do costado



Fonte: autor (2021)

A Figura 51 mostra a transição da espessura de 99 mm do costado para 50 mm do tampo superior.

Figura 51: Detalhe da transição do costado para o tampo superior



Fonte: autor (2021)

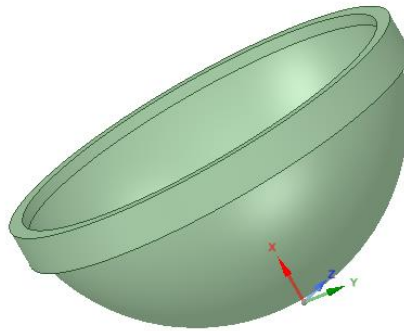
- Tampo inferior

O tampo inferior, Figura 52, foi modelado conforme projeto do fabricante com as seguintes dimensões e características:

- diâmetro interno da base (encontro com o costado): 2700 mm

- raio interno de curvatura: 1357 mm
- espessura: 50 mm
- aço SA 516 grau 70

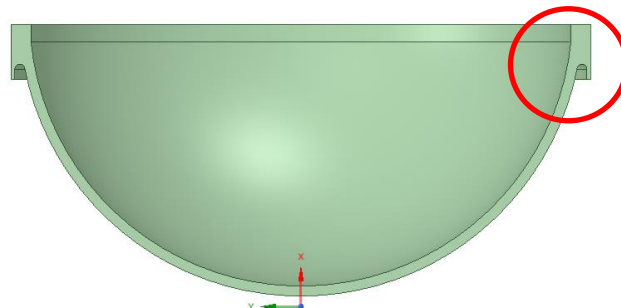
Figura 52: Visão geral do tampo inferior



Fonte: autor (2021)

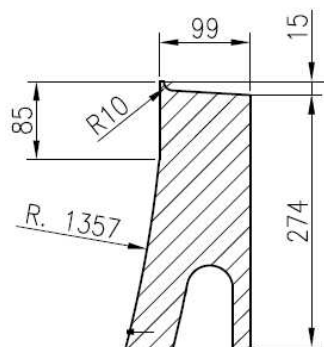
A Figura 54 mostra o detalhe do anel de ligação do tampo inferior com o costado e com a saia de suporte, que está circulado em vermelho na Figura 53.

Figura 53: Corte do tampo inferior



Fonte: autor (2021)

Figura 54: Detalhe do anel de ligação do costado com o tampo inferior



Fonte: autor (2021)

- Suportes

Os suportes (berços metálicos) utilizados no teste hidrostático, conforme Figura 55, foram simplificados na modelagem considerando somente uma chapa curvada com o mesmo diâmetro do costado somente na parte inferior do vaso de pressão, conforme Figura 56.

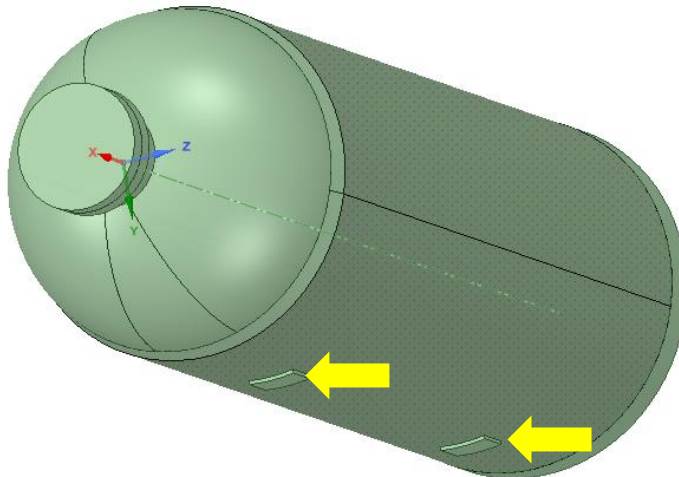
- raio interno de curvatura: 1350 mm
- espessura: 30 mm
- largura: 300 mm
- aço SA 516 grau 70

Figura 55: Visão geral do vaso de pressão sobre os suportes



Fonte: autor (2021)

Figura 56: Visão geral do modelo do vaso de pressão sobre os suportes



Fonte: autor (2021)

Para otimização da simulação do vaso de pressão, o modelo completo do equipamento da Figura 57 teve sua geometria simplificada para somente as partes essenciais do estudo deste trabalho, que pode ser visto na Figura 58 por meio do modelo simplificado. Como o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da tensão em três pontos específicos do equipamento, que se localizam no costado, tampo superior e intersecção do tampo superior com a conexão, estes componentes se mantiveram no modelo simplificado além do tampo inferior e da tampa da conexão.

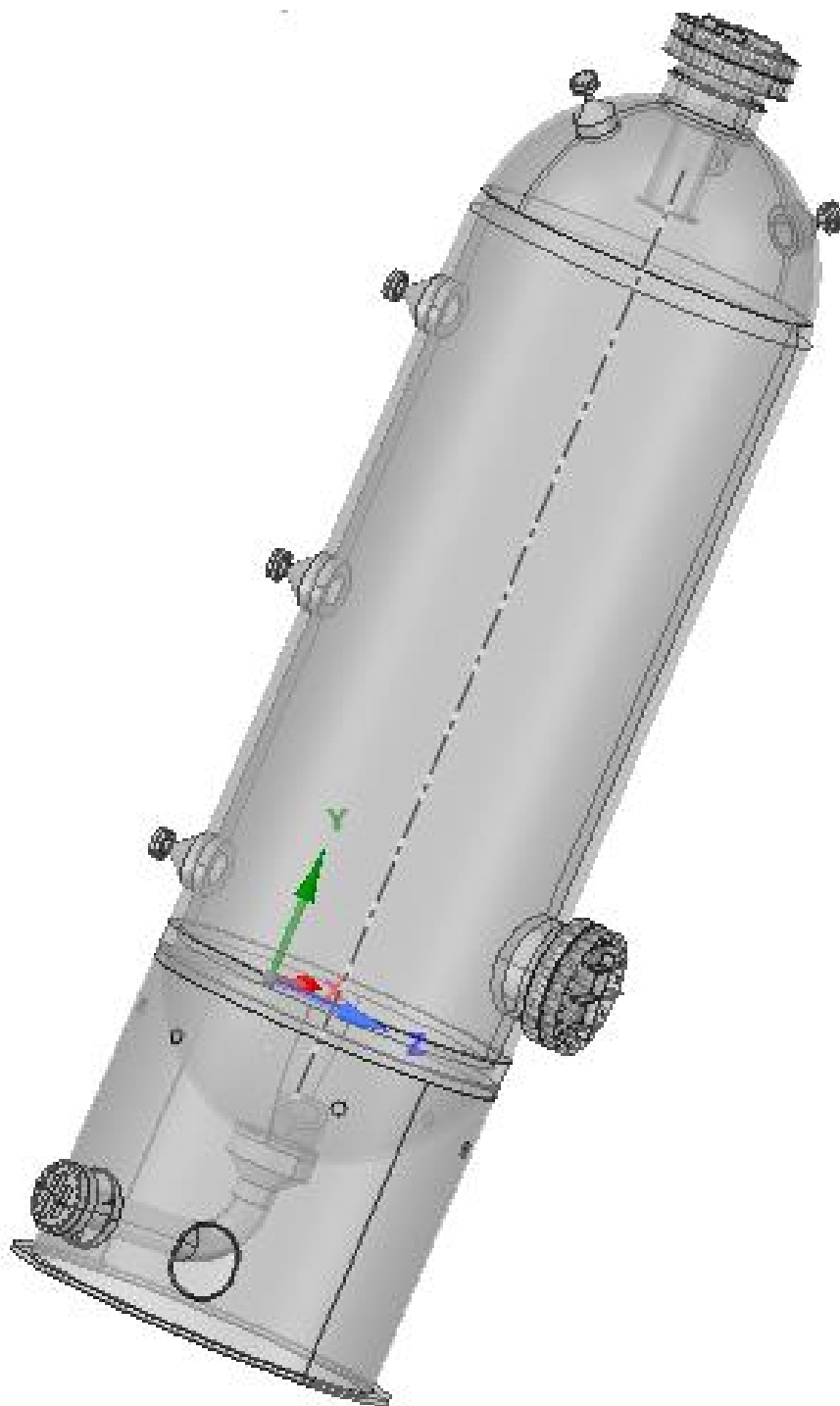
Outras considerações no modelo simplificado foram adotadas em relação ao projeto original do vaso de pressão:

- a parede do tampo superior tem espessura de 47 mm mais 3 mm de revestimento para corrosão, porém no modelo a parede do tampo superior foi modelada com 50 mm de espessura para que se mantivesse a concordância da transição do costado para o tampo superior;

- a parede do costado é dividida em duas partes conectadas por uma solda circunferencial, sendo que uma parte tem espessura de 96 mm mais 3 mm de revestimento para corrosão e a outra parte tem 99 mm de espessura, porém no modelo toda a parede do costado foi modelada como uma única peça com 99 mm de espessura;

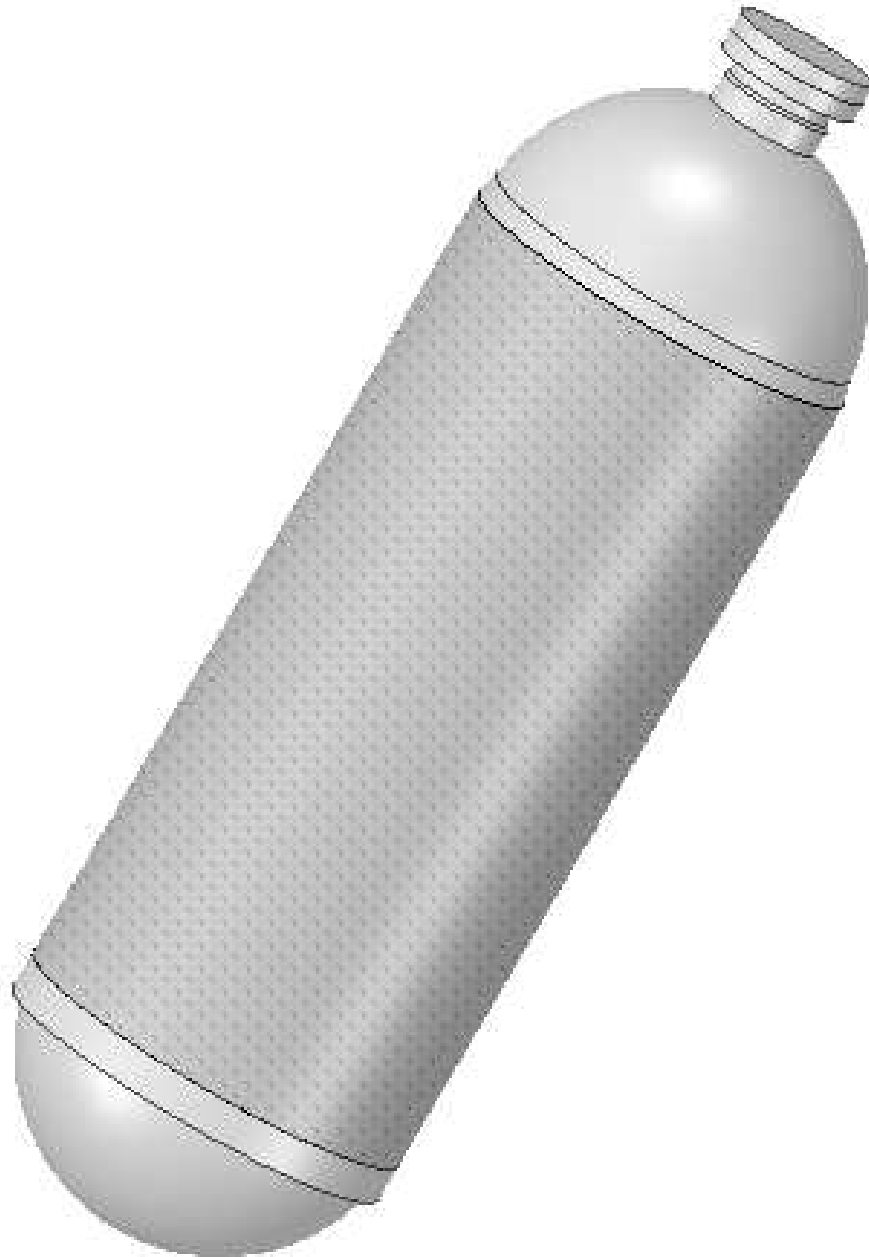
- nenhuma solda foi representada no modelo simplificado.

Figura 57: Visão geral do modelo completo do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

Figura 58: Visão geral do modelo simplificado do vaso de pressão



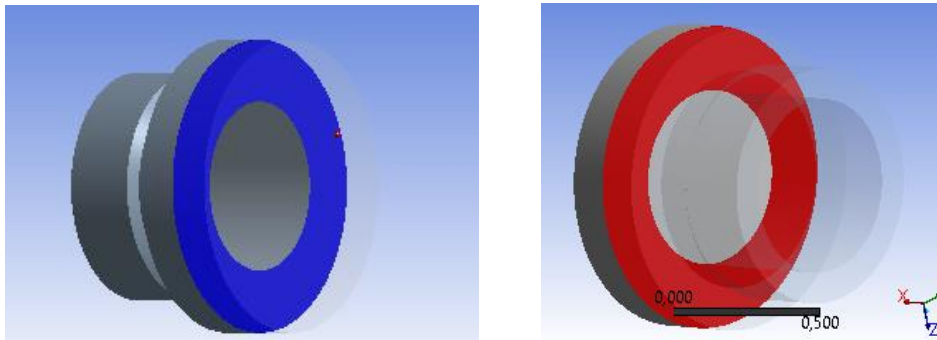
Fonte: autor (2021)

### 3.4.2 Condições de contorno

Após a modelagem do vaso de pressão, foram aplicadas as condições de contorno. No modelo simplificado as áreas de contato entre tampa da conexão e conexão, tampo superior e conexão, tampo superior e costado e costado e tampo inferior foram consideradas do tipo “*bonded*”.

Na Figura 59 observa-se a área de contato da face superior da conexão (azul) com a face inferior da tampa da conexão (vermelho).

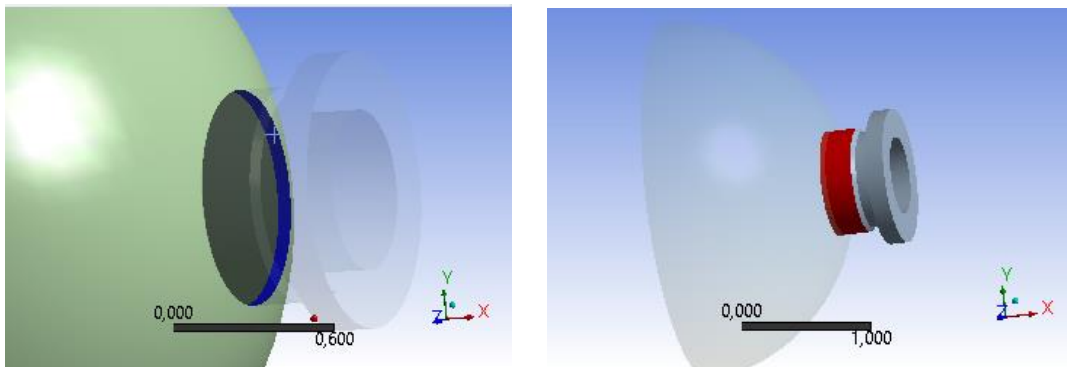
Figura 59: Área de contato entre conexão e tampa da conexão



Fonte: autor (2021)

Na Figura 60 observa-se a área de contato da parede do furo no tampo superior (azul) com a face externa do pescoço da conexão (vermelho).

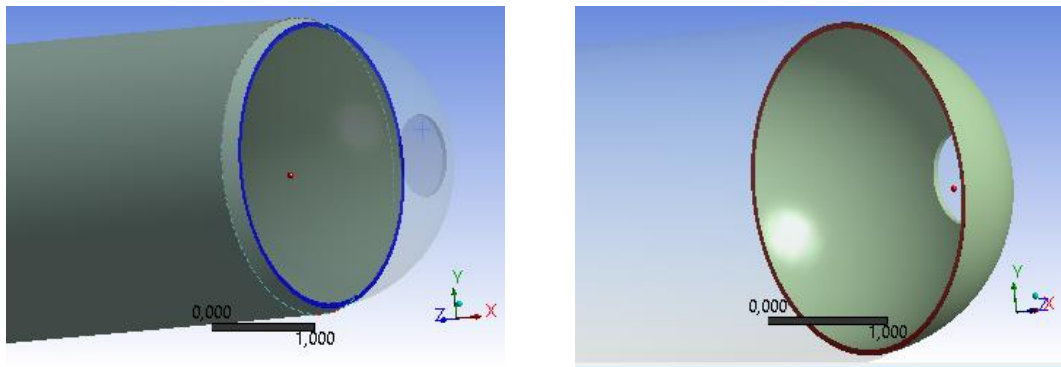
Figura 60: Área de contato entre abertura no tampo superior e a conexão



Fonte: autor (2021)

Na Figura 61 observa-se a área de contato entre a parede do costado (azul) com a parede do tampo superior (vermelho).

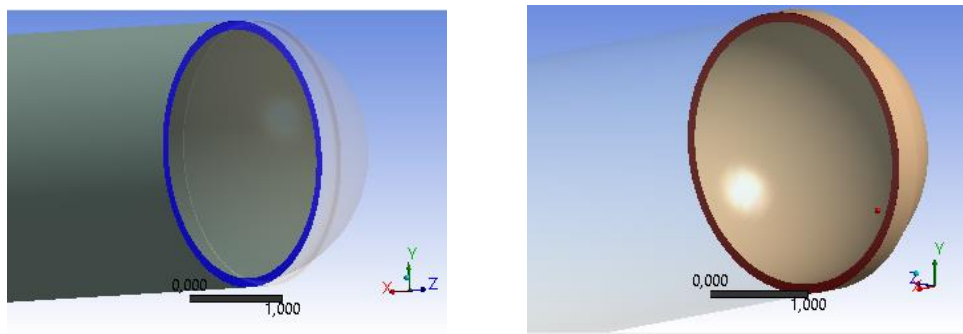
Figura 61: Área de contato entre costado e tampo superior



Fonte: autor (2021)

Na Figura 62 observa-se a área de contato entre a parede do costado (azul) com a parede do tampo inferior (vermelho).

Figura 62: Área de contato entre costado e tampo inferior



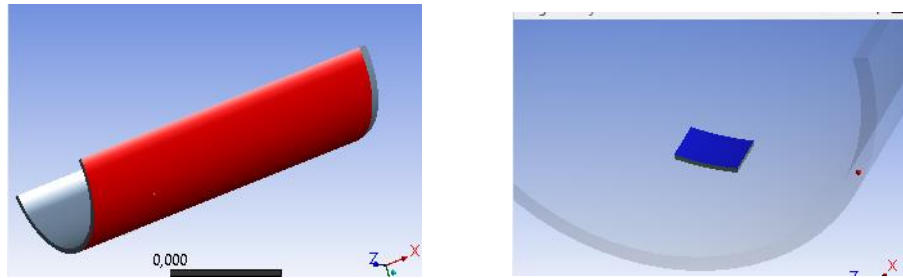
Fonte: autor (2021)

Conforme já mostrado na Figura 55, durante o teste hidrostático o vaso de pressão foi suportado por dois suportes metálicos, com o vaso de pressão simplesmente apoiado nos suportes metálicos e estes fixos no chão.

No modelo simplificado, as áreas de contato do costado com os suportes foram consideradas do tipo “*frictional*” com coeficiente de atrito de 0,1. Na Figura 63 observa-se a área de contato entre a parede do costado (vermelho) com o suporte (azul).



Figura 63: Área de contato entre costado e suportes



Fonte: autor (2021)

Como os suportes estavam fixos no chão, considerou-se que a parte inferior dos suportes tinha a condição *fixed support*, como pode ser visto na Figura 64.

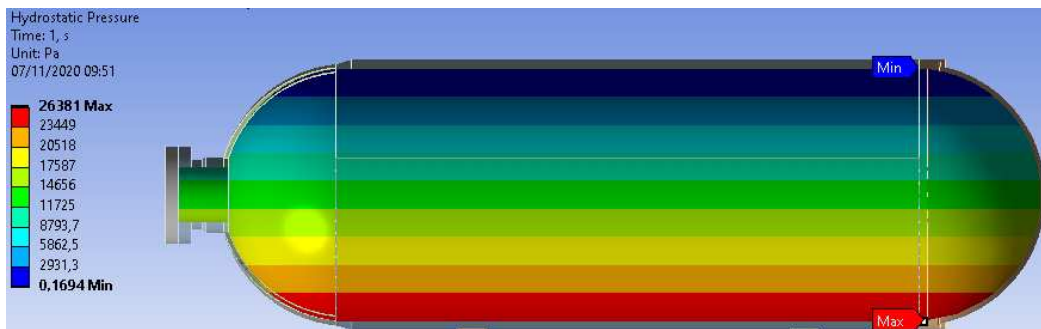
Figura 64: Condição de contorno para os suportes



Fonte: autor (2021)

A pressão hidrostática aplicada pela água no teste hidrostático foi simulada no ANSYS mediante a opção *Hydrostatic Pressure*, na qual se considerou a densidade da água de  $997 \text{ kg/m}^3$  e aceleração da gravidade de  $9,8 \text{ m/s}^2$ , conforme observa-se na Figura 65.

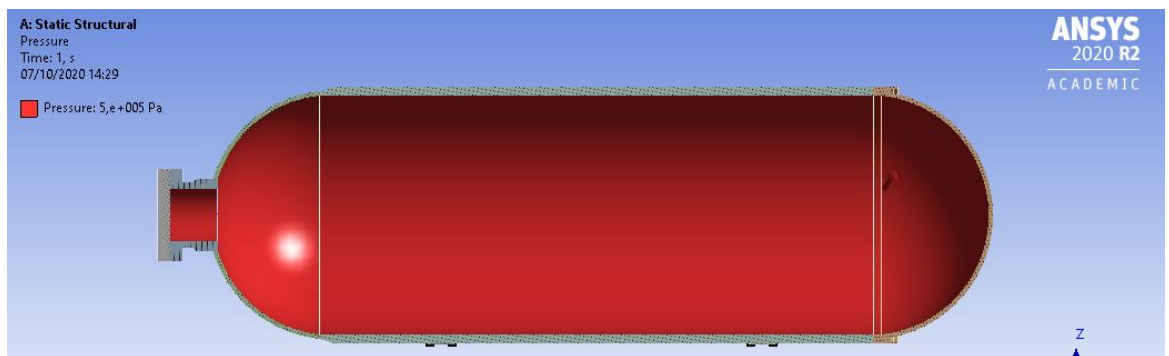
Figura 65: Variação da pressão hidrostática na parede interna



Fonte: autor (2021)

A pressão interna aplicada durante o teste hidrostático foi simulada no *software* ANSYS mediante a opção *Pressure*, na qual a pressão interna foi variada manualmente de 0,5 até 15 MPa, em múltiplos de 0,5, e os resultados anotados para cada simulação. Na Figura 66 observam-se as superfícies internas do vaso de pressão nas quais a pressão interna foi aplicada.

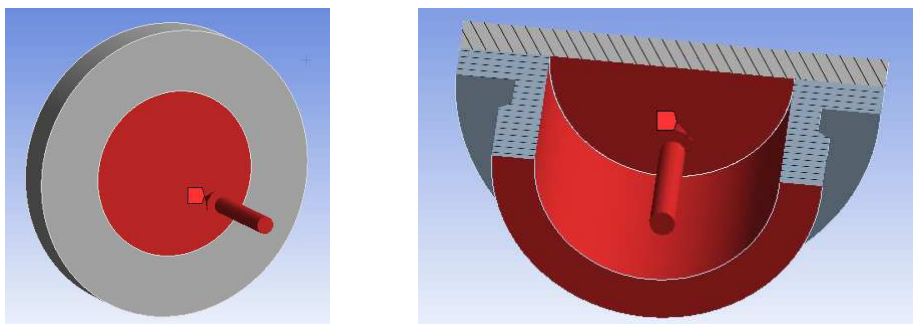
Figura 66: Área de aplicação da pressão interna



Fonte: autor (2021)

Em relação à tampa da conexão, somente a superfície interna limitada pelo diâmetro interno da conexão recebeu a aplicação da pressão interna, como observado na Figura 67.

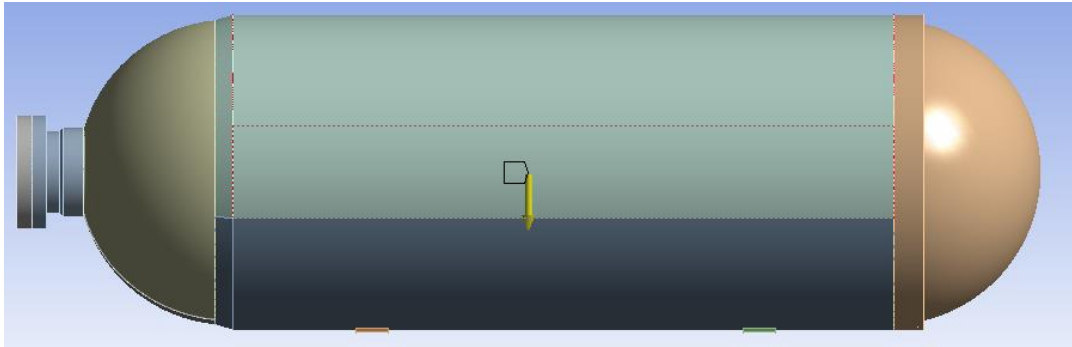
Figura 67: Área de aplicação da pressão interna na tampa da conexão



Fonte: autor (2021)

Para a consideração do peso do equipamento, foi inserida a gravidade conforme Figura 68.

Figura 68: Orientação da gravidade



Fonte: autor (2021)

Os aços utilizados na análise do vaso de pressão foram criados com base no material *structure steel* da biblioteca do ANSYS, com alterações somente nas seguintes propriedades conforme projetos e norma:

- SA 516 grau 70

Tensão de escoamento: 38 ksi (262 MPa)

Tensão de ruptura: 70 ksi (482 MPa)

- SA 350 lf2 class 1

Tensão de escoamento: 36 ksi (248 MPa)

Tensão de ruptura: 70 ksi (482 MPa)

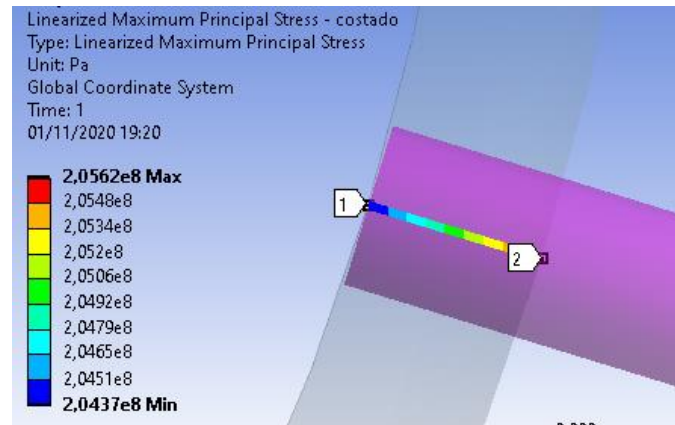
- coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade igual a 200 GPa.

### 3.4.3 Linearização da tensão

A análise pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS, por meio da linearização de tensão, possibilita a decomposição da tensão atuante ao longo da espessura da parede do vaso de pressão em tensão de membrana, flexão e pico para modelos desenvolvidos como elementos sólidos, que é o caso deste trabalho.

A linearização de tensão pode ser aplicada em uma linha de classificação de tensão (SCL – *stress classification line*) ou em um plano de classificação de tensão (SCP – *stress classification plane*). Neste trabalho foi aplicada a linha de classificação de tensão, conforme exemplo da Figura 69.

Figura 69: Linearização da tensão circunferencial na parede do costado



Fonte: autor (2021)

Segundo Figueiredo (2021), as linhas de classificação de tensão são os caminhos escolhidos pelo analista para linearizar e separar a distribuição de tensões real obtida em tensões de membrana e flexão.

Como resultado da linearização de tensão, o *software* ANSYS apresenta uma tabela com os valores das tensões separados, conforme Figura 70.

Figura 70: Resultado da linearização da tensão circunferencial no ANSYS

Length [m]	Membrane [Pa]	Bending [Pa]	Membrane+Bending [Pa]	Peak [Pa]	Total [Pa]
0.	2,0499e+008	-6,1996e+005	2,0437e+008	1362.	2,0437e+008
2,0625e-003	2,0499e+008	-5,9413e+005	2,044e+008	1141,8	2,044e+008
4,125e-003	2,0499e+008	-5,6829e+005	2,0442e+008	932,85	2,0442e+008
6,1875e-003	2,0499e+008	-5,4246e+005	2,0445e+008	735,31	2,0445e+008
8,25e-003	2,0499e+008	-5,1663e+005	2,0448e+008	549,46	2,0448e+008
1,0313e-002	2,0499e+008	-4,908e+005	2,045e+008	375,73	2,045e+008
1,2375e-002	2,0499e+008	-4,6497e+005	2,0453e+008	215.	2,0453e+008
1,4437e-002	2,0499e+008	-4,3914e+005	2,0455e+008	69,081	2,0455e+008
1,65e-002	2,0499e+008	-4,1331e+005	2,0458e+008	-57,521	2,0458e+008
1,8563e-002	2,0499e+008	-3,8747e+005	2,0461e+008	-151,08	2,0461e+008
2,0625e-002	2,0499e+008	-3,6164e+005	2,0463e+008	-164,71	2,0463e+008
2,2687e-002	2,0499e+008	-3,3581e+005	2,0466e+008	-30,474	2,0466e+008
2,475e-002	2,0499e+008	-3,0998e+005	2,0468e+008	191,49	2,0468e+008

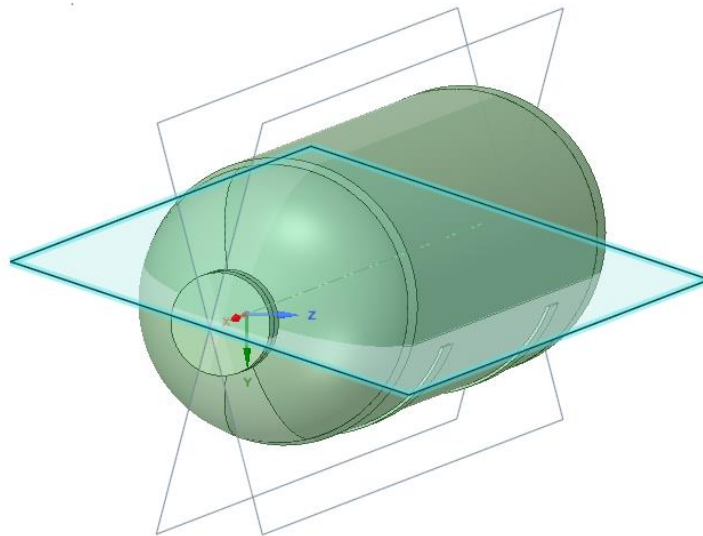
Fonte: autor (2021)

Conforme Rosseto (2016), as tensões, em geral, não são lineares, mas ao longo desta linha as tensões são linearizadas para se obter as tensões de membrana e flexão.

As tensões de membrana são constantes ao longo da espessura da parede, enquanto as tensões de flexão são lineares, conforme explicado no item 2.3.

Para facilitar a aplicação da linearização da tensão, foi realizada a repartição do costado e do tampo superior em planos que continham os três pontos específicos que seriam analisados pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS. Esses planos seccionaram o costado e o tampo superior passando pelo eixo central de cada componente. Na Figura 71 são mostrados os três planos, sendo o plano destacado em azul o plano que secciona o costado e os outros dois planos que seccionam o tampo.

Figura 71: Planos para secção do costado e tampo superior



Fonte: autor (2021)

#### 3.4.4 Geração da malha

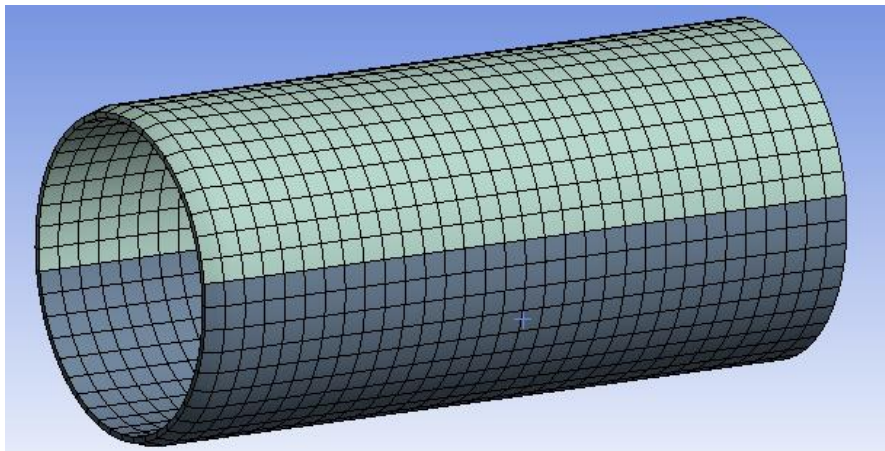
A geração da malha respeitou a limitação de 32 mil nós do *software* ANSYS versão estudante utilizada neste trabalho. Houve uma diferenciação na malha para alguns componentes do vaso de pressão que eram mais importantes, como o costado, o tampo superior e a conexão, porém muitas ferramentas de refinamento da malha não puderam ser aplicadas por conta da limitação do número de nós.

Para elaborar essa diferenciação na malha, foi utilizada a opção *body sizing*, na qual se determina o tamanho do elemento da malha. O vaso de pressão foi dividido em três partes e para cada parte aplicou-se o *body sizing*, determinando um tamanho de elemento diferente para cada uma das três partes.

- costado: tamanho de elemento igual a 0,2 m
- tampo superior e conexão: tamanho de elemento igual a 0,08 m
- tampa da conexão, tampo inferior e suportes: tamanho de elemento igual a 0,4 m

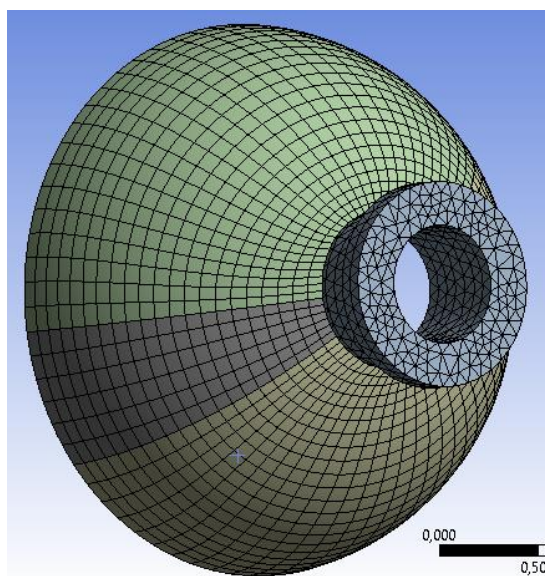
Após a aplicação do *body sizing*, a malha foi gerada com 29.799 nós e 7.315 elementos no total, e o resultado é observado nas Figuras 72, 73 e 74.

Figura 72: Malha gerada no costado



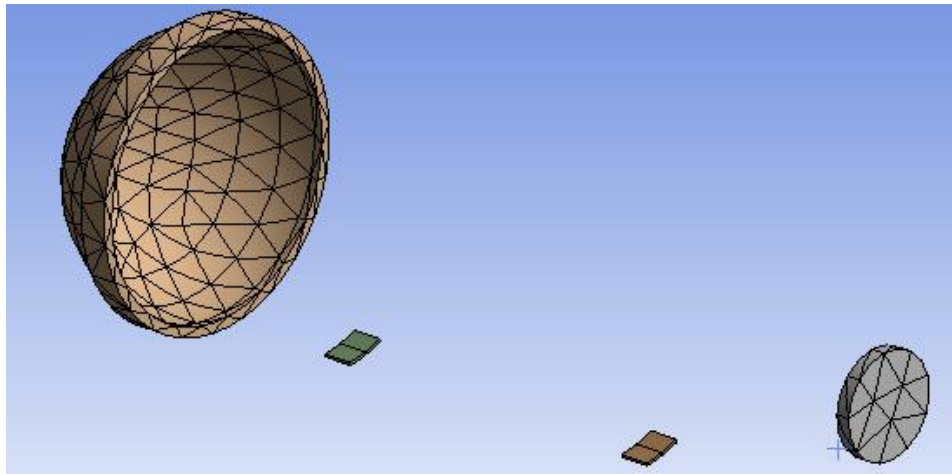
Fonte: autor (2021)

Figura 73: Malha gerada no tampo superior e conexão



Fonte: autor (2021)

Figura 74: Malha gerada no tanpo inferior, suportes e tampa da conexão

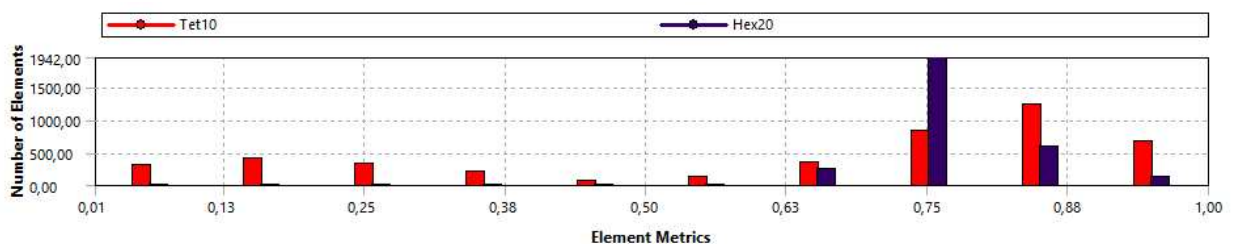


Fonte: autor (2021)

A opção *Element Quality* (Qualidade do Elemento) fornece uma métrica de qualidade composta que varia entre 0 e 1. Esta métrica é baseada na razão entre o volume da soma do quadrado dos comprimentos das arestas para elementos 2D quad / tri, ou a raiz quadrada do cubo da soma do quadrado dos comprimentos das arestas de elementos 3D. Um valor de 1 indica um cubo perfeito ou quadrado, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume de zero ou negativo. (AZEVEDO 2016)

A Figura 75 mostra o gráfico da métrica *Element Quality* do ANSYS para a malha do modelo deste trabalho.

Figura 75: Qualidade do elemento para a malha do modelo



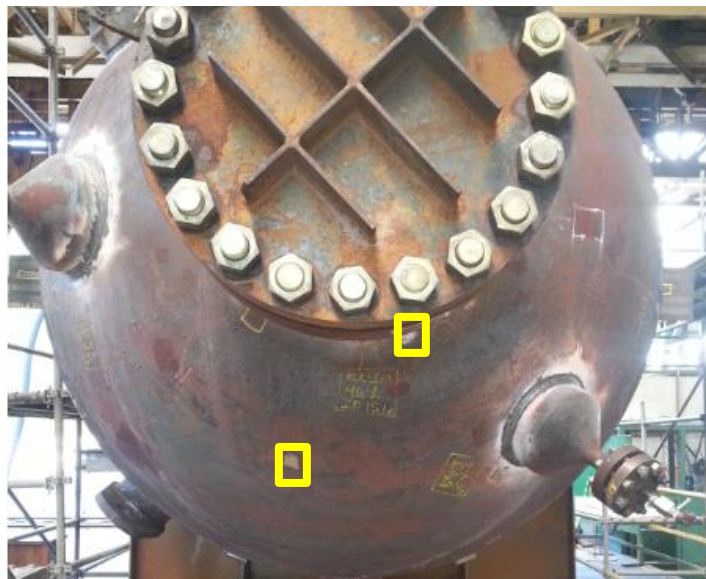
Fonte: autor (2021)

### 3.4.5 Localização dos três pontos específicos no modelo

Para a obtenção dos resultados para as tensões longitudinal e circunferencial atuantes no modelo computacional, foram localizados os mesmos três pontos específicos do teste hidrostático.

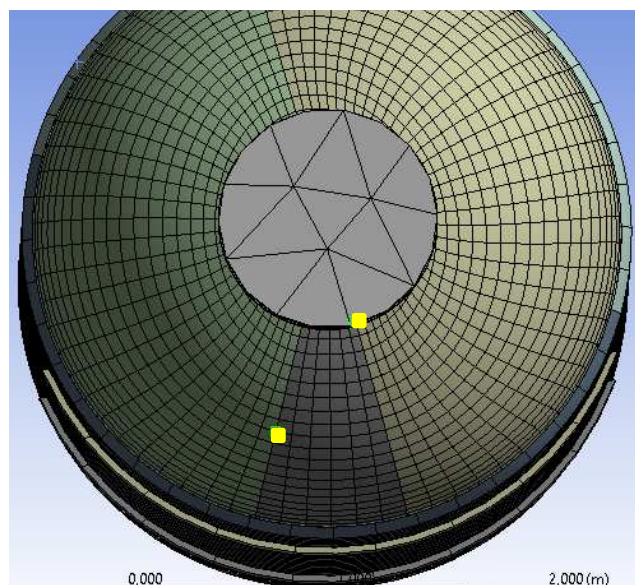
Na Figura 76 observa-se os pontos específicos que estão localizados no tampo superior e na intersecção do tampo superior com a conexão no vaso de pressão e na Figura 77 observa-se os mesmos pontos no modelo. O ponto do tampo superior está distante de descontinuidade geométrica, enquanto o ponto da intersecção se encontra na região de descontinuidade geométrica.

Figura 76: Localização dos pontos específicos no tampo superior do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

Figura 77: Localização dos pontos específicos no tampo superior do modelo



Fonte: autor (2021)



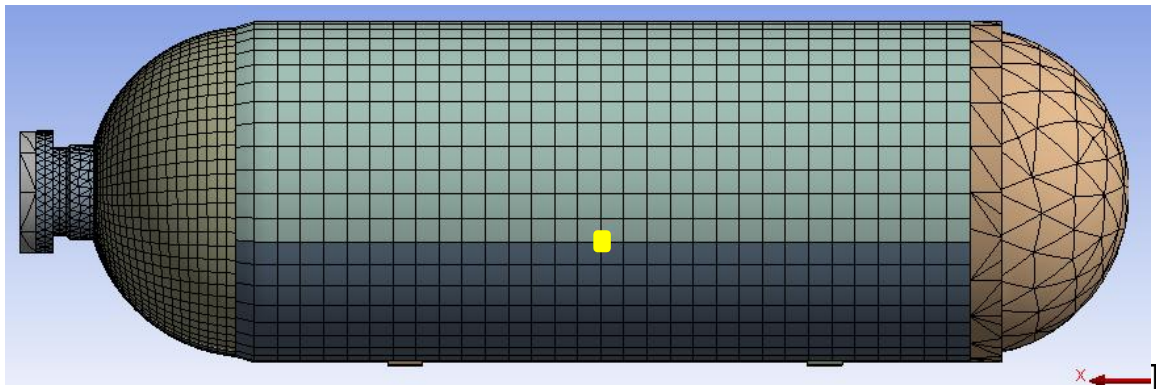
Na Figura 78 observa-se o ponto específico que está localizado no costado e na Figura 79 observa-se o mesmo ponto no modelo, sendo este ponto longe de descontinuidade geométrica.

Figura 78: Localização do ponto específico no costado do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

Figura 79: Localização do ponto específico no costado do modelo



Fonte: autor (2021)

Os resultados da análise pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS foram apresentados no Capítulo 4.

### 3.4.6 Obtenção das tensões longitudinal e circunferencial

Além da linearização da tensão, a obtenção das tensões por meio do MEF no *software* ANSYS também ocorreu pela opção *Maximum Principal Stress* e *Middle Principal Stress*.

Para o costado, a *Maximum Principal Stress* correspondeu a tensão circunferencial e a *Middle Principal Stress* correspondeu a tensão longitudinal e para o tampo superior e a intersecção, a *Maximum Principal Stress* correspondeu a tensão circunferencial 90° e a *Middle Principal Stress* correspondeu a tensão circunferencial 0°.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados das quatro análises aplicadas no estudo do comportamento das tensões nas paredes do vaso de pressão, e os resultados foram discutidos conforme apresentados no decorrer do capítulo.

Para facilitar o entendimento das discussões e resultados foram feitas as seguintes considerações:

- as quatro análises são chamadas de teoria, que se refere à teoria de membrana, de ASME, que se refere às formulações do código ASME, de experimental, que se refere ao teste hidrostático, e de MEF, que se refere ao método dos elementos finitos por meio do *software* ANSYS;

- ponto específico é o ponto onde foi posicionado o extensômetro no vaso de pressão durante o teste hidrostático;

- os três pontos específicos localizam-se no lado externo da parede do vaso de pressão;

- os pontos específicos do costado e do tampo superior localizam-se em região longe de descontinuidade geométrica;

- o ponto específico da intersecção do tampo superior com a conexão localiza-se em região próxima de descontinuidade geométrica.

### 4.1 Análises individuais

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados de cada uma das quatro análises individualmente para as tensões longitudinal e circunferencial em cada um dos três pontos específicos para todas as pressões de 0,5 até 15 MPa.

#### 4.1.1 Teoria de membrana

Com a aplicação da metodologia apresentada no item 3.3.1 foram obtidos os resultados das Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	6,79	6,79	5,5	74,64	74,64	10,5	142,49	142,49
1,0	13,57	13,57	6,0	81,42	81,42	11,0	149,27	149,27
1,5	20,36	20,36	6,5	88,21	88,21	11,5	156,06	156,06
2,0	27,14	27,14	7,0	94,99	94,99	12,0	162,84	162,84
2,5	33,93	33,93	7,5	101,78	101,78	12,5	169,63	169,63
3,0	40,71	40,71	8,0	108,56	108,56	13,0	176,41	176,41
3,5	47,50	47,50	8,5	115,35	115,35	13,5	183,20	183,20
4,0	54,28	54,28	9,0	122,13	122,13	14,0	189,98	189,98
4,5	61,07	61,07	9,5	128,92	128,92	14,5	196,77	196,77
5,0	67,85	67,85	10,0	135,70	135,70	15,0	203,55	203,55

Fonte: autor (2021)

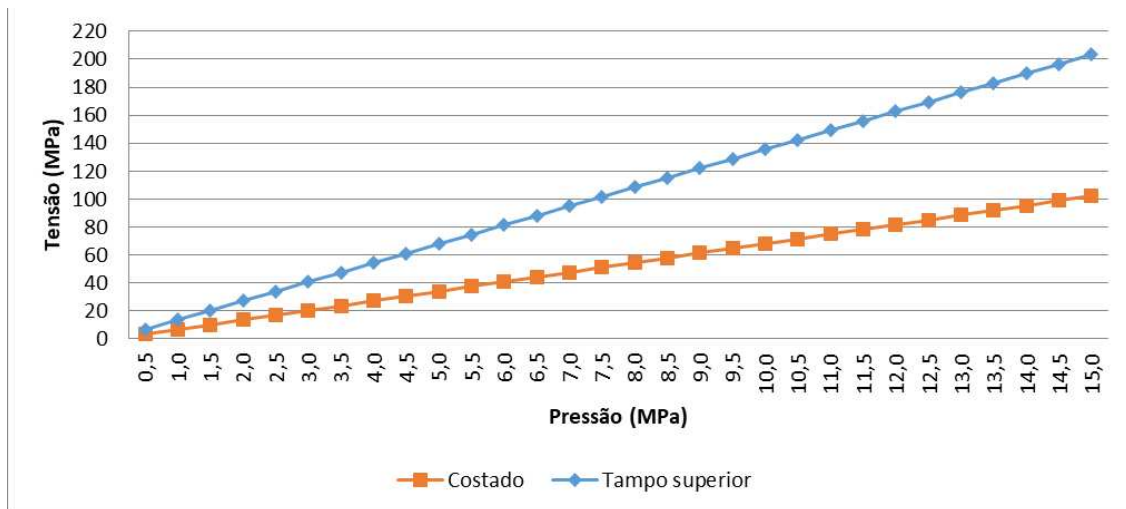
Tabela 6: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	3,41	6,82	5,5	37,50	75,00	10,5	71,59	143,18
1,0	6,82	13,64	6,0	40,91	81,82	11,0	75,00	150,00
1,5	10,23	20,45	6,5	44,32	88,64	11,5	78,41	156,82
2,0	13,64	27,27	7,0	47,73	95,45	12,0	81,82	163,64
2,5	17,05	34,09	7,5	51,14	102,27	12,5	85,23	170,45
3,0	20,45	40,91	8,0	54,55	109,09	13,0	88,64	177,27
3,5	23,86	47,73	8,5	57,95	115,91	13,5	92,05	184,09
4,0	27,27	54,55	9,0	61,36	122,73	14,0	95,45	190,91
4,5	30,68	61,36	9,5	64,77	129,55	14,5	98,86	197,73
5,0	34,09	68,18	10,0	68,18	136,36	15,0	102,27	204,55

Fonte: autor (2021)

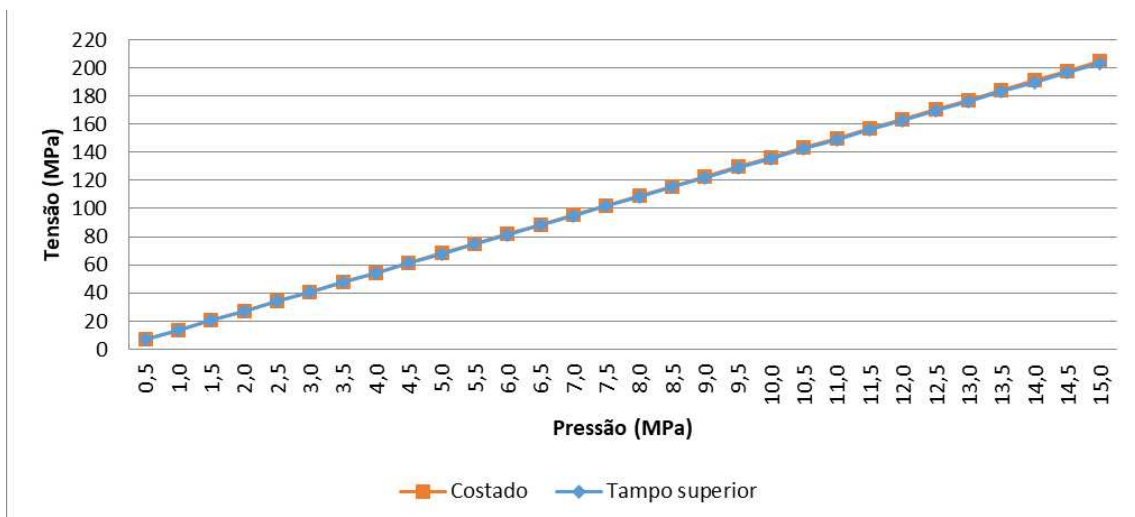
Para melhor visualização dos resultados das Tabelas 5 e 6 foram elaborados os gráficos das Figuras 80 e 81.

Figura 80: Tensões longitudinal e circunferencial 0° da teoria de membrana



Fonte: autor (2021)

Figura 81: Tensões circunferencial e circunferencial 90° da teoria de membrana



Fonte: autor (2021)

Os resultados mostram o que já era esperado para a teoria de membrana, no costado o valor da tensão circunferencial sendo o dobro do valor da tensão longitudinal e no tampo superior as tensões circunferenciais 0° e 90° com valores iguais. Como as equações da teoria de membrana são válidas somente em regiões distantes de descontinuidade geométrica, as tensões na região da intersecção não puderam ser calculadas e comparadas com as demais tensões.

#### 4.1.2 Formulações do código ASME

Com a aplicação da metodologia do Item 3.3.2 foram obtidos os resultados das Tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	6,66	6,66	5,5	73,28	73,28	10,5	139,91	139,91
1,0	13,32	13,32	6,0	79,95	79,95	11,0	146,57	146,57
1,5	19,99	19,99	6,5	86,61	86,61	11,5	153,23	153,23
2,0	26,65	26,65	7,0	93,27	93,27	12,0	159,89	159,89
2,5	33,31	33,31	7,5	99,93	99,93	12,5	166,56	166,56
3,0	39,97	39,97	8,0	106,60	106,60	13,0	173,22	173,22
3,5	46,64	46,64	8,5	113,26	113,26	13,5	179,88	179,88
4,0	53,30	53,30	9,0	119,92	119,92	14,0	186,54	186,54
4,5	59,96	59,96	9,5	126,58	126,58	14,5	193,21	193,21
5,0	66,62	66,62	10,0	133,25	133,25	15,0	199,87	199,87

Fonte: autor (2021)

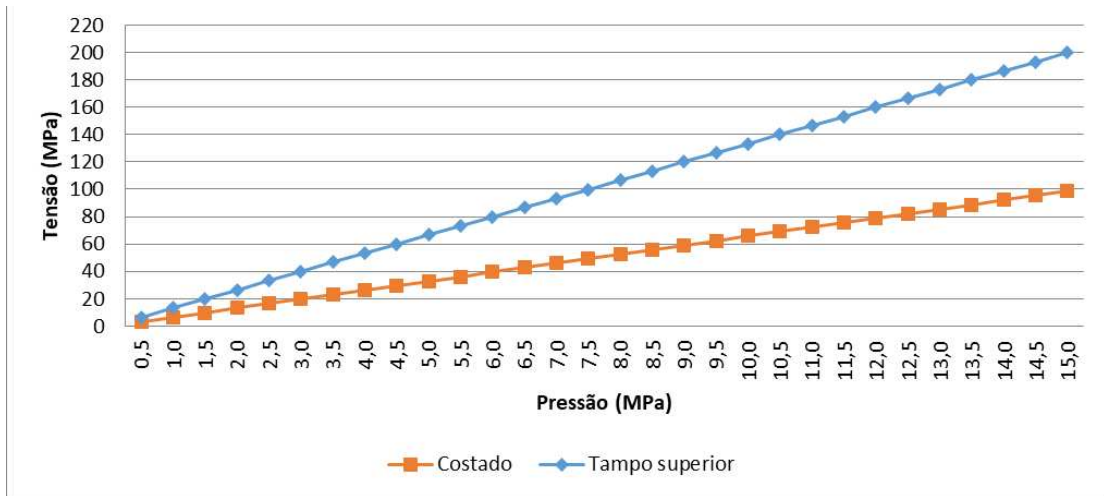
Tabela 8: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	3,29	6,82	5,5	36,17	75,00	10,5	69,06	143,18
1,0	6,58	13,64	6,0	39,46	81,82	11,0	72,35	150,00
1,5	9,87	20,45	6,5	42,75	88,64	11,5	75,64	156,82
2,0	13,15	27,27	7,0	46,04	95,45	12,0	78,92	163,64
2,5	16,44	34,09	7,5	49,33	102,27	12,5	82,21	170,45
3,0	19,73	40,91	8,0	52,62	109,09	13,0	85,50	177,27
3,5	23,02	47,73	8,5	55,90	115,91	13,5	88,79	184,09
4,0	26,31	54,55	9,0	59,19	122,73	14,0	92,08	190,91
4,5	29,60	61,36	9,5	62,48	129,55	14,5	95,37	197,73
5,0	32,89	68,18	10,0	65,77	136,36	15,0	98,66	204,55

Fonte: autor (2021)

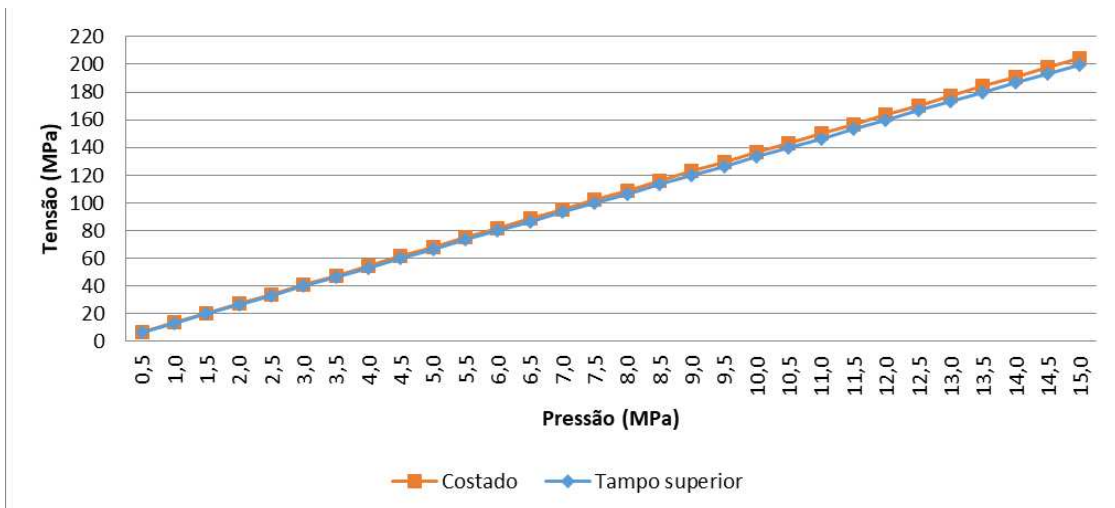
Para melhor visualização dos resultados das Tabelas 7 e 8, foram elaborados os gráficos das Figuras 82 e 83.

Figura 82: Tensões longitudinal e circunferencial 0° do ASME



Fonte: autor (2021)

Figura 83: Tensões circunferencial e circunferencial 90° do ASME



Fonte: autor (2021)

Os resultados mostram o que já era esperado para as formulações do código ASME, no costado o valor da tensão circunferencial sendo o dobro do valor da tensão longitudinal e no tampo superior as tensões circunferenciais 0° e 90° com valores iguais. Como as formulações do código ASME são válidas somente em regiões distantes de descontinuidade geométrica, as tensões na região da intersecção não puderam ser calculadas e comparadas com as demais tensões.

### 4.1.3 Análise experimental

Com a aplicação da metodologia do Item 3.2 com base nas deformações obtidas das Tabelas 2, 3 e 4, foram obtidos os resultados das Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	2,65	2,90	5,5	56,44	57,46	10,5	109,14	111,80
1,0	7,59	7,96	6,0	61,77	62,86	11,0	112,83	115,53
1,5	11,88	12,24	6,5	67,75	68,99	11,5	118,44	121,71
2,0	17,03	17,38	7,0	74,08	75,39	12,0	124,00	127,57
2,5	23,19	23,60	7,5	79,10	80,65	12,5	129,20	132,91
3,0	29,43	30,01	8,0	83,22	85,02	13,0	135,30	139,21
3,5	35,11	35,54	8,5	88,37	90,32	13,5	139,90	144,05
4,0	40,47	40,95	9,0	94,17	96,34	14,0	144,67	149,07
4,5	45,75	46,53	9,5	99,07	101,37	14,5	150,90	155,40
5,0	50,78	51,59	10,0	104,31	106,70	15,0	155,90	160,61

Fonte: autor (2021)

Tabela 10: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	1,48	3,11	5,5	31,08	62,39	10,5	58,65	119,80
1,0	4,28	8,90	6,0	34,36	68,47	11,0	61,03	123,97
1,5	5,97	13,43	6,5	40,94	76,50	11,5	64,01	129,93
2,0	9,09	19,33	7,0	43,42	82,70	12,0	67,60	136,51
2,5	13,35	26,45	7,5	45,69	88,06	12,5	70,39	142,50
3,0	17,13	33,39	8,0	47,07	92,39	13,0	73,40	148,95
3,5	20,07	39,29	8,5	48,88	97,42	13,5	75,85	154,06
4,0	22,76	45,05	9,0	52,15	103,95	14,0	78,33	159,21
4,5	25,59	50,85	9,5	54,31	108,93	14,5	81,56	165,99
5,0	28,10	56,25	10,0	56,88	114,58	15,0	84,18	171,35

Fonte: autor (2021)



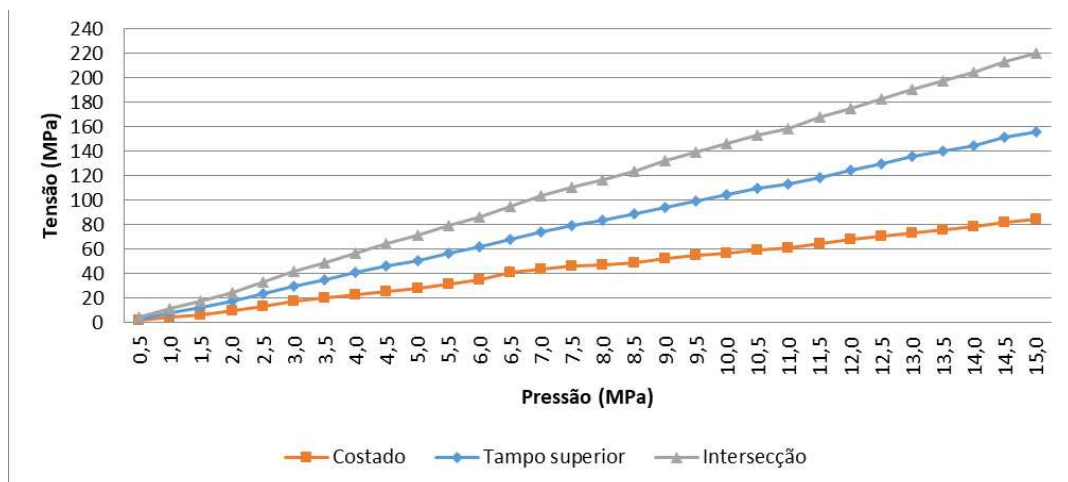
Tabela 11: Tensões circunferenciais 0° e 90° para a intersecção

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	3,99	4,67	5,5	79,06	89,30	10,5	153,28	174,25
1,0	11,13	12,62	6,0	86,35	97,58	11,0	158,50	180,26
1,5	17,43	19,74	6,5	94,56	106,95	11,5	167,34	190,45
2,0	24,56	27,74	7,0	103,03	116,51	12,0	174,79	198,94
2,5	32,73	36,80	7,5	110,40	124,94	12,5	182,21	207,50
3,0	41,38	46,45	8,0	116,55	132,09	13,0	190,65	217,05
3,5	48,92	54,91	8,5	123,74	140,34	13,5	197,37	224,83
4,0	56,39	63,43	9,0	132,04	150,12	14,0	204,05	232,37
4,5	64,29	72,57	9,5	138,81	157,60	14,5	213,03	242,81
5,0	71,18	80,36	10,0	146,30	166,17	15,0	219,82	250,56

Fonte: autor (2021)

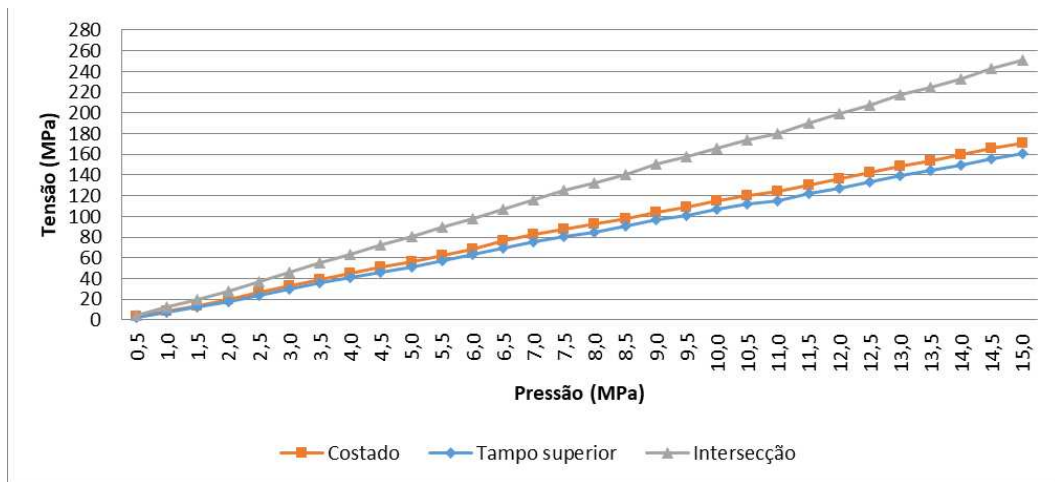
Para melhor visualização dos resultados das Tabelas 9, 10 e 11 foram elaborados os gráficos das Figuras 84 e 85.

Figura 84: Tensões longitudinal e circunferencial 0° experimentais



Fonte: autor (2021)

Figura 85: Tensões circunferencial e circunferencial 90° experimentais



Fonte: autor (2021)

Quando se comparou os valores experimentais das tensões circunferenciais 0° e 90° do tampo superior com a intersecção, observou-se que os valores da intersecção são maiores que os valores do tampo, na média 41% para a tensão circunferencial 0° e 56% para a tensão circunferencial 90°, mostrando que na intersecção do tampo superior com a conexão, região próxima de descontinuidade geométrica, as tensões de flexão têm valores consideráveis que alteram o comportamento das tensões nesta região.

#### 4.1.4 Método dos elementos finitos no *software* ANSYS

O *software* ANSYS é uma ferramenta poderosa e que disponibiliza muitas possibilidades de resultados na análise pelo método dos elementos finitos.

##### 4.1.4.1 Tensões nos três pontos específicos

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados da análise pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS para as tensões longitudinal e circunferencial nos três pontos específicos. Com a aplicação da metodologia do Item 3.4 para a obtenção das tensões longitudinal e circunferencial pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS, foram obtidos os resultados das Tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12: Tensões circunferenciais 0° e 90° para o tampo superior

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	5,55	7,99	5,5	70,21	72,79	10,5	134,92	137,63
1,0	12,01	14,46	6,0	76,69	79,27	11,0	141,38	144,12
1,5	18,47	20,94	6,5	83,16	85,75	11,5	147,85	150,61
2,0	24,93	27,42	7,0	89,63	92,24	12,0	154,32	157,09
2,5	31,39	33,90	7,5	96,10	98,72	12,5	160,79	163,58
3,0	37,85	40,38	8,0	102,57	105,20	13,0	167,26	170,07
3,5	44,32	46,86	8,5	109,04	111,69	13,5	173,73	176,56
4,0	50,79	53,34	9,0	115,51	118,17	14,0	180,20	183,05
4,5	57,27	59,83	9,5	121,98	124,65	14,5	186,67	189,54
5,0	63,74	66,31	10,0	128,45	131,14	15,0	193,14	196,03

Fonte: autor (2021)

Tabela 13: Tensões longitudinal e circunferencial para o costado

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	8,45	13,61	5,5	41,26	79,81	10,5	74,06	146,02
1,0	11,73	20,24	6,0	44,54	86,43	11,0	77,34	152,64
1,5	15,01	26,86	6,5	47,82	93,05	11,5	80,61	159,26
2,0	18,29	33,48	7,0	51,10	99,67	12,0	83,88	165,89
2,5	21,57	40,10	7,5	54,38	106,29	12,5	87,16	172,51
3,0	24,85	46,72	8,0	57,66	112,91	13,0	90,44	179,13
3,5	28,14	53,34	8,5	60,94	119,53	13,5	93,71	185,75
4,0	31,42	59,95	9,0	64,22	126,15	14,0	96,99	192,38
4,5	34,70	66,57	9,5	67,50	132,78	14,5	100,26	199,00
5,0	37,98	73,19	10,0	70,78	139,40	15,0	103,54	205,62

Fonte: autor (2021)

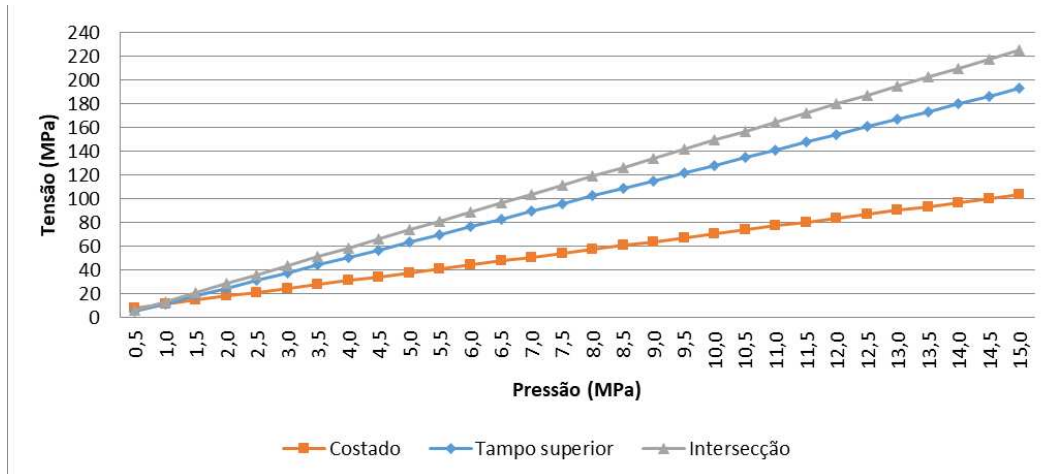
Tabela 14: Tensões circunferenciais 0° e 90° para a intersecção

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}0^\circ}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}90^\circ}$ (MPa)
0,5	6,19	9,66	5,5	81,49	101,87	10,5	157,22	194,06
1,0	13,73	18,87	6,0	89,02	111,09	11,0	164,93	203,19
1,5	21,26	28,08	6,5	96,55	120,32	11,5	172,51	212,37
2,0	28,79	37,30	7,0	104,07	129,54	12,0	180,08	221,54
2,5	36,32	46,52	7,5	111,60	138,76	12,5	187,64	230,72
3,0	43,85	55,74	8,0	119,13	147,99	13,0	195,20	239,91
3,5	51,38	64,97	8,5	126,67	157,21	13,5	202,75	249,09
4,0	58,91	74,19	9,0	134,23	166,44	14,0	210,30	258,28
4,5	66,44	83,42	9,5	141,83	175,70	14,5	217,85	267,47
5,0	73,97	92,64	10,0	149,52	184,92	15,0	225,40	276,65

Fonte: autor (2021)

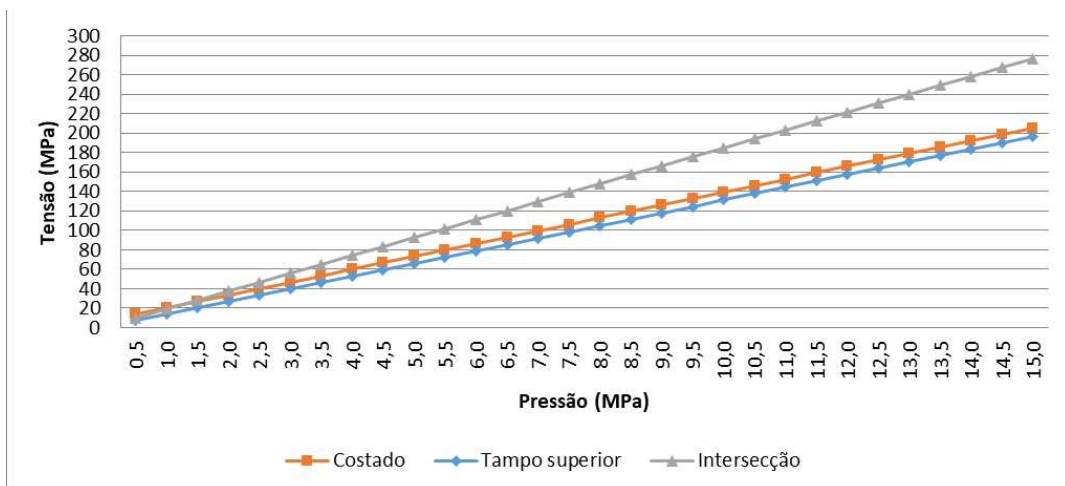
Para melhor visualização dos resultados das Tabelas 12, 13 e 14 foram elaborados os gráficos das Figuras 86 e 87.

Figura 86: Tensões longitudinal e circunferencial 0° pelo MEF



Fonte: autor (2021)

Figura 87: Tensões circunferencial e circunferencial 90° pelo MEF



Fonte: autor (2021)

Quando se comparou os valores MEF das tensões circunferenciais 0° e 90° do tampo superior com a intersecção, observou-se que os valores da intersecção são maiores que os valores do tampo, na média 15% para a tensão circunferencial 0° e 39% para a tensão circunferencial 90°, mostrando que na intersecção do tampo superior com a conexão, região próxima de descontinuidade geométrica, as tensões

de flexão têm valores consideráveis que alteram o comportamento das tensões nesta região.

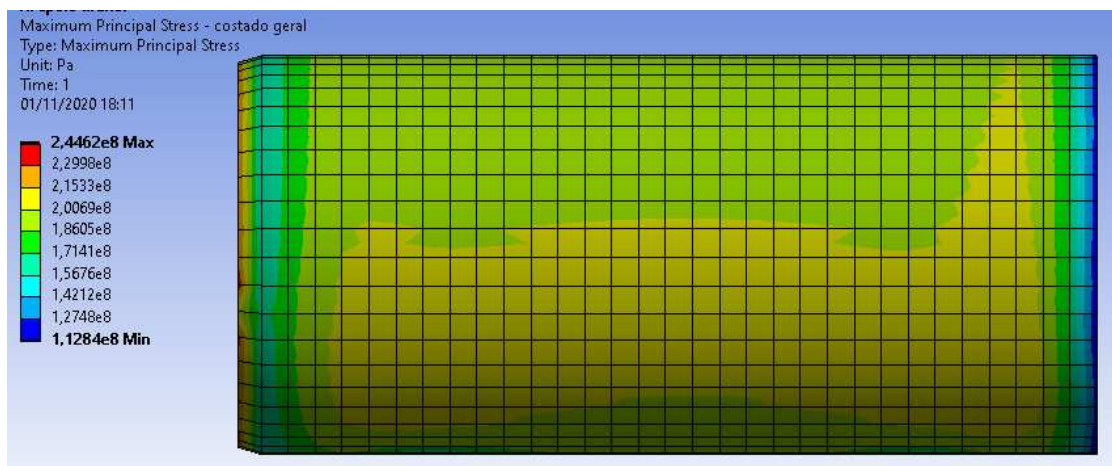
#### 4.1.4.2 Tensões no vaso de pressão na pressão de teste hidrostático

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados da análise pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS da tensão principal máxima para o vaso de pressão na pressão de teste hidrostático de 15 MPa para o costado, para o tempo superior e para o vaso de pressão como um todo.

##### 4.1.4.2.1 Costado

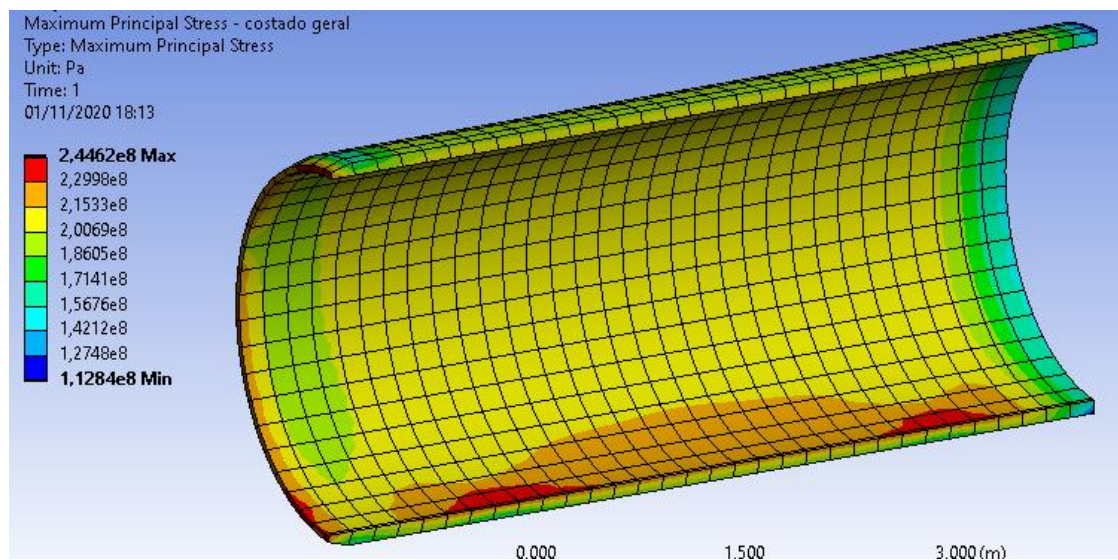
As Figuras 88 e 89 mostram como a tensão principal máxima se comporta somente no costado, com valor mínimo de 112,84 MPa e máximo de 244,62 MPa. Os maiores valores da tensão principal máxima ocorrem na região dos apoios e da ligação do costado com o tampo superior.

Figura 88: Vista externa do costado



Fonte: autor (2021)

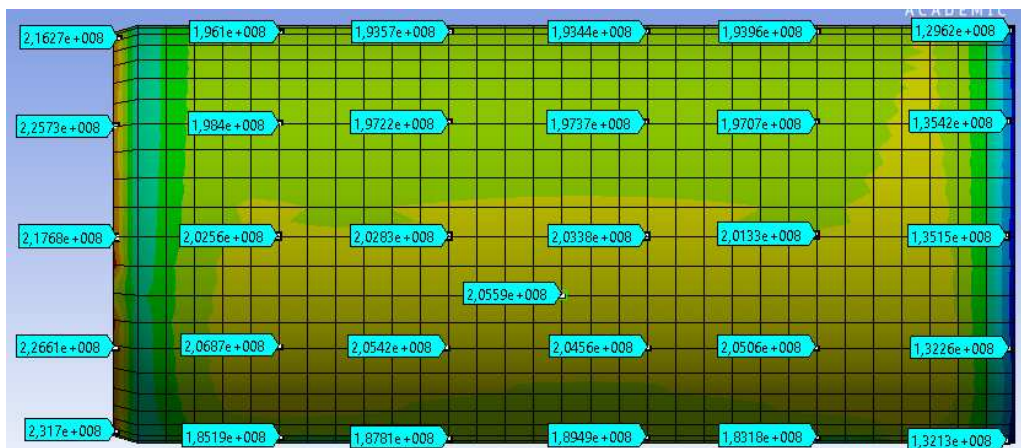
Figura 89: Corte com vista interna do costado



Fonte: autor (2021)

A Figura 90 mostra um mapeamento da tensão principal máxima em vários pontos externos da lateral do costado. Pelo mapeamento percebe-se que a tensão principal máxima tem maiores valores no lado esquerdo da figura, onde há a ligação do costado com o tampo superior, a qual é uma região de descontinuidade geométrica. Já a intersecção do costado com o tampo inferior, a qual também é uma região de descontinuidade geométrica, que acontece no lado direito da figura, tem os menores valores da tensão principal máxima. Percebe-se também que a tensão principal máxima aumenta de valor da parte superior do costado para a região central, e depois volta a diminuir. Valores em Pa.

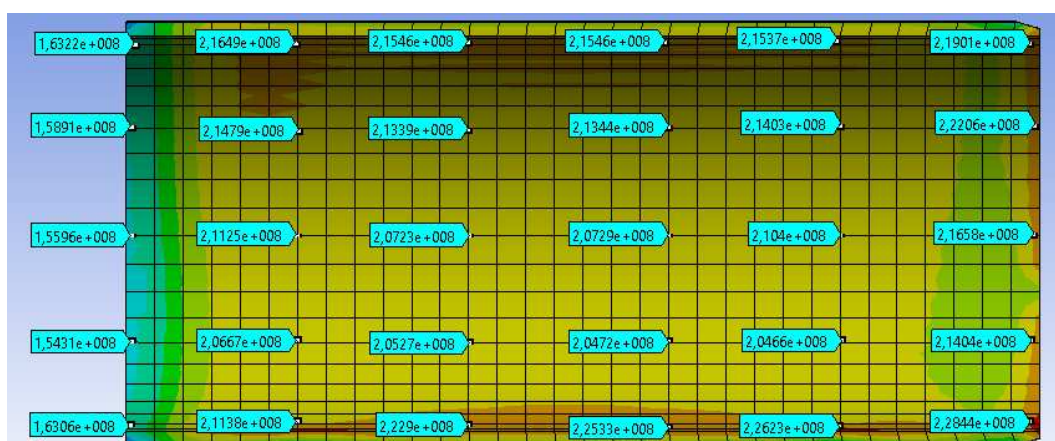
Figura 90: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do costado



Fonte: autor (2021)

A Figura 91, que representa a parte interna da Figura 90, mostra um mapeamento da tensão principal máxima em vários pontos internos da lateral do costado. Pelo mapeamento percebe-se que a tensão principal máxima tem maiores valores no lado direito da figura, onde há a ligação do costado com o tampo superior, a qual é uma região de descontinuidade geométrica. Já a intersecção do costado com o tampo inferior, a qual também é uma região de descontinuidade geométrica, que acontece no lado esquerdo da figura, tem os menores valores da tensão principal máxima. Percebe-se também que a tensão principal máxima diminui de valor da parte superior do costado para a região central, e depois volta a aumentar. Valores em Pa.

Figura 91: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície interna do costado



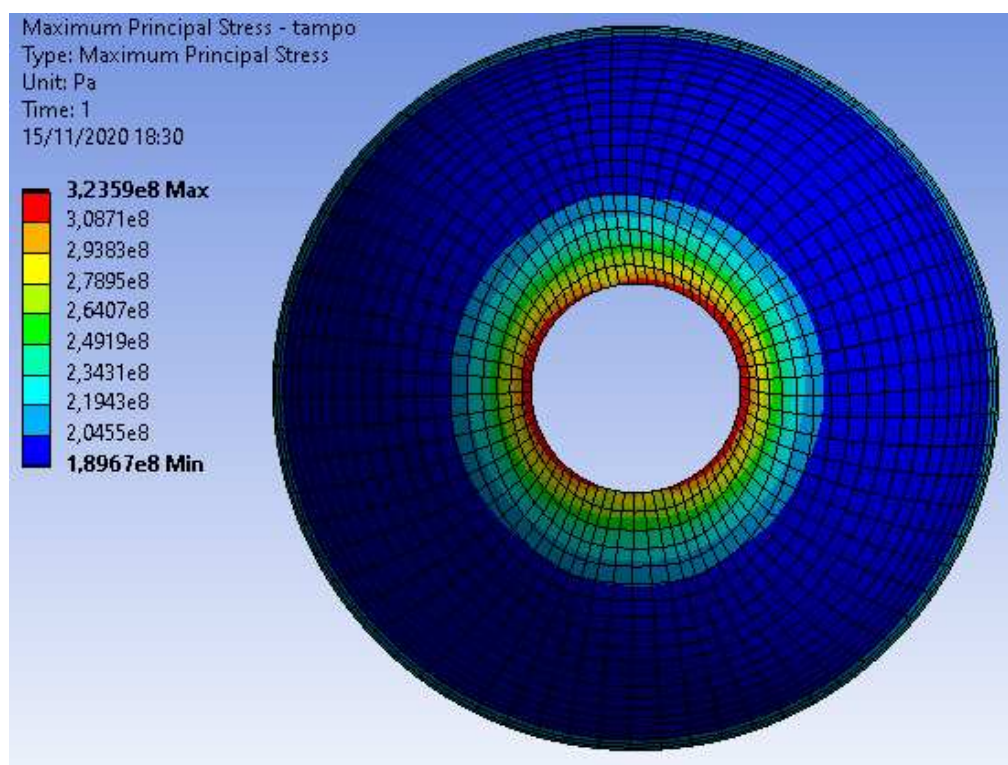
Fonte: autor (2021)

Os pontos internos e externos das Figuras 90 e 91 não estão alinhados ao longo da espessura da parede do vaso de pressão.

#### 4.1.4.2.2 Tampo superior

As Figuras 92 e 93 mostram como a tensão principal máxima se comporta somente no tampo superior, com valor mínimo de 189,67 MPa e máximo de 323,59 MPa. O maior valor da tensão principal máxima no tampo superior ocorreu na borda externa da abertura para a conexão, região de descontinuidade geométrica.

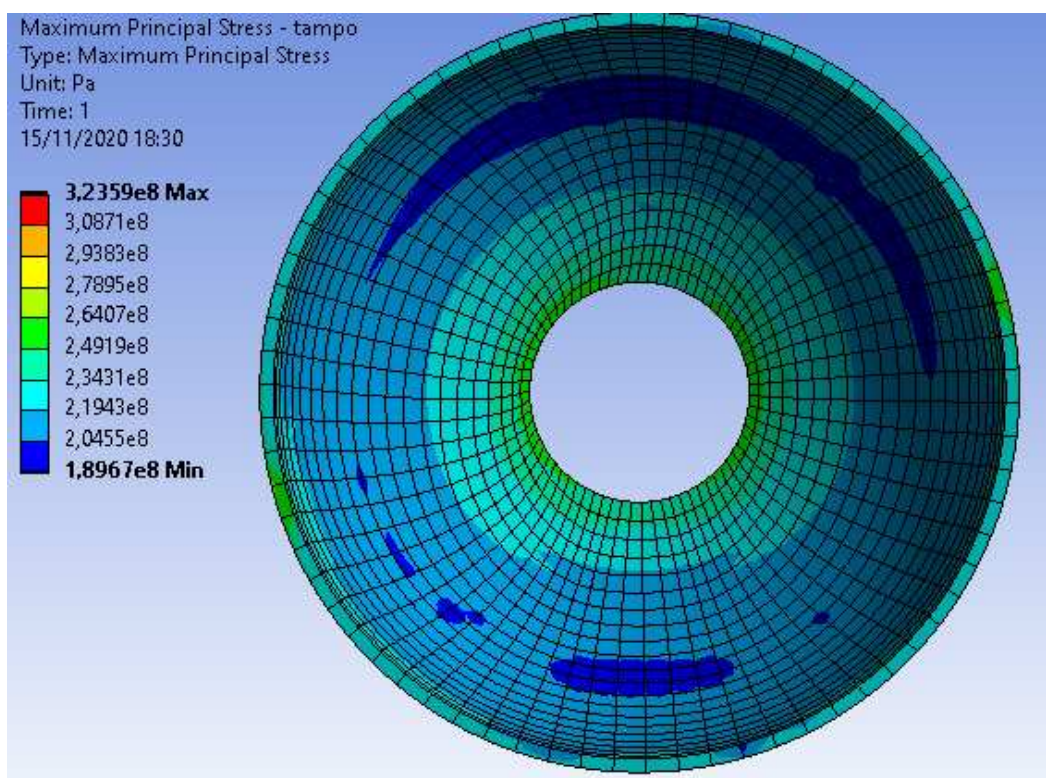
Figura 92: Vista externa do tampo superior



Fonte: autor (2021)



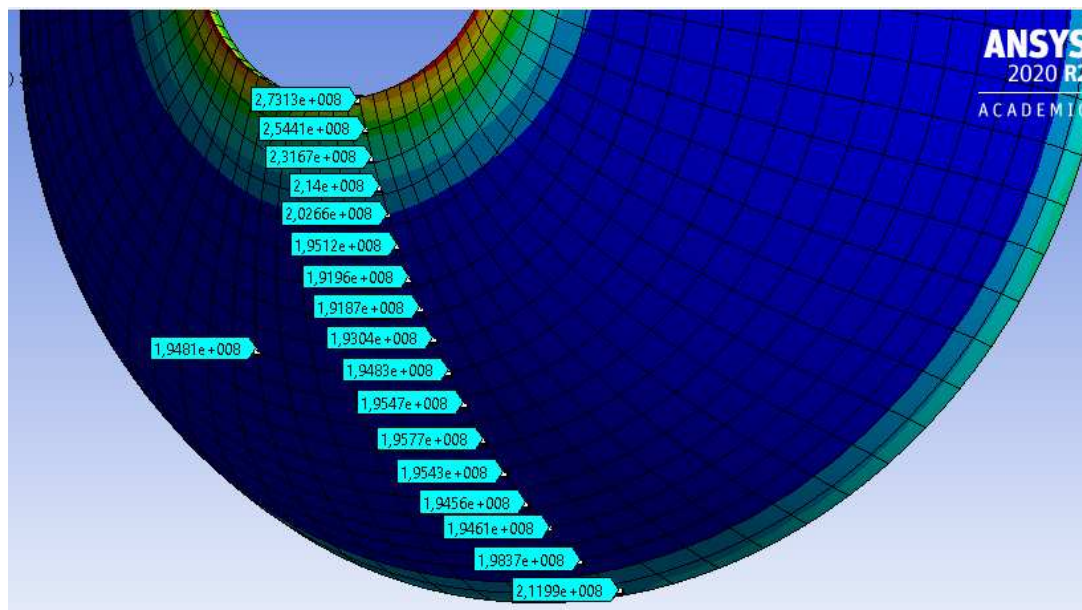
Figura 93: Vista interna do tampo superior



Fonte: autor (2021)

A Figura 94 mostra um mapeamento da tensão principal máxima em vários pontos externos do tampo superior. Pelo mapeamento percebe-se que a tensão principal máxima tem os maiores valores na abertura para a conexão, que é uma região de descontinuidade geométrica, diminui na região central e volta a aumentar quando se aproxima da ligação do tampo superior com o costado, que é também uma região de descontinuidade geométrica. Valores em Pa.

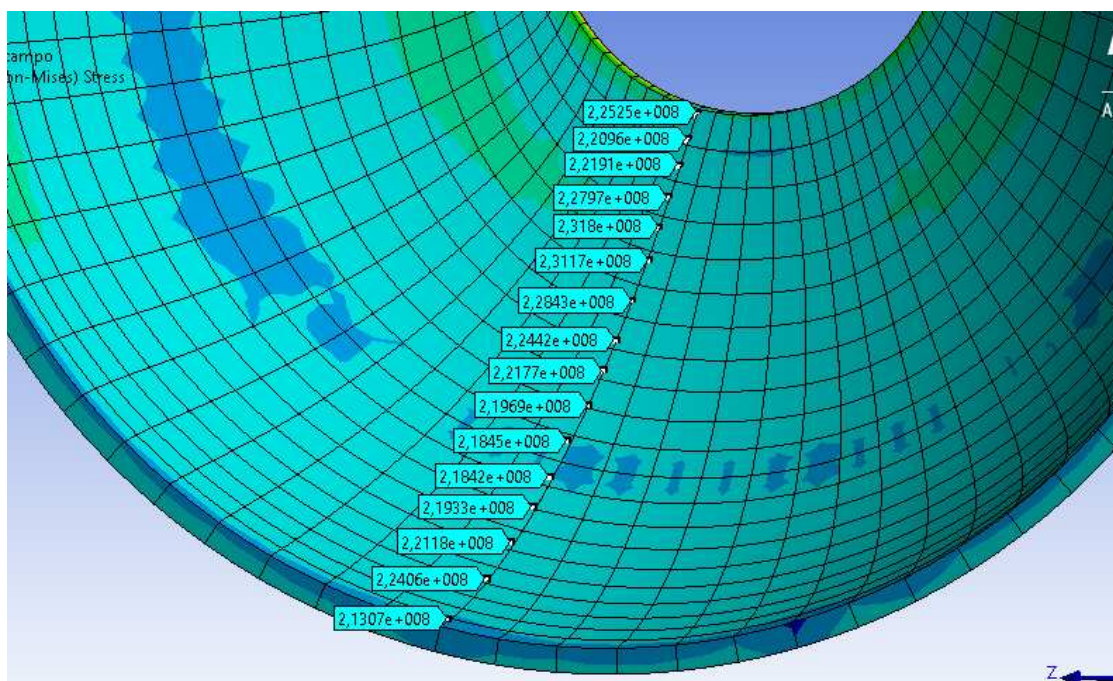
Figura 94: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do tampo



Fonte: autor (2021)

A Figura 95 mostra o mapeamento da tensão principal máxima em vários pontos internos do tampo superior.

Figura 95: Mapeamento da tensão principal máxima na superfície externa do tampo

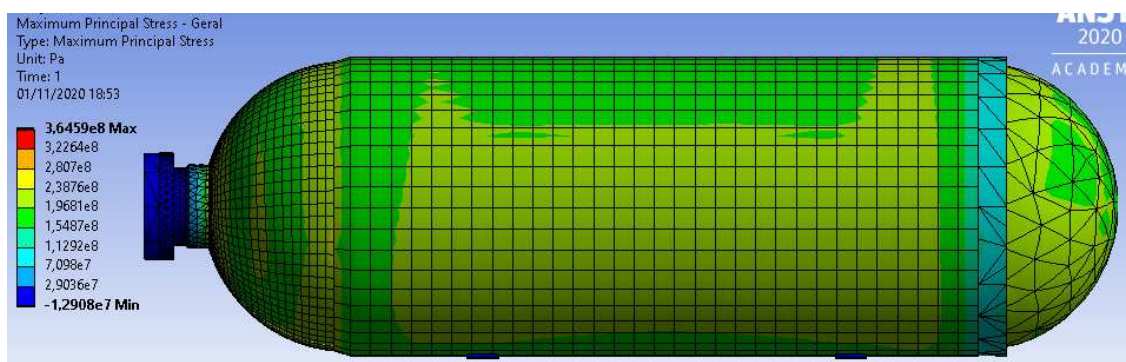


Fonte: autor (2021)

#### 4.1.4.2.3 Vaso de pressão

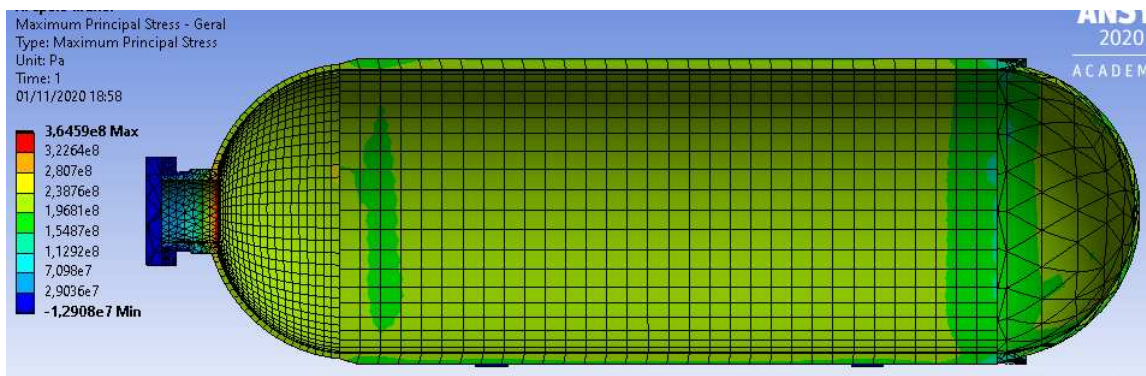
As Figuras 96 e 97 mostram como a tensão principal máxima se comporta em todo o vaso de pressão, com valor mínimo de -12,908 MPa e máximo de 364,59 MPa. O maior valor da tensão principal máxima em todo o vaso de pressão na pressão de 15 MPa ocorre na parede da conexão, como observado na Figura 98.

Figura 96: Vista externa do vaso de pressão



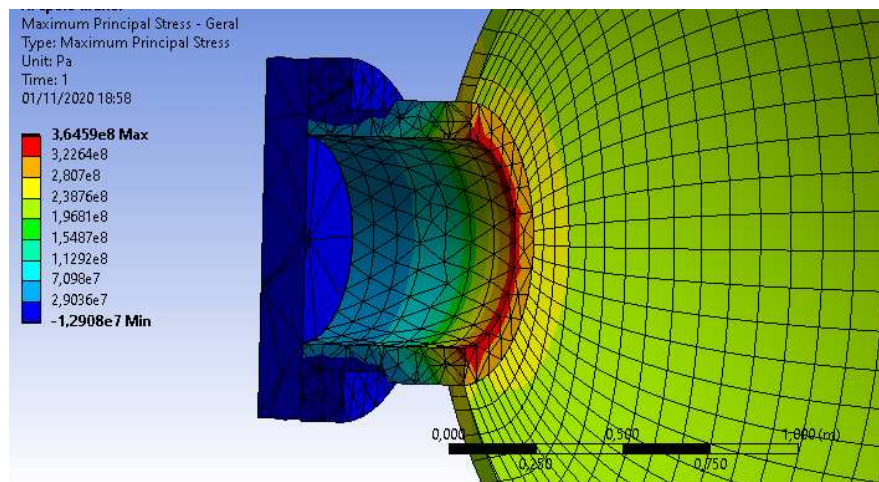
Fonte: autor (2021)

Figura 97: Vista interna do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

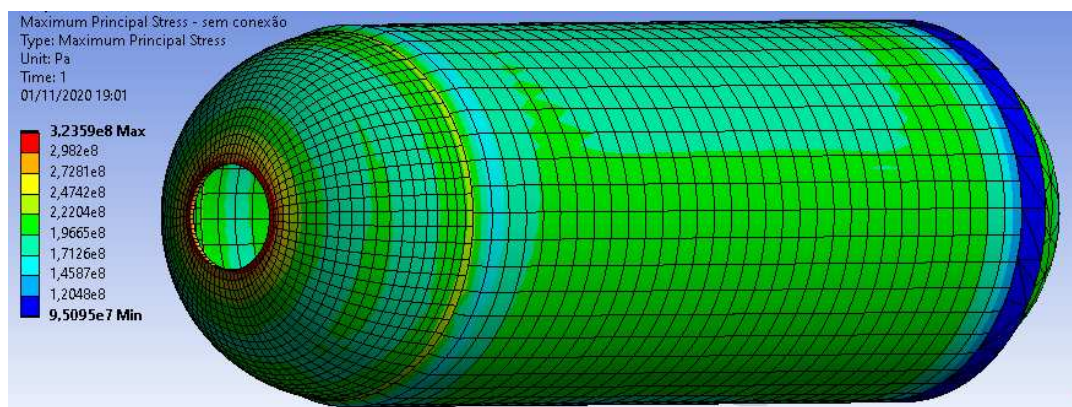
Figura 98: Detalhe da região com o maior valor da tensão principal máxima do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

A Figura 99 mostra como a tensão principal máxima se comporta em todo o vaso de pressão, excluindo a conexão e a tampa da conexão. A tensão principal máxima tem seu maior valor na borda da abertura para a conexão no tampo superior, região de descontinuidade geométrica.

Figura 99: Visão geral do vaso de pressão



Fonte: autor (2021)

#### 4.2 Consolidação dos resultados das quatro análises

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados consolidados das tensões longitudinal, circunferencial e equivalente de von-Mises para as quatro análises nos três pontos específicos.

Vale ressaltar que os valores das tensões das análises experimental e MEF foram obtidos na parte externa do vaso de pressão.

#### 4.2.1 Consolidação das tensões longitudinal e circunferencial

A Tabela 15 mostra os valores das tensões longitudinal e circunferencial consolidados para as quatro análises no costado.

Tabela 15: Tensões consolidadas no costado

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)
0,5	1,48	3,11	3,41	6,82	3,29	6,82	8,45	13,61
1,0	4,28	8,90	6,82	13,64	6,58	13,64	11,73	20,24
1,5	5,97	13,43	10,23	20,45	9,87	20,45	15,01	26,86
2,0	9,09	19,33	13,64	27,27	13,15	27,27	18,29	33,48
2,5	13,35	26,45	17,05	34,09	16,44	34,09	21,57	40,10
3,0	17,13	33,39	20,45	40,91	19,73	40,91	24,85	46,72
3,5	20,07	39,29	23,86	47,73	23,02	47,73	28,14	53,34
4,0	22,76	45,05	27,27	54,55	26,31	54,55	31,42	59,95
4,5	25,59	50,85	30,68	61,36	29,60	61,36	34,70	66,57
5,0	28,10	56,25	34,09	68,18	32,89	68,18	37,98	73,19
5,5	31,08	62,39	37,50	75,00	36,17	75,00	41,26	79,81
6,0	34,36	68,47	40,91	81,82	39,46	81,82	44,54	86,43
6,5	40,94	76,50	44,32	88,64	42,75	88,64	47,82	93,05
7,0	43,42	82,70	47,73	95,45	46,04	95,45	51,10	99,67
7,5	45,69	88,06	51,14	102,27	49,33	102,27	54,38	106,29
8,0	47,07	92,39	54,55	109,09	52,62	109,09	57,66	112,91
8,5	48,88	97,42	57,95	115,91	55,90	115,91	60,94	119,53
9,0	52,15	103,95	61,36	122,73	59,19	122,73	64,22	126,15
9,5	54,31	108,93	64,77	129,55	62,48	129,55	67,50	132,78
10,0	56,88	114,58	68,18	136,36	65,77	136,36	70,78	139,40
10,5	58,65	119,80	71,59	143,18	69,06	143,18	74,06	146,02
11,0	61,03	123,97	75,00	150,00	72,35	150,00	77,34	152,64
11,5	64,01	129,93	78,41	156,82	75,64	156,82	80,61	159,26
12,0	67,60	136,51	81,82	163,64	78,92	163,64	83,88	165,89
12,5	70,39	142,50	85,23	170,45	82,21	170,45	87,16	172,51
13,0	73,40	148,95	88,64	177,27	85,50	177,27	90,44	179,13
13,5	75,85	154,06	92,05	184,09	88,79	184,09	93,71	185,75
14,0	78,33	159,21	95,45	190,91	92,08	190,91	96,99	192,38
14,5	81,56	165,99	98,86	197,73	95,37	197,73	100,26	199,00
15,0	84,18	171,35	102,27	204,55	98,66	204,55	103,54	205,62

Fonte: autor (2021)

Com base na Tabela 15, os valores das tensões da análise teórica foram escolhidos como referência e comparados com os demais, e a média aritmética pode ser vista na Tabela 16, com os valores analisados a partir da pressão de 3 MPa.

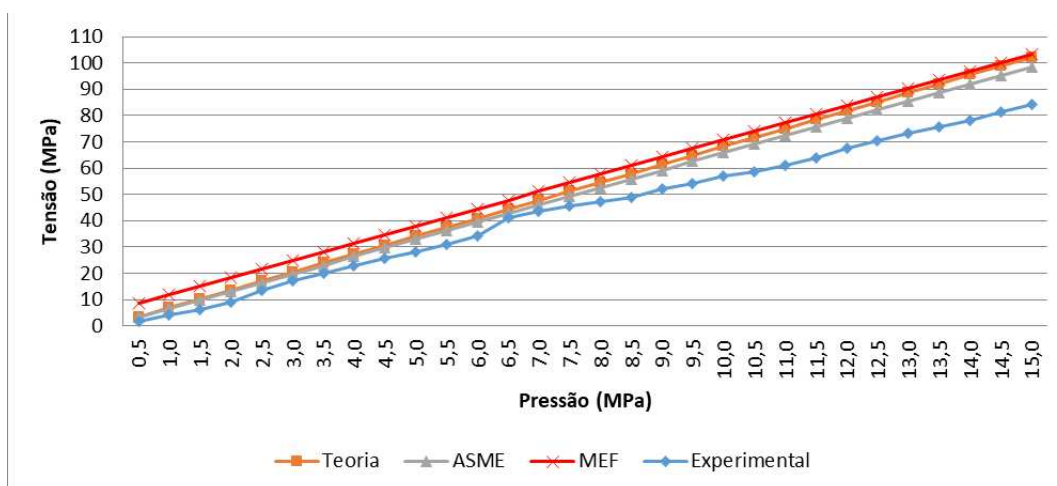
Tabela 16: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica no costado

TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)
-15,93%	-16,22%	-3,54%	0,00%	6,61%	4,12%

Fonte: autor (2021)

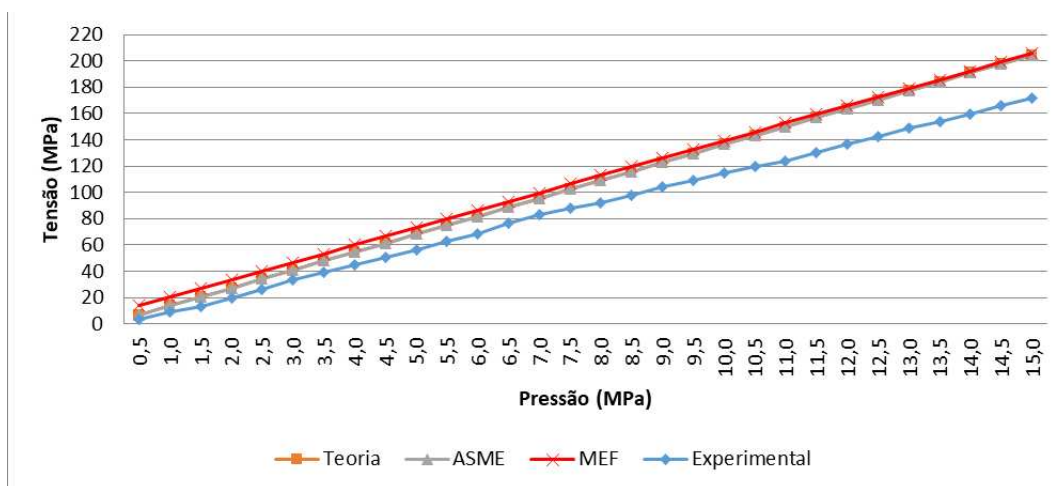
Com base nos resultados da Tabela 15 foram elaborados os gráficos das Figuras 100 e 101.

Figura 100: Tensão longitudinal consolidada no costado



Fonte: autor (2021)

Figura 101: Tensão circunferencial consolidada no costado



Fonte: autor (2021)

Os gráficos das Figuras 100 e 101 mostram que os valores das tensões das análises téorica, ASME e MEF ficaram próximos e acima dos valores da tensão experimental para o ponto específico do costado, que é distante de descontinuidade geométrica.

A Tabela 17 mostra os valores das tensões consolidadas para as quatro análises no tampo superior.

Tabela 17: Tensões consolidadas no tampo superior

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
0,5	2,65	2,90	6,79	6,79	6,66	6,66	5,55	7,99
1,0	7,59	7,96	13,57	13,57	13,32	13,32	12,01	14,46
1,5	11,88	12,24	20,36	20,36	19,99	19,99	18,47	20,94
2,0	17,03	17,38	27,14	27,14	26,65	26,65	24,93	27,42
2,5	23,19	23,60	33,93	33,93	33,31	33,31	31,39	33,90
3,0	29,43	30,01	40,71	40,71	39,97	39,97	37,85	40,38
3,5	35,11	35,54	47,50	47,50	46,64	46,64	44,32	46,86
4,0	40,47	40,95	54,28	54,28	53,30	53,30	50,79	53,34
4,5	45,75	46,53	61,07	61,07	59,96	59,96	57,27	59,83
5,0	50,78	51,59	67,85	67,85	66,62	66,62	63,74	66,31
5,5	56,44	57,46	74,64	74,64	73,28	73,28	70,21	72,79
6,0	61,77	62,86	81,42	81,42	79,95	79,95	76,69	79,27
6,5	67,75	68,99	88,21	88,21	86,61	86,61	83,16	85,75
7,0	74,08	75,39	94,99	94,99	93,27	93,27	89,63	92,24
7,5	79,10	80,65	101,78	101,78	99,93	99,93	96,10	98,72
8,0	83,22	85,02	108,56	108,56	106,60	106,60	102,57	105,20
8,5	88,37	90,32	115,35	115,35	113,26	113,26	109,04	111,69
9,0	94,17	96,34	122,13	122,13	119,92	119,92	115,51	118,17
9,5	99,07	101,37	128,92	128,92	126,58	126,58	121,98	124,65
10,0	104,31	106,70	135,70	135,70	133,25	133,25	128,45	131,14
10,5	109,14	111,80	142,49	142,49	139,91	139,91	134,92	137,63
11,0	112,83	115,53	149,27	149,27	146,57	146,57	141,38	144,12
11,5	118,44	121,71	156,06	156,06	153,23	153,23	147,85	150,61
12,0	124,00	127,57	162,84	162,84	159,89	159,89	154,32	157,09
12,5	129,20	132,91	169,63	169,63	166,56	166,56	160,79	163,58
13,0	135,30	139,21	176,41	176,41	173,22	173,22	167,26	170,07
13,5	139,90	144,05	183,20	183,20	179,88	179,88	173,73	176,56
14,0	144,67	149,07	189,98	189,98	186,54	186,54	180,20	183,05
14,5	150,90	155,40	196,77	196,77	193,21	193,21	186,67	189,54
15,0	155,90	160,61	203,55	203,55	199,87	199,87	193,14	196,03

Fonte: autor (2021)

Com base na Tabela 17, os valores das tensões da análise teórica foram escolhidos como referência e comparados com os demais, e a média aritmética pode ser vista na Tabela 18, com os valores analisados a partir da pressão de 3 MPa.

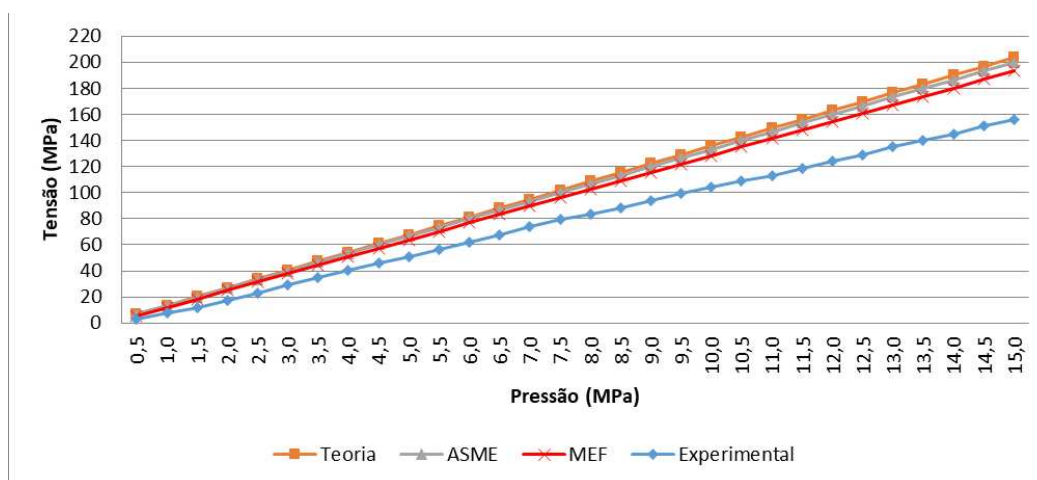
Tabela 18: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica no tempo superior

TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
-23,94%	-22,22%	-1,81%	-1,81%	-5,61%	-2,95%

Fonte: autor (2021)

Com base nos resultados da Tabela 17 foram elaborados os gráficos das Figuras 102 e 103.

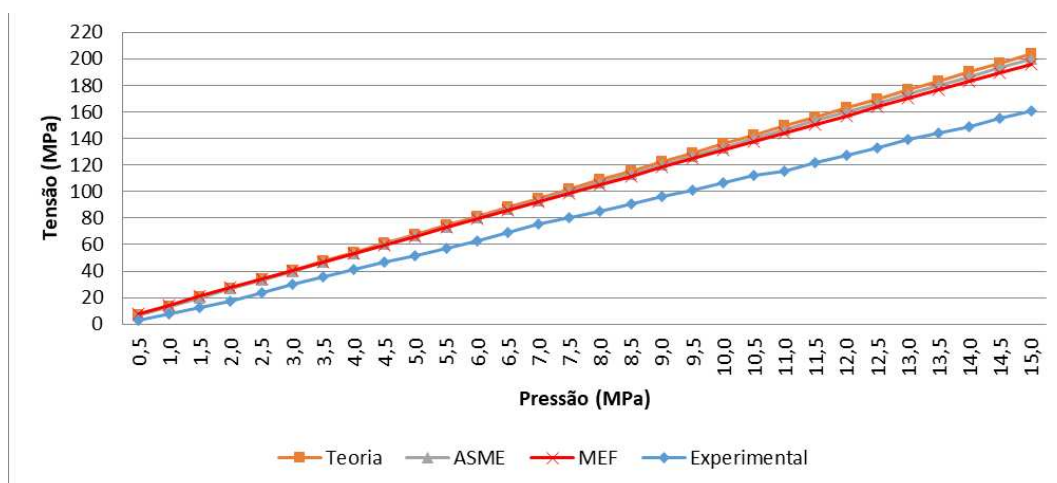
Figura 102: Tensão circunferencial 0° consolidada no tempo superior



Fonte: autor (2021)



Figura 103: Tensão circunferencial 90° consolidada no tempo superior



Fonte: autor (2021)

Os gráficos das Figuras 102 e 103 mostram que os valores das tensões das análises téorica, ASME e MEF ficaram próximos e acima dos valores da tensão experimental para o ponto específico do tempo superior, que é distante de descontinuidade geométrica.

A Tabela 19 mostra os valores das tensões consolidadas para as quatro análises na intersecção.

Vale ressaltar que, tanto na teoria de membrana quanto nas formulações do código ASME, não há equações específicas para o cálculo de tensões teóricas em regiões próximas de descontinuidade geométrica, como a região de intersecção do tempo superior com a conexão. Assim, somente para efeito de comparação e visualização do comportamento das tensões em regiões próximas e distantes de descontinuidade geométrica em um mesmo componente do vaso de pressão, neste caso o tempo superior, foram utilizados os valores das tensões teóricas de membrana e ASME do tempo superior para a intersecção.

Tabela 19: Tensões consolidadas na intersecção

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
0,5	3,99	4,67	6,79	6,79	6,66	6,66	6,19	9,66
1,0	11,13	12,62	13,57	13,57	13,32	13,32	13,73	18,87
1,5	17,43	19,74	20,36	20,36	19,99	19,99	21,26	28,08
2,0	24,56	27,74	27,14	27,14	26,65	26,65	28,79	37,30
2,5	32,73	36,80	33,93	33,93	33,31	33,31	36,32	46,52
3,0	41,38	46,45	40,71	40,71	39,97	39,97	43,85	55,74
3,5	48,92	54,91	47,50	47,50	46,64	46,64	51,38	64,97
4,0	56,39	63,43	54,28	54,28	53,30	53,30	58,91	74,19
4,5	64,29	72,57	61,07	61,07	59,96	59,96	66,44	83,42
5,0	71,18	80,36	67,85	67,85	66,62	66,62	73,97	92,64
5,5	79,06	89,30	74,64	74,64	73,28	73,28	81,49	101,87
6,0	86,35	97,58	81,42	81,42	79,95	79,95	89,02	111,09
6,5	94,56	106,95	88,21	88,21	86,61	86,61	96,55	120,32
7,0	103,03	116,51	94,99	94,99	93,27	93,27	104,07	129,54
7,5	110,40	124,94	101,78	101,78	99,93	99,93	111,60	138,76
8,0	116,55	132,09	108,56	108,56	106,60	106,60	119,13	147,99
8,5	123,74	140,34	115,35	115,35	113,26	113,26	126,67	157,21
9,0	132,04	150,12	122,13	122,13	119,92	119,92	134,23	166,44
9,5	138,81	157,60	128,92	128,92	126,58	126,58	141,83	175,70
10,0	146,30	166,17	135,70	135,70	133,25	133,25	149,52	184,92
10,5	153,28	174,25	142,49	142,49	139,91	139,91	157,22	194,06
11,0	158,50	180,26	149,27	149,27	146,57	146,57	164,93	203,19
11,5	167,34	190,45	156,06	156,06	153,23	153,23	172,51	212,37
12,0	174,79	198,94	162,84	162,84	159,89	159,89	180,08	221,54
12,5	182,21	207,50	169,63	169,63	166,56	166,56	187,64	230,72
13,0	190,65	217,05	176,41	176,41	173,22	173,22	195,20	239,91
13,5	197,37	224,83	183,20	183,20	179,88	179,88	202,75	249,09
14,0	204,05	232,37	189,98	189,98	186,54	186,54	210,30	258,28
14,5	213,03	242,81	196,77	196,77	193,21	193,21	217,85	267,47
15,0	219,82	250,56	203,55	203,55	199,87	199,87	225,40	276,65

Fonte: autor (2021)

Com base na Tabela 19, os valores das tensões da análise teórica foram escolhidos como referência e comparados com os demais, e a média aritmética pode ser vista na Tabela 20, com os valores analisados a partir da pressão de 3 MPa.

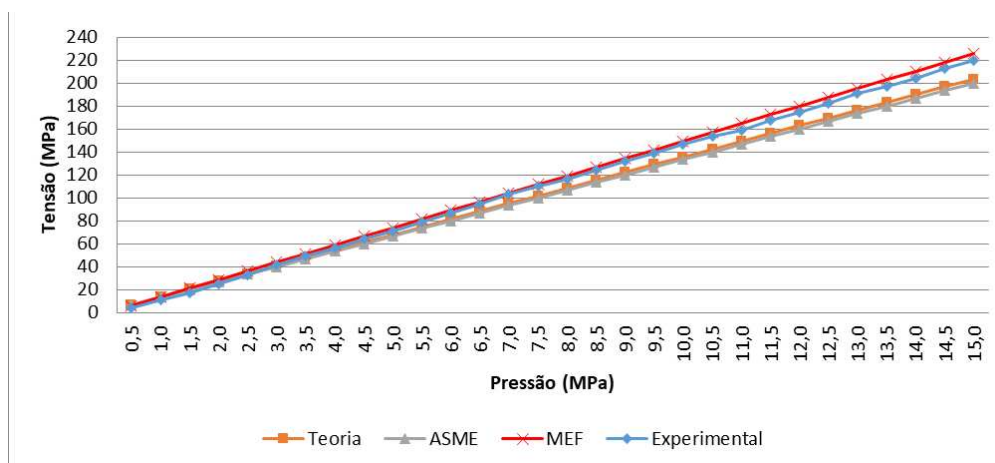
Tabela 20: Variação das análises experimental, ASME e MEF em relação à teórica na intersecção

TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO ASME		TENSÃO MEF	
Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
6,73%	21,01%	-1,81%	-1,81%	9,81%	36,29%

Fonte: autor (2021)

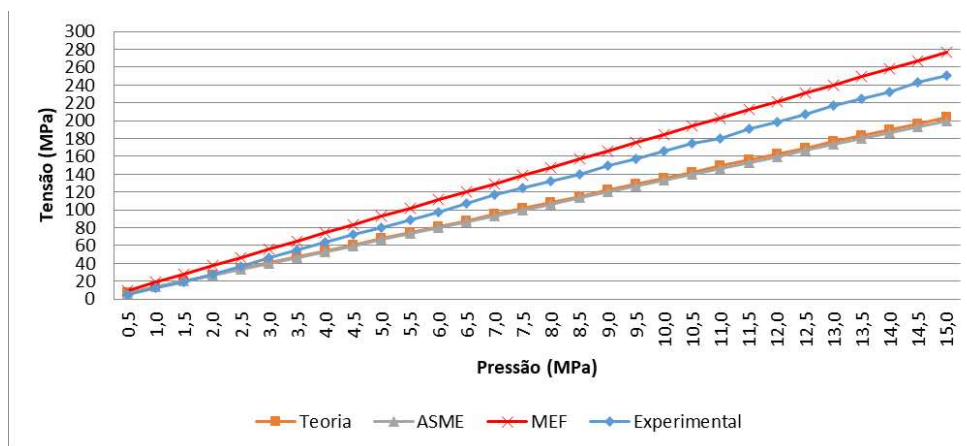
Com base nos resultados da Tabela 19 foram elaborados os gráficos das Figuras 104 e 105.

Figura 104: Tensão circunferencial 0° consolidada na intersecção



Fonte: autor (2021)

Figura 105: Tensão circunferencial 90° consolidada na intersecção



Fonte: autor (2021)

Os gráficos das Figuras 104 e 105 mostram que os valores das tensões experimental e MEF para o ponto específico da intersecção, que se localiza em uma região próxima de descontinuidade geométrica, são maiores que os valores das tensões teórica e ASME para um ponto específico no tampo superior, que se localiza em uma região distante de descontinuidade geométrica, demonstrando a influência da tensão de flexão em regiões próximas de descontinuidade geométrica.

#### 4.2.2 Consolidado da tensão de von-Mises

Para se analisar o consolidado das tensões das quatro análises foi necessária a conversão das tensões longitudinal e circunferencial das análises teórica, ASME e experimental em tensão equivalente de von-Mises com a utilização da equação 14 para cálculo da tensão equivalente em estado plano de tensão.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_1)^2 - (\sigma_1 * \sigma_2) + (\sigma_2)^2} \quad (14)$$

onde:

$\sigma_{eq}$  – tensão equivalente de von-Mises

$\sigma_1$  – tensão principal máxima

$\sigma_2$  – tensão principal mínima

Para a análise MEF, a tensão equivalente de von-Mises foi obtida por meio da linearização da tensão no *software* ANSYS para os pontos interno e externo.

Como já comentado, as tensões obtidas pela análise experimental nos três pontos específicos foram obtidas na superfície externa da parede do vaso de pressão. Com base nos valores obtidos da tensão equivalente de von-Mises na análise MEF na superfície interna e externa nos três pontos específicos, foi possível realizar uma projeção do valor da tensão equivalente de von-Mises na superfície interna da análise experimental recorrendo ao percentual de variação entre os valores interno e externo da análise MEF.

A Tabela 21 mostra os valores da tensão equivalente de von-Mises consolidados no costado.

Tabela 21: Tensões de von-Mises consolidadas no costado

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA	TENSÃO ASME	TENSÃO MEF	
	projeção interno (MPa)	externo (MPa)	(MPa)	(MPa)	interno (MPa)	externo (MPa)
0,5	0,90	2,69	5,90	5,91	4,04	12,01
1,0	3,41	7,71	11,81	11,81	7,84	17,72
1,5	6,90	11,65	17,71	17,72	13,88	23,44
2,0	11,63	16,75	23,62	23,62	20,25	29,18
2,5	17,53	22,91	29,52	29,53	26,71	34,91
3,0	23,63	28,92	35,43	35,44	33,21	40,65
3,5	29,15	34,03	41,33	41,34	39,74	46,39
4,0	34,64	39,02	47,24	47,25	46,28	52,13
4,5	40,20	44,04	53,14	53,15	52,82	57,87
5,0	45,47	48,71	59,05	59,06	59,37	63,61
5,5	51,36	54,03	64,95	64,97	65,92	69,35
6,0	57,22	59,30	70,86	70,87	72,47	75,10
6,5	64,82	66,30	76,76	76,78	79,03	80,84
7,0	70,82	71,65	82,67	82,68	85,58	86,59
7,5	76,12	76,28	88,57	88,59	92,14	92,33
8,0	80,52	80,02	94,48	94,50	98,70	98,08
8,5	85,53	84,37	100,38	100,40	105,25	103,82
9,0	91,86	90,02	106,28	106,31	111,81	109,57
9,5	96,84	94,33	112,19	112,21	118,37	115,31
10,0	102,40	99,23	118,09	118,12	124,93	121,06
10,5	107,58	103,75	124,00	124,02	131,49	126,81
11,0	111,82	107,36	129,90	129,93	138,05	132,55
11,5	117,66	112,53	135,81	135,84	144,61	138,30
12,0	124,07	118,22	141,71	141,74	151,17	144,05
12,5	129,95	123,42	147,62	147,65	157,72	149,79
13,0	136,25	129,00	153,52	153,55	164,28	155,54
13,5	141,32	133,42	159,43	159,46	170,84	161,29
14,0	146,44	137,89	165,33	165,37	177,40	167,04
14,5	153,06	143,76	171,24	171,27	183,96	172,78
15,0	158,37	148,40	177,14	177,18	190,52	178,53

Fonte: autor (2021)

Na Tabela 21 os valores da tensão equivalente de von-Mises na análise experimental estão abaixo dos valores da análise da teoria e do ASME, enquanto os valores da análise MEF na superfície interna estão acima.

A Tabela 22 mostra os valores da tensão equivalente de von-Mises consolidados no tempo superior.

Tabela 22: Tensões de von-Mises consolidadas no tampo superior

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA	TENSÃO ASME	TENSÃO MEF	
	projeção interno (MPa)	externo (MPa)	(MPa)	(MPa)	interno (MPa)	externo (MPa)
0,5	3,20	2,78	6,79	6,66	8,15	7,09
1,0	8,82	7,78	13,57	13,32	15,18	13,40
1,5	13,64	12,06	20,36	19,99	22,40	19,81
2,0	19,44	17,21	27,14	26,65	29,66	26,25
2,5	26,43	23,40	33,93	33,31	36,94	32,69
3,0	33,58	29,72	40,71	39,97	44,23	39,15
3,5	39,90	35,33	47,50	46,64	51,52	45,61
4,0	45,97	40,71	54,28	53,30	58,80	52,08
4,5	52,09	46,15	61,07	59,96	66,09	58,55
5,0	57,78	51,19	67,85	66,62	73,38	65,01
5,5	64,28	56,96	74,64	73,28	80,68	71,48
6,0	70,33	62,32	81,42	79,95	87,97	77,95
6,5	77,16	68,38	88,21	86,61	95,27	84,42
7,0	84,34	74,74	94,99	93,27	102,56	90,89
7,5	90,14	79,88	101,78	99,93	109,86	97,37
8,0	94,93	84,14	108,56	106,60	117,16	103,84
8,5	100,81	89,36	115,35	113,26	124,45	110,31
9,0	107,49	95,28	122,13	119,92	131,75	116,78
9,5	113,09	100,24	128,92	126,58	139,05	123,25
10,0	119,05	105,53	135,70	133,25	146,35	129,72
10,5	124,65	110,49	142,49	139,91	153,64	136,19
11,0	128,84	114,20	149,27	146,57	160,94	142,66
11,5	135,50	120,10	156,06	153,23	168,25	149,13
12,0	141,95	125,82	162,84	159,89	175,55	155,61
12,5	147,90	131,09	169,63	166,56	182,86	162,08
13,0	154,90	137,30	176,41	173,22	190,17	168,56
13,5	160,24	142,02	183,20	179,88	197,48	175,03
14,0	165,75	146,92	189,98	186,54	204,78	181,51
14,5	172,85	153,20	196,77	193,21	212,09	187,98
15,0	178,62	158,31	203,55	199,87	219,40	194,45

Fonte: autor (2021)

Na Tabela 22 os valores da tensão equivalente de von-Mises na análise experimental estão abaixo dos valores da análise da teoria e do ASME, enquanto que os valores da análise MEF na superfície interna estão acima.

A Tabela 23 mostra os valores da tensão equivalente de von-Mises consolidados na intersecção.

Vale ressaltar que, tanto na teoria de membrana quanto nas formulações do código ASME, não há equações específicas para o cálculo de tensões teóricas em

regiões próximas de descontinuidade geométrica, como a região de intersecção do tampo superior com a conexão. Assim, somente para efeito de comparação e visualização do comportamento das tensões em regiões próximas e distantes de descontinuidade geométrica em um mesmo componente do vaso de pressão, neste caso o tampo superior, foram utilizados os valores das tensões teóricas de membrana e ASME do tampo superior para a intersecção.

Tabela 23: Tensões de von-Mises consolidadas na intersecção

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO TEORIA	TENSÃO ASME	TENSÃO MEF	
	projeção interno (MPa)	externo (MPa)	(MPa)	(MPa)	interno (MPa)	externo (MPa)
0,5	4,52	4,37	6,79	6,66	8,70	8,42
1,0	11,35	11,95	13,57	13,32	15,95	16,80
1,5	17,21	18,69	20,36	19,99	23,23	25,23
2,0	23,82	26,30	27,14	26,65	30,51	33,68
2,5	31,34	34,95	33,93	33,31	37,79	42,13
3,0	39,32	44,13	40,71	39,97	45,07	50,59
3,5	46,26	52,17	47,50	46,64	52,36	59,05
4,0	53,20	60,22	54,28	53,30	59,65	67,52
4,5	60,62	68,81	61,07	59,96	66,94	75,98
5,0	66,97	76,19	67,85	66,62	74,22	84,44
5,5	74,27	84,65	74,64	73,28	81,51	92,90
6,0	81,01	92,48	81,42	79,95	88,80	101,36
6,5	88,65	101,33	88,21	86,61	96,09	109,83
7,0	96,47	110,39	94,99	93,27	103,37	118,29
7,5	103,32	118,34	101,78	99,93	110,66	126,75
8,0	109,08	125,05	108,56	106,60	117,95	135,21
8,5	115,78	132,82	115,35	113,26	125,24	143,68
9,0	123,64	141,95	122,13	119,92	132,53	152,15
9,5	129,73	149,09	128,92	126,58	139,79	160,66
10,0	136,59	157,18	135,70	133,25	147,02	169,19
10,5	143,09	164,77	142,49	139,91	154,28	177,66
11,0	147,95	170,43	149,27	146,57	161,59	186,14
11,5	156,07	180,01	156,06	153,23	168,86	194,77
12,0	162,82	188,03	162,84	159,89	176,14	203,41
12,5	169,61	196,08	169,63	166,56	183,42	212,05
13,0	177,23	205,13	176,41	173,22	190,69	220,71
13,5	183,35	212,43	183,20	179,88	197,97	229,37
14,0	189,34	219,59	189,98	186,54	205,24	238,03
14,5	197,59	229,38	196,77	193,21	212,51	246,70
15,0	203,72	236,69	203,55	199,87	219,79	255,37

Fonte: autor (2021)

Na Tabela 23 os valores da tensão equivalente de von-Mises na análise experimental na superfície externa estão quase totalmente acima dos valores da análise da teoria e do ASME, enquanto que os valores da análise MEF estão todos acima, mostrando a influência da tensão de flexão em regiões de descontinuidade geométrica.

Quando se compara a Tabela 22 e a Tabela 23, percebe-se que os valores da tensão MEF no ponto específico do tampo superior (longe de descontinuidade geométrica) são maiores na superfície interna e que no ponto específico da intersecção (próxima de descontinuidade geométrica) são maiores na superfície externa.

Quando se compara as Tabelas 23, 24 e 25 percebe-se que nenhum valor ultrapassou a tensão de escoamento do material de 262 MPa.

### **4.3 Validação do método dos elementos finitos em relação à teoria**

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados da comparação das tensões de membrana longitudinal e circunferencial entre o método dos elementos finitos no *software* ANSYS por meio da linearização das tensões e a teoria de membrana para os dois pontos específicos do costado e do tampo superior, ambos distantes de descontinuidade geométrica.

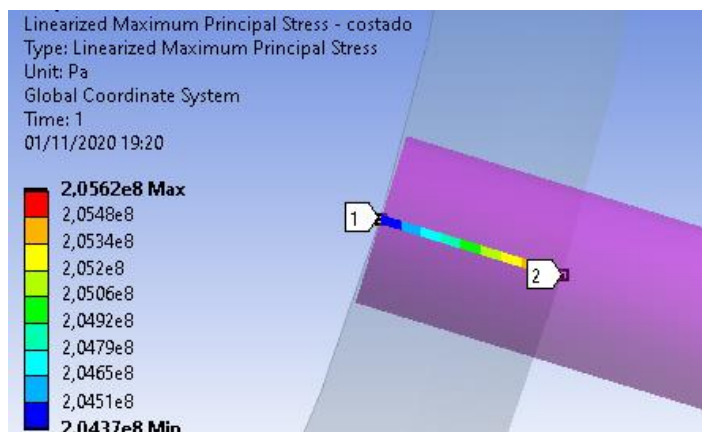
#### **4.3.1 Linearização da tensão**

A linearização de tensão, como explicado no Item 3.4.3 permite a decomposição da tensão atuante ao longo da espessura da parede do vaso de pressão em tensão de membrana e tensão de flexão.

A Figura 106 mostra a linearização da tensão circunferencial ao longo da espessura da parede do costado para a pressão de 15 MPa, onde o ponto 1 localiza-se no ponto interno e o ponto 2 no ponto externo do costado, sendo o ponto 2 o ponto específico do costado. A malha na espessura da parede do costado e tampo superior é composta por uma camada do elemento.



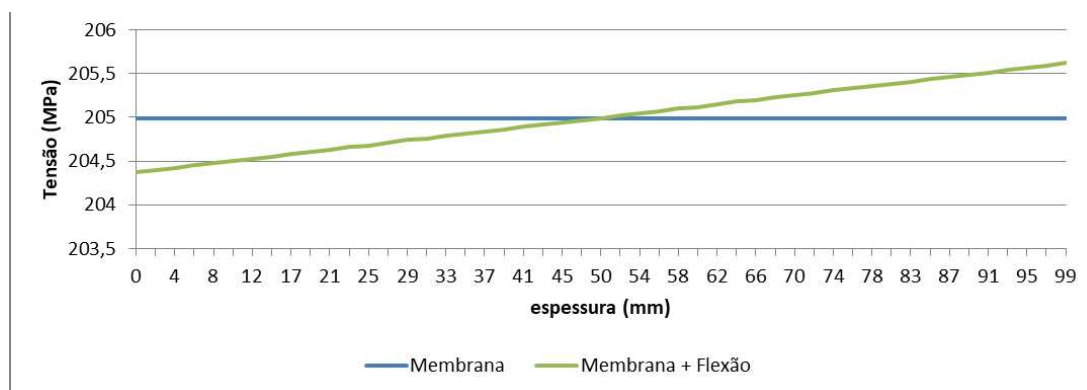
Figura 106: Linearização da tensão circunferencial no ponto específico do costado



Fonte: autor (2021)

O gráfico da Figura 107 mostra os valores da tensão circunferencial de membrana e da tensão circunferencial de membrana + flexão ao longo da espessura da parede do costado, onde o valor 0 do eixo X representa o ponto 1 da Figura 106 e o valor 99 representa o ponto 2 da Figura 106.

Figura 107: Variação da tensão circunferencial de membrana e membrana + flexão no costado



Fonte: autor (2021)

Observa-se no gráfico da Figura 107 que a tensão circunferencial de membrana é constante ao longo da espessura da parede do vaso de pressão no valor de 204,99 MPa e a tensão circunferencial de flexão varia de 204,37 MPa no ponto interno até 205,62 no ponto externo.

As Tabelas 24 e 25 mostram o resultado da linearização da tensão circunferencial e longitudinal de membrana para o ponto específico do costado e do

tampo superior, ambos distantes de descontinuidade geométrica, para a pressão de 0,5 até 15 MPa.

Tabela 24: Tensões circunferenciais 0° e 90° de membrana no tampo superior

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	5,50	8,37	5,5	72,15	74,46	10,5	138,80	140,55
1,0	12,16	14,98	6,0	78,82	81,07	11,0	145,46	147,16
1,5	18,83	21,59	6,5	85,48	87,67	11,5	152,13	157,53
2,0	25,50	28,20	7,0	92,15	94,28	12,0	158,80	160,38
2,5	32,16	34,81	7,5	98,81	100,89	12,5	165,47	167,00
3,0	38,83	41,42	8,0	105,48	107,50	13,0	172,14	173,62
3,5	45,49	48,03	8,5	112,14	114,11	13,5	178,80	180,23
4,0	52,16	54,63	9,0	118,81	120,72	14,0	185,47	186,85
4,5	58,82	61,24	9,5	125,47	127,33	14,5	192,14	193,47
5,0	65,49	67,85	10,0	132,13	133,94	15,0	198,81	200,08

Fonte: autor (2021)

Tabela 25: Tensões circunferencial e longitudinal de membrana no costado

Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)	Pressão (MPa)	$\sigma_{\text{longitudinal}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{circunferencial}}$ (MPa)
0,5	5,98	6,60	5,5	38,73	75,01	10,5	71,45	143,42
1,0	9,26	13,44	6,0	42,00	81,85	11,0	74,72	150,26
1,5	12,53	20,28	6,5	45,27	88,69	11,5	77,99	157,11
2,0	15,80	27,12	7,0	48,54	95,53	12,0	81,25	163,95
2,5	19,08	33,96	7,5	51,82	102,38	12,5	84,52	170,79
3,0	22,35	40,80	8,0	55,09	109,22	13,0	87,79	177,63
3,5	25,63	47,64	8,5	58,36	116,06	13,5	91,06	184,47
4,0	28,90	54,49	9,0	61,63	122,90	14,0	94,32	191,31
4,5	32,18	61,33	9,5	64,90	129,74	14,5	97,59	198,15
5,0	35,45	68,17	10,0	68,18	136,58	15,0	100,86	204,99

Fonte: autor (2021)

#### 4.3.2 Comparação do método dos elementos finitos com a teoria de membrana

A comparação do método dos elementos finitos com a teoria foi realizada em relação às tensões longitudinal e circunferencial de membrana para os pontos específicos do costado e do tampo superior, pois são pontos distantes de descontinuidade geométrica, para as pressões de 0,5 até 15 MPa.

A Tabela 26 apresenta os resultados para o costado e a Tabela 27 para o tampo superior. Para a coluna RELAÇÃO MEF / TEORIA, o resultado positivo

significa que o valor da análise do MEF está acima, em percentual, do valor da análise da teoria e o resultado negativo significa que o valor da análise do MEF está abaixo, em percentual, do valor da análise da teoria.

Tabela 26: Comparativo da tensão de membrana no costado

Pressão (MPa)	TENSÃO TEORIA		TENSÃO MEF		RELAÇÃO MEF / TEORIA	
	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)
0,5	3,41	6,82	5,98	6,60	75,45%	-3,18%
1,0	6,82	13,64	9,26	13,44	35,79%	-1,45%
1,5	10,23	20,45	12,53	20,28	22,53%	-0,86%
2,0	13,64	27,27	15,80	27,12	15,89%	-0,56%
2,5	17,05	34,09	19,08	33,96	11,91%	-0,38%
3,0	20,45	40,91	22,35	40,80	9,26%	-0,26%
3,5	23,86	47,73	25,63	47,64	7,38%	-0,17%
4,0	27,27	54,55	28,90	54,49	5,97%	-0,11%
4,5	30,68	61,36	32,18	61,33	4,87%	-0,06%
5,0	34,09	68,18	35,45	68,17	3,99%	-0,02%
5,5	37,50	75,00	38,73	75,01	3,27%	0,01%
6,0	40,91	81,82	42,00	81,85	2,66%	0,04%
6,5	44,32	88,64	45,27	88,69	2,15%	0,06%
7,0	47,73	95,45	48,54	95,53	1,71%	0,08%
7,5	51,14	102,27	51,82	102,38	1,33%	0,10%
8,0	54,55	109,09	55,09	109,22	0,99%	0,12%
8,5	57,95	115,91	58,36	116,06	0,70%	0,13%
9,0	61,36	122,73	61,63	122,90	0,44%	0,14%
9,5	64,77	129,55	64,90	129,74	0,20%	0,15%
10,0	68,18	136,36	68,18	136,58	-0,01%	0,16%
10,5	71,59	143,18	71,45	143,42	-0,20%	0,17%
11,0	75,00	150,00	74,72	150,26	-0,38%	0,17%
11,5	78,41	156,82	77,99	157,11	-0,54%	0,19%
12,0	81,82	163,64	81,25	163,95	-0,69%	0,19%
12,5	85,23	170,45	84,52	170,79	-0,83%	0,20%
13,0	88,64	177,27	87,79	177,63	-0,96%	0,20%
13,5	92,05	184,09	91,06	184,47	-1,07%	0,21%
14,0	95,45	190,91	94,32	191,31	-1,18%	0,21%
14,5	98,86	197,73	97,59	198,15	-1,29%	0,21%
15,0	102,27	204,55	100,86	204,99	-1,38%	0,22%

Fonte: autor (2021)

Para a coluna RELAÇÃO MEF / TEORIA, observa-se que os valores começam mais elevados e dispersos, porém com o aumento da pressão interna, os

valores passam a diminuir e ficarem mais constantes. Calculou-se a média aritmética da coluna RELAÇÃO MEF / TEORIA, a partir da pressão de 3 MPa, para a tensão longitudinal de membrana no valor de 1,46% e para a tensão circunferencial de membrana no valor de 0,09%.

Tabela 27: Comparativo da tensão de membrana no tampo superior

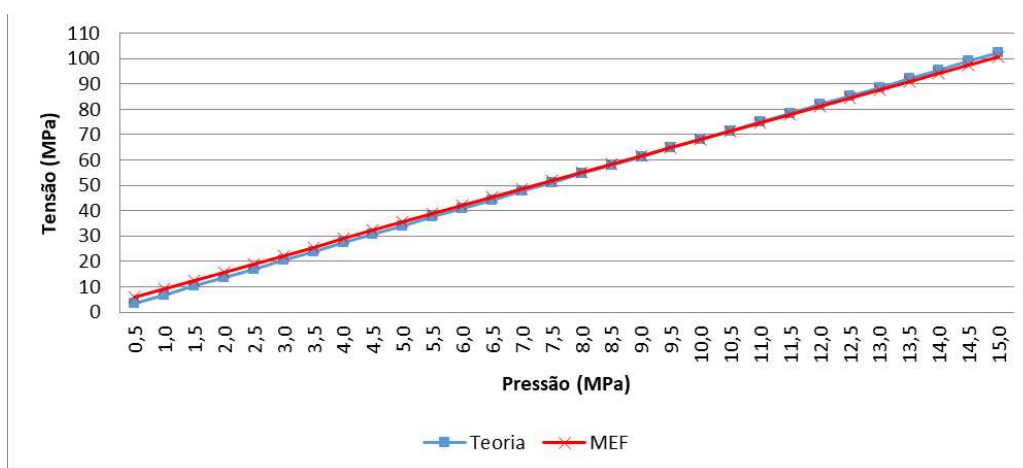
Pressão (MPa)	TENSÃO TEORIA		TENSÃO MEF		RELAÇÃO MEF / TEORIA	
	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
0,5	6,79	6,79	5,50	8,37	-19,01%	23,34%
1,0	13,57	13,57	12,16	14,98	-10,38%	10,38%
1,5	20,36	20,36	18,83	21,59	-7,50%	6,05%
2,0	27,14	27,14	25,50	28,20	-6,06%	3,89%
2,5	33,93	33,93	32,16	34,81	-5,20%	2,60%
3,0	40,71	40,71	38,83	41,42	-4,62%	1,73%
3,5	47,50	47,50	45,49	48,03	-4,22%	1,12%
4,0	54,28	54,28	52,16	54,63	-3,91%	0,65%
4,5	61,07	61,07	58,82	61,24	-3,67%	0,29%
5,0	67,85	67,85	65,49	67,85	-3,48%	0,00%
5,5	74,64	74,64	72,15	74,46	-3,33%	-0,24%
6,0	81,42	81,42	78,82	81,07	-3,20%	-0,43%
6,5	88,21	88,21	85,48	87,67	-3,09%	-0,60%
7,0	94,99	94,99	92,15	94,28	-2,99%	-0,74%
7,5	101,78	101,78	98,81	100,89	-2,91%	-0,87%
8,0	108,56	108,56	105,48	107,50	-2,84%	-0,98%
8,5	115,35	115,35	112,14	114,11	-2,78%	-1,07%
9,0	122,13	122,13	118,81	120,72	-2,72%	-1,15%
9,5	128,92	128,92	125,47	127,33	-2,67%	-1,23%
10,0	135,70	135,70	132,13	133,94	-2,63%	-1,30%
10,5	142,49	142,49	138,80	140,55	-2,59%	-1,36%
11,0	149,27	149,27	145,46	147,16	-2,55%	-1,41%
11,5	156,06	156,06	152,13	157,53	-2,52%	0,95%
12,0	162,84	162,84	158,80	160,38	-2,48%	-1,51%
12,5	169,63	169,63	165,47	167,00	-2,45%	-1,55%
13,0	176,41	176,41	172,14	173,62	-2,42%	-1,58%
13,5	183,20	183,20	178,80	180,23	-2,40%	-1,62%
14,0	189,98	189,98	185,47	186,85	-2,37%	-1,65%
14,5	196,77	196,77	192,14	193,47	-2,35%	-1,67%
15,0	203,55	203,55	198,81	200,08	-2,33%	-1,70%

Fonte: autor (2021)

Para a coluna RELAÇÃO MEF / TEORIA, observa-se que os valores começam mais elevados e dispersos, porém com o aumento da pressão interna, os valores passam a diminuir e ficarem mais constantes. Calculou-se a média aritmética da coluna RELAÇÃO MEF / TEORIA, a partir da pressão de 3 MPa, para a tensão circunferencial  $0^\circ$  de membrana no valor de -2,94% e para a tensão circunferencial de membrana  $90^\circ$  no valor de -0,72%.

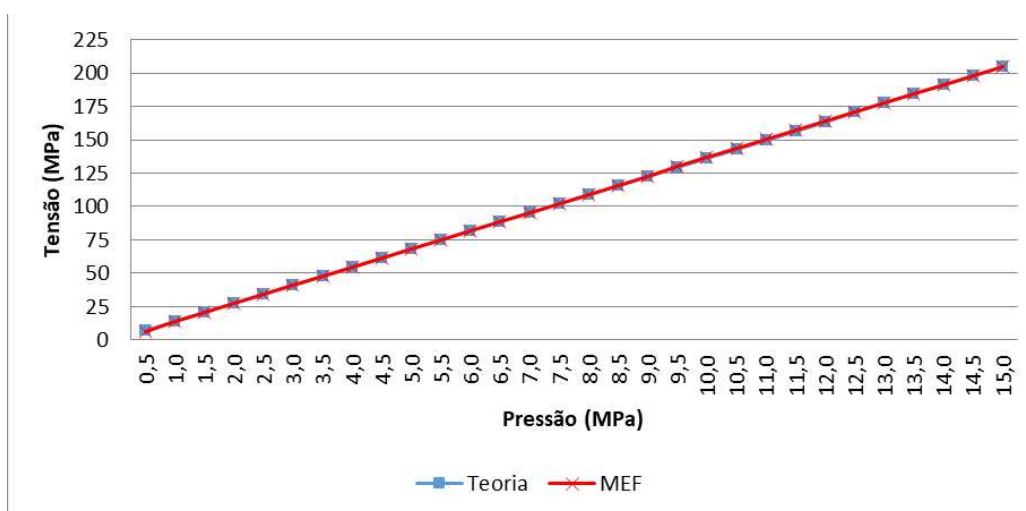
Com os dados das Tabelas 26 e 27 foram elaborados os gráficos das Figuras 108, 109, 110 e 111 para uma melhor visualização dos resultados da tensão de membrana.

Figura 108: Comparativo da tensão longitudinal de membrana no costado



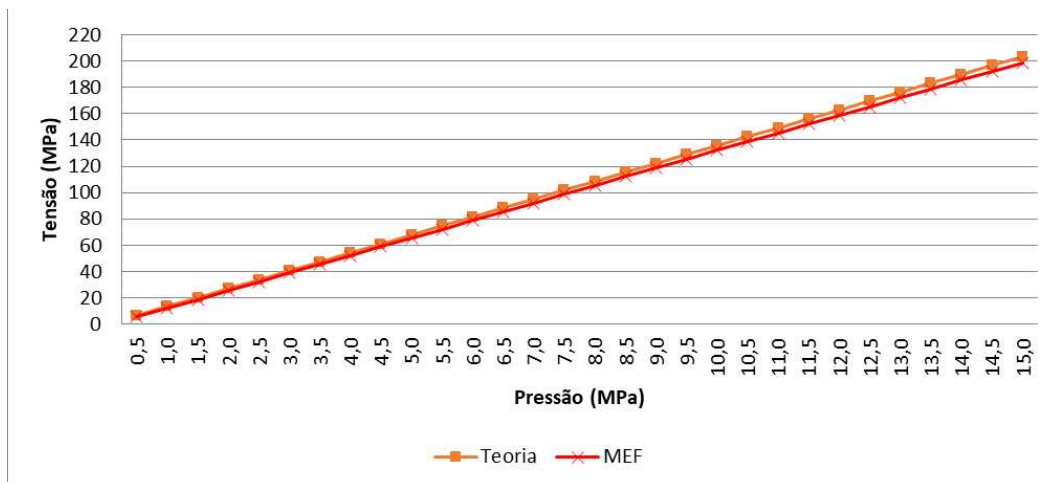
Fonte: autor (2021)

Figura 109: Comparativo da tensão circunferencial de membrana no costado



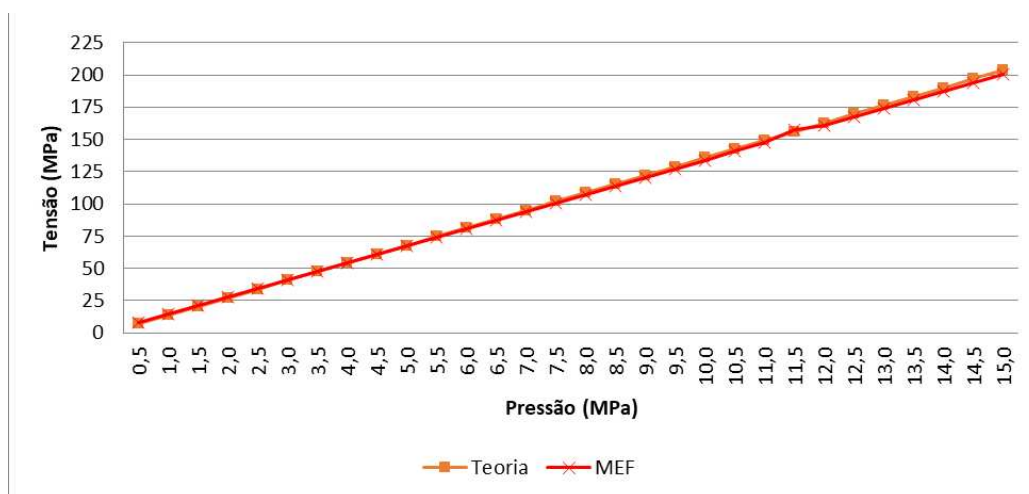
Fonte: autor (2021)

Figura 110: Comparativo da tensão circunferencial 0° de membrana no tempo superior



Fonte: autor (2021)

Figura 111: Comparativo da tensão circunferencial 90° de membrana no tempo superior



Fonte: autor (2021)

Analisando as Tabelas 26 e 27 e os gráficos das Figuras 108, 109, 110 e 111, observa-se que os valores do método dos elementos finitos e da teoria de membrana são muito próximos, principalmente para a tensão circunferencial que varia menos de 1%, validando os valores do método dos elementos finitos.

#### **4.4 Comparação da análise experimental com o método dos elementos finitos**

Após a validação dos resultados da análise pelo método dos elementos finitos em comparação com a teoria de membrana, foram apresentados e discutidos neste item os resultados da comparação das tensões longitudinal e circunferencial entre a análise experimental e a análise pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS para o ponto específico do costado e tampo superior, ambos distantes de descontinuidade geométrica e para o ponto específico da intersecção do tampo superior com a conexão, próximo de descontinuidade geométrica.

##### **4.4.1 Costado**

Com base nos resultados das Tabelas 10 e 13, foram elaborados a Tabela 28 e os gráficos das Figuras 112 e 113. Para a coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, o resultado positivo significa que o valor da análise do MEF está acima, em percentual, do valor da análise experimental e o resultado negativo significa que o valor da análise do MEF está abaixo, em percentual, do valor da análise experimental.

Tabela 28: Comparativo das tensões longitudinal e circunferencial no costado

Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO MEF		RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL	
	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)	Long (MPa)	Circunf (MPa)
0,5	1,48	3,11	8,45	13,61	470,35%	338,08%
1,0	4,28	8,90	11,73	20,24	174,40%	127,48%
1,5	5,97	13,43	15,01	26,86	151,44%	99,99%
2,0	9,09	19,33	18,29	33,48	101,29%	73,16%
2,5	13,35	26,45	21,57	40,10	61,57%	51,60%
3,0	17,13	33,39	24,85	46,72	45,06%	39,91%
3,5	20,07	39,29	28,14	53,34	40,20%	35,75%
4,0	22,76	45,05	31,42	59,95	38,05%	33,07%
4,5	25,59	50,85	34,70	66,57	35,58%	30,91%
5,0	28,10	56,25	37,98	73,19	35,15%	30,11%
5,5	31,08	62,39	41,26	79,81	32,78%	27,91%
6,0	34,36	68,47	44,54	86,43	29,65%	26,23%
6,5	40,94	76,50	47,82	93,05	16,82%	21,64%
7,0	43,42	82,70	51,10	99,67	17,68%	20,51%
7,5	45,69	88,06	54,38	106,29	19,03%	20,70%
8,0	47,07	92,39	57,66	112,91	22,50%	22,21%
8,5	48,88	97,42	60,94	119,53	24,68%	22,70%
9,0	52,15	103,95	64,22	126,15	23,15%	21,36%
9,5	54,31	108,93	67,50	132,78	24,28%	21,90%
10,0	56,88	114,58	70,78	139,40	24,42%	21,66%
10,5	58,65	119,80	74,06	146,02	26,28%	21,89%
11,0	61,03	123,97	77,34	152,64	26,71%	23,13%
11,5	64,01	129,93	80,61	159,26	25,93%	22,57%
12,0	67,60	136,51	83,88	165,89	24,09%	21,52%
12,5	70,39	142,50	87,16	172,51	23,82%	21,06%
13,0	73,40	148,95	90,44	179,13	23,21%	20,26%
13,5	75,85	154,06	93,71	185,75	23,54%	20,57%
14,0	78,33	159,21	96,99	192,38	23,82%	20,83%
14,5	81,56	165,99	100,26	199,00	22,92%	19,88%
15,0	84,18	171,35	103,54	205,62	23,00%	20,00%

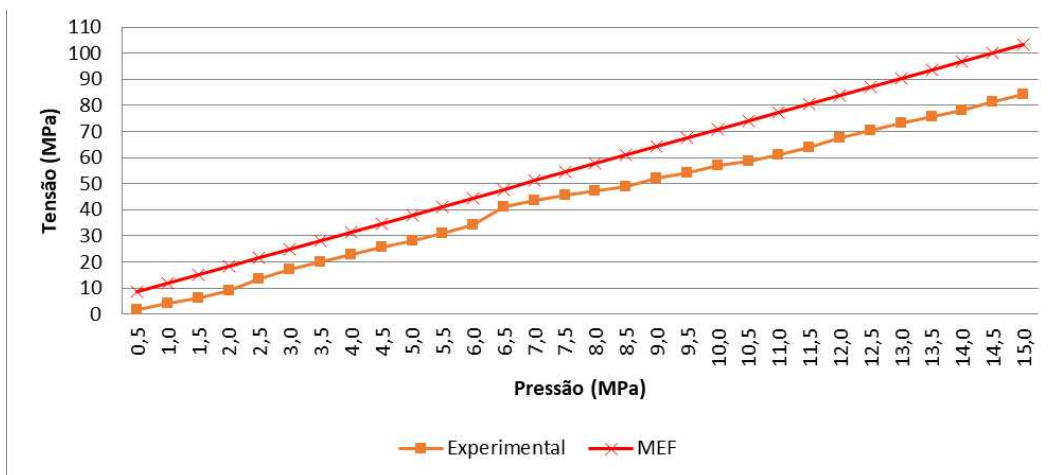
Fonte: autor (2021)

Para a coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, observa-se que os valores começam mais elevados e dispersos, porém com o aumento da pressão interna, os valores passam a diminuir e ficarem mais constantes. Calculou-se a média aritmética da coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, a partir da pressão de 3



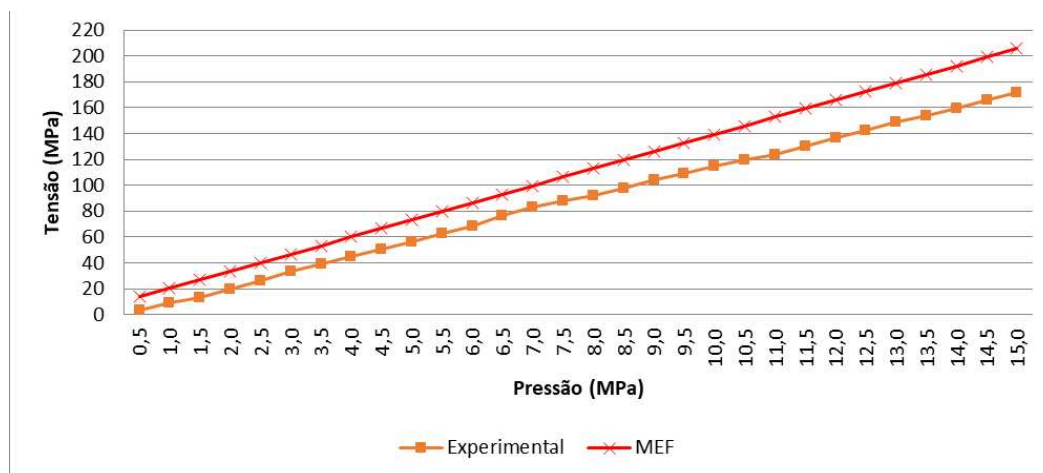
MPa, para a tensão longitudinal no valor de 26,89% e para a tensão circunferencial no valor de 24,33%.

Figura 112: Comparativo da tensão longitudinal para o costado



Fonte: autor (2021)

Figura 113: Comparativo da tensão circunferencial para o costado



Fonte: autor (2021)

#### 4.4.2 Tempo superior

Com base nos resultados das Tabelas 9 e 12, foram elaborados a Tabela 29 e os gráficos das Figuras 114 e 115.

Tabela 29: Comparativo das tensões circunferenciais 0° e 90° no tampo superior

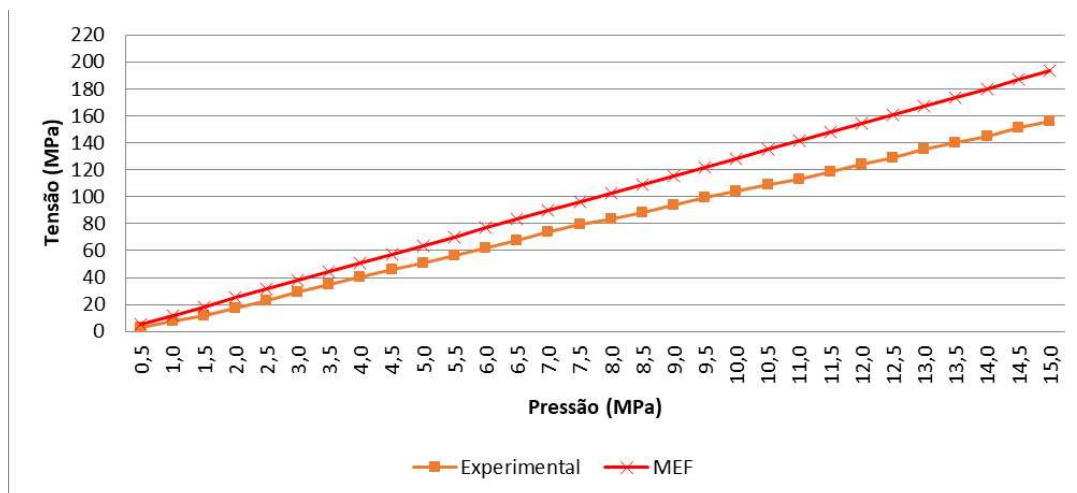
Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO MEF		RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL	
	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
0,5	2,65	2,90	5,55	7,99	109,00%	175,71%
1,0	7,59	7,96	12,01	14,46	58,26%	81,71%
1,5	11,88	12,24	18,47	20,94	55,50%	71,15%
2,0	17,03	17,38	24,93	27,42	46,41%	57,74%
2,5	23,19	23,60	31,39	33,90	35,36%	43,67%
3,0	29,43	30,01	37,85	40,38	28,59%	34,57%
3,5	35,11	35,54	44,32	46,86	26,21%	31,84%
4,0	40,47	40,95	50,79	53,34	25,50%	30,26%
4,5	45,75	46,53	57,27	59,83	25,17%	28,57%
5,0	50,78	51,59	63,74	66,31	25,52%	28,52%
5,5	56,44	57,46	70,21	72,79	24,41%	26,67%
6,0	61,77	62,86	76,69	79,27	24,15%	26,11%
6,5	67,75	68,99	83,16	85,75	22,74%	24,30%
7,0	74,08	75,39	89,63	92,24	20,99%	22,35%
7,5	79,10	80,65	96,10	98,72	21,49%	22,41%
8,0	83,22	85,02	102,57	105,20	23,25%	23,73%
8,5	88,37	90,32	109,04	111,69	23,39%	23,66%
9,0	94,17	96,34	115,51	118,17	22,66%	22,66%
9,5	99,07	101,37	121,98	124,65	23,12%	22,96%
10,0	104,31	106,70	128,45	131,14	23,14%	22,91%
10,5	109,14	111,80	134,92	137,63	23,62%	23,10%
11,0	112,83	115,53	141,38	144,12	25,30%	24,74%
11,5	118,44	121,71	147,85	150,61	24,84%	23,75%
12,0	124,00	127,57	154,32	157,09	24,45%	23,14%
12,5	129,20	132,91	160,79	163,58	24,45%	23,08%
13,0	135,30	139,21	167,26	170,07	23,62%	22,17%
13,5	139,90	144,05	173,73	176,56	24,18%	22,57%
14,0	144,67	149,07	180,20	183,05	24,56%	22,80%
14,5	150,90	155,40	186,67	189,54	23,71%	21,97%
15,0	155,90	160,61	193,14	196,03	23,88%	22,05%

Fonte: autor (2021)

Para a coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, observa-se que os valores começam mais elevados e dispersos, porém com o aumento da pressão interna, os valores passam a diminuir e ficarem mais constantes. Calculou-se a média aritmética da coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, a partir da pressão de 3

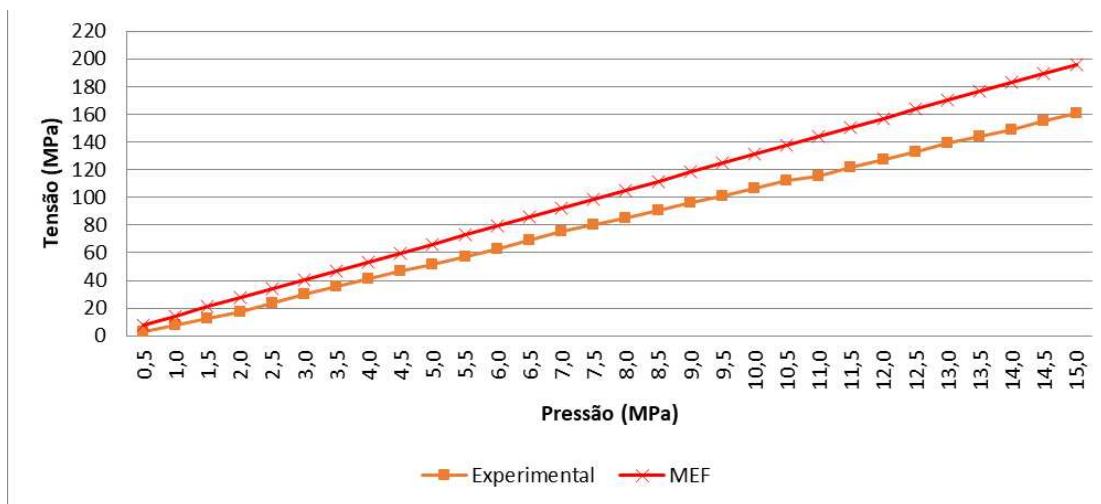
MPa, para a tensão circunferencial  $0^\circ$  no valor de 24,12% e para a tensão circunferencial  $90^\circ$  no valor de 24,84%.

Figura 114: Comparativo da tensão circunferencial  $0^\circ$  no tampo superior



Fonte: autor (2021)

Figura 115: Comparativo da tensão circunferencial  $90^\circ$  no tampo superior



Fonte: autor (2021)

#### 4.4.3 Intersecção do tampo superior com a conexão

Com base nos resultados das Tabelas 11 e 14, foram elaborados a Tabela 30 e os gráficos das Figuras 116 e 117.

Tabela 30: Comparativo da tensão na intersecção

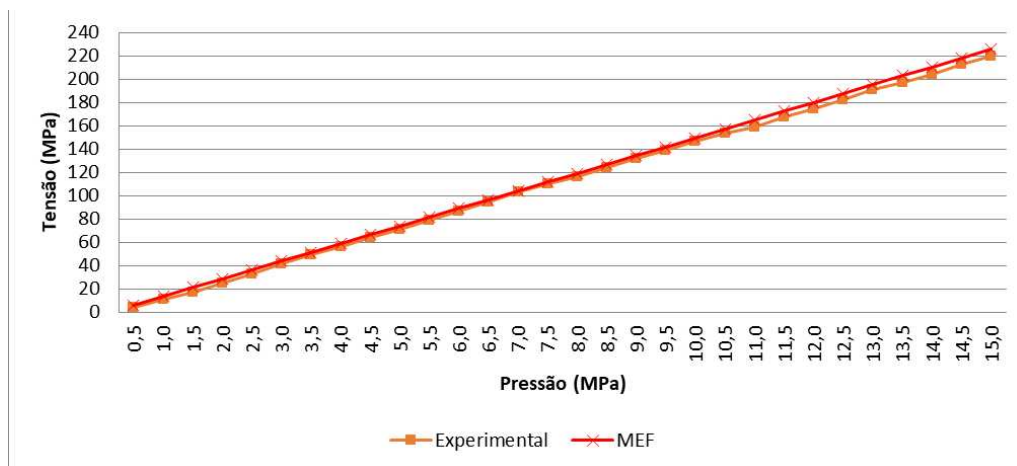
Pressão (MPa)	TENSÃO EXPERIMENTAL		TENSÃO MEF		RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL	
	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)	Circ 0° (MPa)	Circ 90° (MPa)
0,5	3,99	4,67	6,19	9,66	55,24%	106,57%
1,0	11,13	12,62	13,73	18,87	23,30%	49,50%
1,5	17,43	19,74	21,26	28,08	21,98%	42,27%
2,0	24,56	27,74	28,79	37,30	17,22%	34,46%
2,5	32,73	36,80	36,32	46,52	10,98%	26,41%
3,0	41,38	46,45	43,85	55,74	5,98%	20,00%
3,5	48,92	54,91	51,38	64,97	5,04%	18,31%
4,0	56,39	63,43	58,91	74,19	4,46%	16,97%
4,5	64,29	72,57	66,44	83,42	3,34%	14,94%
5,0	71,18	80,36	73,97	92,64	3,91%	15,29%
5,5	79,06	89,30	81,49	101,87	3,08%	14,07%
6,0	86,35	97,58	89,02	111,09	3,09%	13,85%
6,5	94,56	106,95	96,55	120,32	2,10%	12,50%
7,0	103,03	116,51	104,07	129,54	1,01%	11,18%
7,5	110,40	124,94	111,60	138,76	1,09%	11,06%
8,0	116,55	132,09	119,13	147,99	2,22%	12,03%
8,5	123,74	140,34	126,67	157,21	2,37%	12,02%
9,0	132,04	150,12	134,23	166,44	1,66%	10,87%
9,5	138,81	157,60	141,83	175,70	2,17%	11,49%
10,0	146,30	166,17	149,52	184,92	2,20%	11,28%
10,5	153,28	174,25	157,22	194,06	2,57%	11,37%
11,0	158,50	180,26	164,93	203,19	4,06%	12,72%
11,5	167,34	190,45	172,51	212,37	3,09%	11,51%
12,0	174,79	198,94	180,08	221,54	3,03%	11,36%
12,5	182,21	207,50	187,64	230,72	2,98%	11,19%
13,0	190,65	217,05	195,20	239,91	2,39%	10,53%
13,5	197,37	224,83	202,75	249,09	2,72%	10,79%
14,0	204,05	232,37	210,30	258,28	3,06%	11,15%
14,5	213,03	242,81	217,85	267,47	2,26%	10,15%
15,0	219,82	250,56	225,40	276,65	2,54%	10,41%

Fonte: autor (2021)

Para a coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, observa-se que os valores começam mais elevados e dispersos, porém com o aumento da pressão interna, os valores passam a diminuir e ficarem mais constantes. Calculou-se a média aritmética da coluna RELAÇÃO MEF / EXPERIMENTAL, a partir da pressão de 3

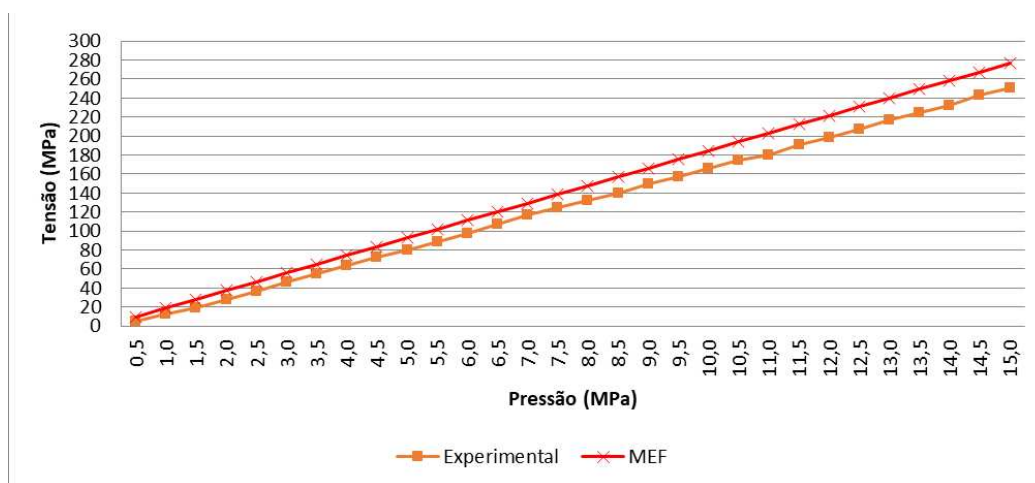
MPa, para a tensão circunferencial  $0^\circ$  no valor de 2,90% e para a tensão circunferencial  $90^\circ$  no valor de 12,68%.

Figura 116: Comparativo da tensão circunferencial  $0^\circ$  na intersecção



Fonte: autor (2021)

Figura 117: Comparativo da tensão circunferencial  $90^\circ$  na intersecção



Fonte: autor (2021)

Observa-se nos resultados dos pontos específicos do costado e do tampo superior, ambos distantes de descontinuidade geométrica, que os valores da análise experimental ficaram em entre 24 e 27% acima dos valores da análise pelo método dos elementos finitos. Já os resultados para o ponto específico da intersecção, que é próximo de descontinuidade geométrica, ficaram entre 2 e 13%.

Alguns fatores poderiam explicar as diferenças na comparação das duas análises:

- espessura real das paredes do vaso de pressão nos três pontos específicos não é conhecida, e por isso foram consideradas as espessuras de projeto no modelo
- limitação no número de nós do ANSYS versão estudante impossibilitou o refinamento da malha
- erros experimentais como alinhamento das direções longitudinal e circunferencial do extensômetro com as direções longitudinal e circunferencial do costado e do tampo superior
- construção do modelo e aplicação das condições de contorno como a falta da representação da solda na intersecção do tampo superior com a conexão
- localização real dos três pontos específicos no vaso de pressão do teste hidrostático não é conhecida, e por isso a localização no modelo foi aproximada.
- propriedades mecânicas reais dos materiais não são conhecidas, e por isso foram consideradas as propriedades de norma e projeto no modelo
- dados dos extensômetros podem não ser exatamente os indicados na embalagem, como valor de resistência e fator do extensômetro

#### **4.5 Tensões admissíveis do ASME na pressão do teste hidrostático**

Neste item foram apresentados e discutidos os resultados da tensão equivalente de von-Mises obtidas por meio da linearização da tensão pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS, na pressão do teste hidrostático, e também realizada a comparação com as tensões admissíveis do ASME seção VIII divisão 2.

De acordo com o Item 2.6, o código ASME seção VIII divisão 2 define alguns valores de tensões admissíveis para as tensões primárias de membrana  $P_m$  e flexão  $P_b$  no teste hidrostático, conforme as equações 8, 9 e 10.

$$P_m \leq 0,95.S_y \quad (8)$$

$$P_m + P_b \leq 1,43.S_y \quad \text{para } P_m \leq 0,67.S_y \quad (9)$$

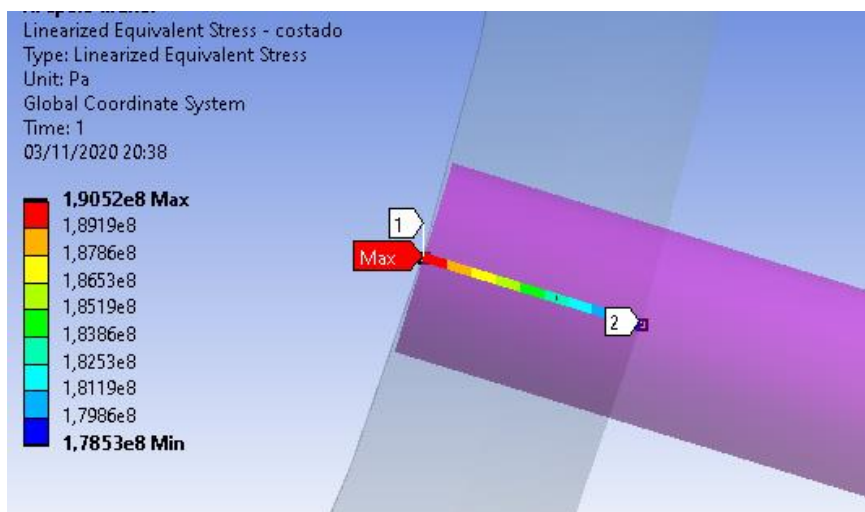
$$P_m + P_b \leq (2,43.S_y - 1,5.P_m) \quad \text{para } 0,67.S_y < P_m \leq 0,95.S_y \quad (10)$$

Para o vaso de pressão deste trabalho a tensão de escoamento  $S_y$  considerada foi de 262 MPa, conforme Tabela 1. Substituindo na equação 8, a tensão primária geral de membrana  $P_m$  não pode exceder o valor de tensão admissível de 248,9 MPa na pressão de 15 MPa. Para se saber qual equação utilizar, equação 9 ou equação 10, deve-se calcular o valor de  $0,67.S_y$ . Substituindo  $S_y$  por 262 MPa, encontra-se o valor de 175,54 MPa.

#### 4.5.1 Costado

A Figura 118 mostra a linearização da tensão equivalente de von-Mises ao longo da espessura da parede do vaso de pressão no ponto específico do costado na pressão de 15 MPa, sendo o ponto 1 interno e o ponto 2 externo ao costado.

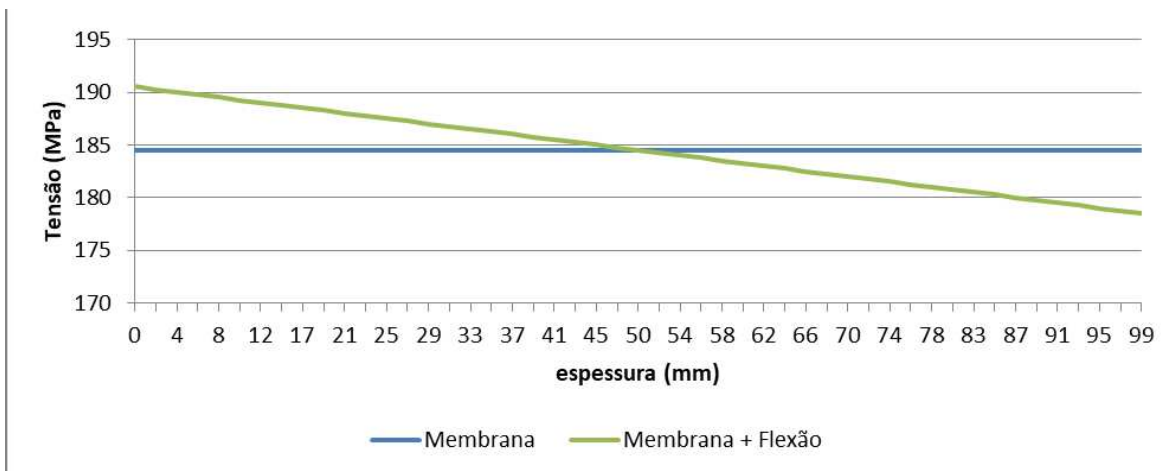
Figura 118: Linearização da tensão equivalente de von-Mises no ponto específico do costado



Fonte: autor (2021)

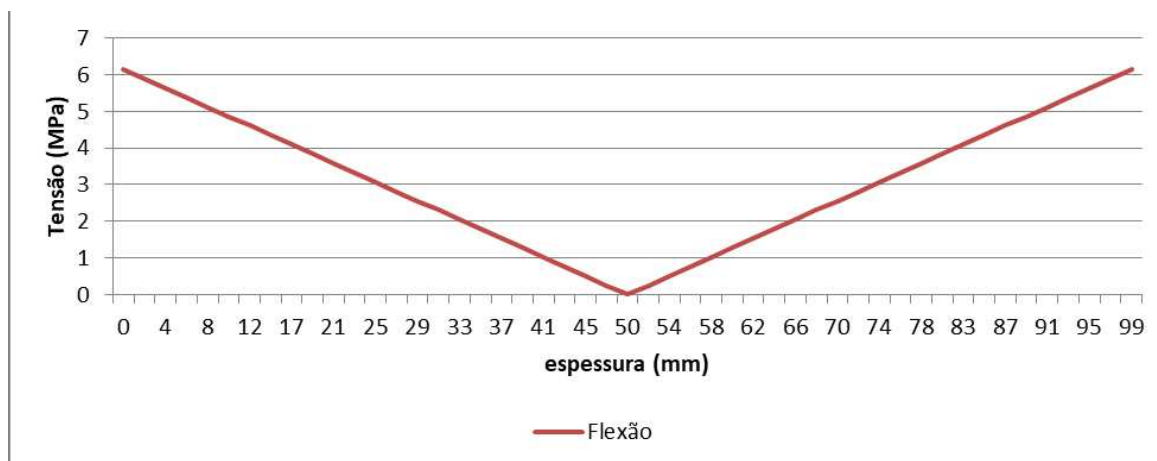
Com o resultado da linearização foram elaborados os gráficos das Figuras 119 e 120, sendo possível observar que a tensão de membrana tem valor constante de 184,52 MPa, a tensão de flexão varia de 0 até 6,14 MPa e a tensão de membrana + flexão varia de 178,53 MPa até 190,52 MPa.

Figura 119: Tensão de membrana e de membrana + flexão no ponto específico do costado



Fonte: autor (2021)

Figura 120: Tensão de flexão no ponto específico do costado



Fonte: autor (2021)

Analisando os valores das tensões no ponto específico do costado após a linearização de tensão, observa-se que o valor da tensão de flexão é baixo em comparação ao valor da tensão de membrana, em torno de 3,33%, e que a tensão de membrana + flexão no ponto interno do costado é maior que o ponto externo.

Em relação à equação 8, o valor da tensão de membrana no costado, 185,52 MPa, não excede o valor de 248,9 MPa, permitindo que a pressão de teste hidrostático de 15 MPa fosse aplicada.

O valor da tensão de membrana no costado, 184,52 MPa, é maior que o valor de 175,54 MPa ( $0,67.S_y$ ). Assim, deve-se utilizar a equação 10 para o cálculo do

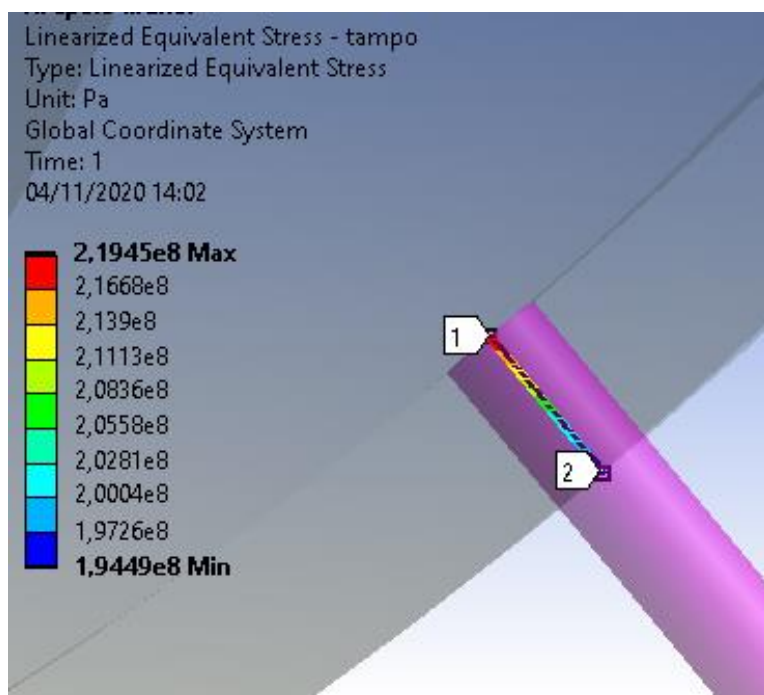


valor admissível da tensão de membrana + flexão. Substituindo  $P_m$  por 184,52 e  $S_y$  por 262 na equação 10, calculou-se o valor de 359,88 MPa, o qual não é excedido pelo valor da tensão de membrana + flexão encontrada no ponto específico do costado, que é de 190,52 MPa.

#### 4.5.2 Tampo superior

A Figura 121 mostra a linearização da tensão equivalente de von-Mises ao longo da espessura da parede do vaso de pressão no ponto específico do tampo superior na pressão de 15 MPa, sendo o ponto 1 interno e o ponto 2 externo ao tampo superior.

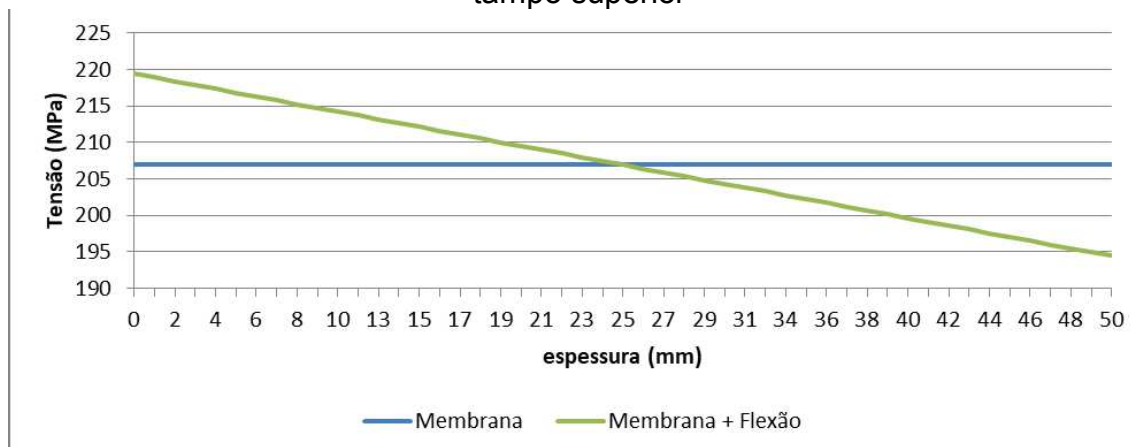
Figura 121: Linearização da tensão equivalente de von-Mises no ponto específico do tampo superior



Fonte: autor (2021)

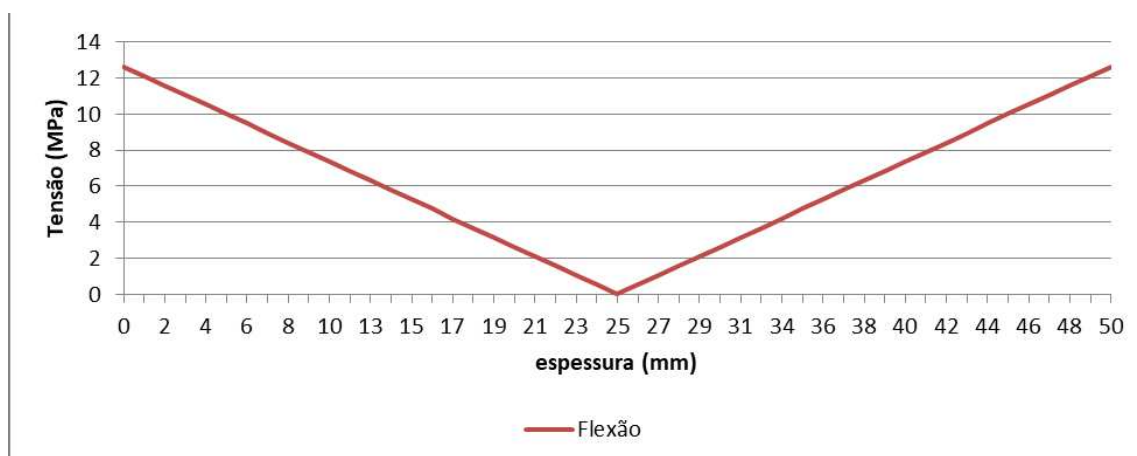
Com o resultado da linearização foram elaborados os gráficos das Figuras 122 e 123, sendo possível observar que a tensão de membrana tem valor constante de 206,92 MPa, a tensão de flexão varia de 0 até 12,63 MPa e a tensão de membrana + flexão varia de 194,49 MPa até 219,45 MPa.

Figura 122: Tensão de membrana e de membrana + flexão no ponto específico do tampo superior



Fonte: autor (2021)

Figura 123: Tensão de flexão no ponto específico do tampo superior



Fonte: autor (2021)

Analisando os valores das tensões no ponto específico do tampo superior após a linearização de tensão, observa-se que o valor da tensão de flexão é baixo em comparação ao valor da tensão de membrana, em torno de 6,10%, e que a tensão de membrana + flexão no ponto interno do tampo superior é maior que o ponto externo.

Em relação à equação 8, o valor da tensão de membrana no costado, 206,92 MPa, não excede o valor de 248,9 MPa, permitindo que a pressão de teste hidrostático de 15 MPa fosse aplicada.

O valor da tensão de membrana no tampo superior, 206,92 MPa, é maior que o valor de 175,54 MPa ( $0,67.S_y$ ). Assim, deve-se utilizar a equação 10 para o cálculo

do valor admissível da tensão de membrana + flexão. Substituindo  $P_m$  por 206,92 e  $S_y$  por 262 na equação 10, calculou-se o valor de 326,28 MPa, o qual não é excedido pelo valor da tensão de membrana + flexão encontrada no ponto específico do costado, que é de 219,4 MPa.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho foi realizado em uma organização privada na área petrolífera, e com base nos resultados das tensões obtidos por meio das quatro análises (teoria de membrana, ASME, MEF e experimental), foi possível observar que os valores das tensões longitudinal e circunferencial obtidos pela análise experimental são menores que os valores obtidos pelas análises da teoria de membrana, do código ASME e do MEF nos dois pontos distantes de descontinuidade geométrica (costado e tampo superior). Porém, para o ponto próximo de descontinuidade geométrica (intersecção do tampo superior com conexão), os valores das tensões longitudinal e circunferencial obtidos pela análise experimental são maiores que os valores obtidos pelas análises da teoria de membrana e do código ASME e menores que os valores do MEF, demonstrando na prática que nas regiões próximas de descontinuidade geométrica há tensões de flexão que não são consideradas pela teoria de membrana e pelo código ASME, mas que são obtidas pelo MEF. Foi possível observar também que a região de intersecção do tampo superior com a conexão obteve o valor de tensão mais elevado de todo o vaso de pressão (desconsiderando o corpo da conexão), sendo assim a região mais crítica.

A linearização da tensão obtida pelo *software* ANSYS demonstrou que a tensão de flexão tem valores muito baixos quando comparados com a tensão de membrana ao longo da espessura da parede do vaso de pressão para os dois pontos específicos distantes de descontinuidade geométrica, o que é condizente com a teoria de membrana, na qual a tensão de flexão não é considerada.

A análise numérica, pelo método dos elementos finitos no *software* ANSYS, se mostrou uma ferramenta poderosa e confiável na análise de tensões em vasos de pressão, pois permite a análise de tensões em regiões críticas, como as regiões próximas de descontinuidades geométricas, diferentemente das análises pela teoria de membrana e formulações do código ASME.

A análise experimental durante o teste hidrostático de um caso real de vaso de pressão, que é utilizado em um sistema de desidratação de gás em plataforma de petróleo, juntamente com as outras três análises, contribuiu para o entendimento de que as tensões de flexão em regiões próximas de descontinuidades geométricas possuem valores mais elevados, tornando estas regiões mais críticas.

Este trabalho atingiu os objetivos propostos, mesmo com algumas restrições, como o conhecimento das espessuras e propriedades mecânicas reais do vaso de pressão, a limitação no número de nós e a localização real dos três pontos analisados.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-de-gas-natural>>. Acesso em: out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/movimentacao-estocagem-e-comercializacao-de-gas-natural/apresentacao>>. Acesso em: out. 2020.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Disponível em: <<https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/history-of-asme-standards>>. Acesso em: set. 2020.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and pressure vessel code: Rules for construction of pressure vessels, Section VIII, Division 2. New York, 2013.

AMBRÓSIO, A.A.P.G.O **Análise de desempenho de desidratação de gás natural por adsorção em peneiras moleculares**. 159f. (Dissertação de mestrado em Ciências). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>>. Acesso em: set. 2020.

BRASIL. Escola Nacional da Inspeção do Trabalho. NR 13 Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento. 2019. Disponível em: <[https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\_SST/SST\\_NR/NR-13.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-13.pdf)>. Acesso em: set. 2020.

CARRARO, D.F., ABREU J.P., BARBOSA M.M. **Projeto de um vaso de pressão para utilização em uma planta marítima de produção de petróleo**. (Monografia para graduação em engenharia mecânica). Volta Redonda, UniFOA, 2013.

COSTA, D.S.O. **Avaliação do desempenho do processo de desidratação do gás natural de uma unidade offshore com a equação de estado REDLICH-KWONG-ASPEN**. 62f. (Monografia para graduação em engenharia química). Belém, Universidade Estadual do Pará, 2014.

DALLY W., J.; RILEY F., W. Experimental Stress Analysis. 3. ed. Tokyo: McGraw-Hill, 1978.

DUBAL, Sumit, KADAM, Hemantkumar. Pressure Vessel Accidents: Safety Approach. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). v.30, n.1, p.125-128, jan/2017.

FIGUEIREDO, C.D.R. **Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no projeto por análise de vasos de pressão nucleares**. 123f. (Dissertação de mestrado em Tecnologia Nuclear). São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2021.

FILHO, J.S.P. **Análise de efeitos de teste hidrostático em vaso de pressão**. 133f. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica). Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

GLYNIADAKIS, S., MARTINS, M.S., TOMAZINI, J.E. Analysis of Stresses in a Pressure Vessel for Didactic Purposes. In: International Symposium on Solid Mechanics, 7<sup>o</sup>, 2019, São Carlos.

GOMES, D.A.A. *et al.* Simulação de um sistema de desidratação de gás natural utilizando sistemas microemulsionados como líquido dessecante. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 4<sup>o</sup>, 2007, Campinas.

GOMIDE, R. Operações unitárias: operações de transferência de massa. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Dag Gráfica e Editora Ltda., 1988 v. 4.

GONÇALVES, C.P. **Análise de tensões pelo método dos elementos finitos em projetos de vaso de pressão: estudo de caso do setor sucroenergético**. 98f. (Dissertação de mestrado em Projeto Mecânico). Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, 2016.

GUPTA, S.R., VORA, C.P. A review paper on pressure vessel design and analysis. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). v.3, n.3, p.295-300, mar/2014.

HOFFMANN, K. - An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. 2012. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/0112/livro-de-referencia-sobre-medicao-com-strain-gauges/>>. Acesso em: agosto 2020.

JEGATHEESAN, J., ZAKARIA, Z. Stress analysis on pressure vessel. Environment & Ecosystem Science (EES). p.53-57, jul/2018.

KHARAT, Avinash., KULKARNI, V.V. Stress Concentration at Openings in Pressure Vessels – A Review. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. v.2, n.3, p.670-678, mar/2013.

KRÜGER, R.L. **Análise de tensões em bocais de vasos de pressão cilíndricos: comparação entre o método do boletim WRC 297 e o método de elementos finitos**. 127f. (Dissertação de mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial). Salvador, SENAI CIMATEC, 2014.

LARA, R.S. **Análise de concentração de tensões em juntas soldadas**. 100f. (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

LAWATE, Sourabh. Analysis of heads of pressure vessel. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. v.4, n.2, p.759-765, fev/2015.

MACHADO, P.B. **Análise comparativa de tecnologia de separação supersônica para o condicionamento de gás natural.** 151f. (Dissertação de mestrado em Ciências). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MELO, E.M., ALBUQUERQUE, P.J.R. Emprego de Extensômetros Elétricos de Resistência para Instrumentação de Estacas Metálicas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17º, 2014, Goiânia.

MENDONÇA, D.P. **Análise de tensões através do método dos elementos finitos de vaso de pressão projetado conforme código ASME.** 137f. (Dissertação de mestrado em Projetos). Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, 2011.

MIRANDA, J.R.F. **Análise das tensões atuantes em intersecções entre bocais e vasos de pressão cilíndricos sem e com chapa de reforço sob pressão interna.** 124f. (Dissertação de mestrado em Projeto Mecânico). Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

MOTTER, G. Avaliação do efeito do fano por fadiga em uma poltrona de ônibus urbano: correlação de dados de campo e de laboratório. 67f. (Monografia para graduação em engenharia mecânica). Caxias do Sul, Universidade de Caxias do Sul, 2015.

NEVES, J.C.G. **Metodologias para avaliação elastoplástica de tubulações industriais.** 71f. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

NIRANJANA, S.J., PATEL, S.V., DUBEY, A.K. Design and Analysis of Vertical Pressure Vessel using ASME Code and FEA Technique. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 376, 2018.

NOGUEIRA, B.F. **Estratégia computacional para projeto de vaso de pressão.** 222f. (Monografia para graduação em engenharia mecânica). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

PANTOJA, C.E. **Análise de viabilidade técnica e econômica de tecnologias de processamento de gás natural.** 571f. (Dissertação de mestrado em Processos Industriais). São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2009.

SANCHES, I.J., FURLAN, D.C. Métodos numéricos. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007.



SCHIARA, L.S., Ribeiro, G.O., (2016). Finite element mesh generation for fracture mechanics in 3D coupled with ansys®: elliptical cracks and lack of fusion in nozzle welds. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 38:253–263. <https://doi.org/10.1007/s40430-015-0324-6>

SILVA, A.B. **Projeto de vaso de pressão segundo norma ASME e método dos elementos finitos**. 142f. (Dissertação de mestrado em Projeto Mecânico). Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

SOUZA, R.M. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. Universidade Federal do Pará, 2003.

TAVARES, J.M.R.S., PADILHA, A.J. Introdução ao método dos elementos finitos. Porto, Universidade do Porto, 1998.

TELLES, P.C.S. **Vasos de pressão**. 2ª Edição Rio de Janeiro, LTC Editora, 2012.

TIMOSHENKO, S. Resistência dos Materiais. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1977.

UNNAVA, C.R., RAMAKRISHNA, C.H. Design and analysis of spherical shell with radial nozzle in pressure vessel. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. v.3, n.1, p.52-54, out/2013.

VAZ, L.E. Método dos elementos finitos em análise de estruturas. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.