



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA - DET
CURSO DE ENGENHARIA MECANICA

JADSON JÁCOME DA SILVA

**O USO DE SIMULAÇÃO DE FEM/FEA NO PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO
EM ATENDIMENTO A ASME BPVC SEÇÃO VIII - DIVISÃO 1 E 2**

MOSSORÓ-RN

2022

JADSON JÁCOME DA SILVA

**O USO DE SIMULAÇÃO DE FEM/FEA NO PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO
EM ATENDIMENTO A ASME BPVC SEÇÃO VIII- DIVISÃO 1 E 2**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alex Sandro de A. Silva

MOSSORÓ-RN

2022

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)



Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

JADSON JÁCOME DA SILVA

**O USO DE SIMULAÇÃO DE FEM/FEA NO PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO
EM ATENDIMENTO A ASME BPVC SEÇÃO VIII- DIVISÃO 1 E 2**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

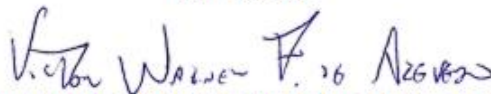
Defendida em: 15 / 06 / 2022

BANCA EXAMINADORA

ALEX SANDRO DE ARAUJO SILVA:
91673321372
I am the author of this document
your signing location here
2022.06.23 09:24:41-03'00'

ALEX SANDRO DE
ARAÚJO SILVA:
91673321372

Prof. Dr ALEX SANDRO DE ARAÚJO SILVA
Presidente



Prof. Dr. VICTOR WAGNER FREIRE DE AZEVEDO
Membro

FABRICIO JOSE NOBREGA CAVALCANTE:02355457409
Assinado de forma digital por FABRICIO JOSE NOBREGA CAVALCANTE:02355457409
Dados: 2022.06.22 17:27:02 -03'00'

Prof. Dr. FABRICIO JOSÉ NOBREGA CAVALCANTE
Membro

Dedico este trabalho aos meus avôs, Fernando Jácome, Nazinha Jácome e Itamar Soares que sempre me incentivaram nos estudos (In Memoriam).

Agradeço a Deus, primeiramente, e aos meus pais por todo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP no 50/2015, por todo o apoio financeiro ao projeto.

Ao PRH-55.1, por todo conhecimento adquirido através de visitas, palestras, seminários e workshops e todo o apoio, fundamental para o andamento da pesquisa.

À Virtual-CAE pela disponibilização do software Femap, e por contribuir com conhecimentos essenciais para a pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alex Sandro de Araújo Silva, por todos os ensinamentos passados.

À banca examinadora, pela disponibilidade e por todas as críticas construtivas para melhorar o presente trabalho.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos estanques capazes de suportar diferentes valores de pressão em seu interior. Esses equipamentos, encontrados em vários setores de diversas indústrias, ainda apresentam um elevado grau de conservadorismo em seu projeto. Justificado, devido as suas aplicações que podem abranger grandes pressões e diferentes fluidos. No seguinte trabalho, um vaso já utilizado na indústria foi analisado pela norma ASME Secção VIII, Divisão 1 e 2. Para verificar se o dimensionamento o correu de forma correta, foi utilizado a divisão 1, e em seguida, foi aplicado a divisão 2 dessa mesma norma. Sendo essa, uma análise por métodos numéricos, para verificar as tensões que o vaso será submetido, e com isso, determinar a possibilidade de uma redução de espessura no projeto desse vaso. O que resultaria em uma maior economia de material, redução de peso, e ainda uma caracterização dos pontos de maior concentração de tensão da estrutura. A metodologia consistiu na modelagem em 3 dimensões do equipamento, e posteriormente a exportação para o software de elementos finitos e, desse modo, realizando o processo de criação da malha, e a análise do equipamento nas condições de campo. Os resultados de espessura e tensões em relação a divisão 1, são compatíveis com a norma, e a divisão 2, como esperado, apresenta valores bem a baixo do permitido, o que indica uma grande possibilidade de diminuição da espessura, sem causar riscos a sua estrutura.

Palavras-chave: Vasos de pressão; Elementos Finitos; ASME Secção VIII.

ABSTRACT

Pressure vessels are watertight equipment capable of withstanding different values of pressure. These equipments, found in various sectors of different industries, still have a high degree of conservatism in their design. Justified, due to its applications that can cover large pressures and different fluids. In the following work, a vessel already used in the industry was analyzed by the ASME Section VIII, Division 1 and 2 of the same norm. This being an analysis by numerical methods, to verify the stresses that the vessel will be submitted, and with that, to determine the possibility of a thickness reduction in the design of this vessel. This would result in greater material savings, weight reduction, and even a characterization of the points of greatest stress concentration in the structure. The methodology consisted of modeling the equipment in 3 dimensions, and then exporting it to the finite element software and, thus, performing the mesh creation process, and analyzing the equipment under field conditions. The thickness and stress results in relation to division 1 are compatible with the standard, and division 2, as expected, presents values below the allowed, which indicates a great possibility of reducing the thickness, without causing risks to its structure.

Keywords: Pressure vessel; Finite elements; ASME Section VIII.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de elementos.....	19
Figura 2	Casco cilíndrico de parede fina	20
Figura 3	Stress Categories and Limits of Equivalent Stress.....	23
Figura 4	Projeto de um vaso de pressão	25
Figura 5	Casco cilíndrico com 13mm de espessura	28
Figura 6	Tampo elipsoidal com 13 mm de espessura.....	29
Figura 7	Vaso modelado em 3D por meio do Solid Edge	31
Figura 8	Malha do vaso de pressão por meio do FEMAP	31
Figura 9	Vaso com todos os carregamentos e restrições aplicadas.	32
Figura 10	Carregamento e restrições	32
Figura 11	Tensão de membrana.....	33
Figura 12	Tensão Membrana + Flexão.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Informações de design e operação do vaso de pressão.....	25
Tabela 2	Informações do material do vaso: SA516-60	26
Tabela 3	Propriedades mecânicas do SA-516 Gr 60. (-30 a 40) °C	26
Tabela 4	Espessuras requeridas	29
Tabela 5	Análise de projeto pela divisão 1	30
Tabela 6	Resultado da análise de colapso plástico	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF	Método de elementos finitos
FEA	Análise de elementos finitos
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BPVC	Boiler and pressure vessel Code
PTH	Pressão de teste hidrostático
PMTA	Pressão máxima de trabalho admissível

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento do cilindro considerado
r	Raio do cilindro considerado
t	Espessura do cilindro considerado
σ_{θ}	Tensões axiais atuantes no cilindro devido à pressão interna
σ_x	Tensões circunferenciais atuantes no cilindro devido à pressão interna
σ_r	Tensões radiais atuantes no cilindro devido à pressão interna
P_m	Tensões de membrana primárias gerais
P_l	Tensões de membrana primárias locais
P_b	Tensões de flexão primárias
Q	Tensões secundárias
F	Tensões de pico
S	Tensão admissível do material

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Processo de criação da norma ASME para vasos de pressão	18
3.2 Método dos elementos finitos.....	19
3.3 Teoria de placa e casca	20
3.4 Caracterização das tensões	21
3.4.1 Tensões primarias	21
3.4.2 Tensões secundarias (Q).....	22
3.4.3 Tensão de pico (F)	22
3.5 Critérios de falha ASME seção VIII divisão II	23
3.6 Análise de projeto pela ASME BPVC seção VIII divisão 1.....	23
3.7 Análise de projeto pela ASME BPVC seção VIII divisão 1.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 Estudo do método dos elementos finitos juntamente com o código ASME BPVC seção VIII Divisão 1 e 2	25
4.2 Análise do projeto e modelagem da estrutura a partir de um vaso existente.....	25
5. RESULTADOS E DISCURSÕES	28
5.1 Dimensionamento e resultados a partir da Divisão 1	28
5.1.1. Espessura para o casco cilíndrico pela divisão 1	28
5.1.1.1. Tensão circunferencial (juntas longitudinais)	28
5.1.1.2 Tensão Longitudinal (Juntas Circunferenciais) - UG-27	28
5.1.2. Espessura do tampo Elipsoidal - UG-32	29
5.1.3. Cálculo da PTH	30
5.2 Dimensionamento e resultados a partir da divisão 2	30
5.2.1 Modelagem e criação da malha	30

5.3 resultados a partir da divisão 2	32
5.3.1 Colapso Plástico	32
5.3.1.1 Analise tensão de geral de membrana	32
5.3.1.2 Analise tensão de membrana local	33
5.3.1.4 Analise de tensão secundaria	34
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são recipientes estanques capaz de conter um fluido pressurizado, podem ser fabricados com diversas formas e dimensões, desenvolvendo diversos papéis fundamentais na indústria. Como por exemplo, reservatórios de altas ou baixas pressões, podendo conter os mais variados tipos de fluidos, também são usados como equipamentos para processos, sendo estes os responsáveis por transformações físicas e químicas de materiais sólidos e líquidos de diversas industrias. Dentre estas, encontram-se as refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas, terminais de armazenamento e distribuições de petróleo, indústria alimentícia, farmacêutica entre outras (TELLES, 1996).

Para o projeto desses equipamentos, o Brasil adota o Código ASME - Código mundialmente reconhecido para projetos de vasos de pressão - que lista uma série de normas e premissas, como por exemplo, coeficientes de segurança, padronizações e especificação de material, detalhes de fabricação e inspeção. Visto o quão abrangentes esses vasos são para as indústrias e os riscos que esses equipamentos podem representar se não dimensionados da forma correta, se torna indispensável o conhecimento e uso correto da Norma (MENDONÇA, 2011).

O código ASME Secção VIII, divisão 2, tem seu dimensionamento utilizando métodos numéricos, que, com os recentes avanços da tecnologia, tornou-se acessível às indústrias. A partir dessa metodologia de projeto, e uma melhor análise nos materiais empregados, a divisão 2, utiliza maiores valores de tensão admissível para os materiais empregados, conseqüentemente, menores valores de fator de segurança. Reduzindo assim, o custo e o peso dos equipamentos mantendo ou até aumentando a segurança (ASME DIV-2, 2007).

2-OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicação do método de elementos finitos na área de vasos de pressão busca otimizar o projeto desses equipamentos, uma vez que esse método pode auxiliar na análise de pontos de concentração de tensões, na utilização de sobre espessuras excessivas e pode ainda detectar uma possível falha antes mesmo da fabricação de um modelo físico, gerando uma grande economia e ainda aumentando a segurança desses equipamentos.

2.2 Objetivos Específicos

- Modelar o vaso de pressão escolhido, em CAD.
- Analisar as tensões atuantes no vaso de pressão usando o método dos elementos finitos.
- Comparar os resultados obtidos por FEM/FEA, com os obtidos analiticamente através Norma ASME BPCV I e II.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processo de criação da norma ASME para vasos de pressão

Desde o século XIX já podemos destacar a necessidade de uma norma regulamentadora para os vasos de pressão, devido aos inúmeros acidentes envolvendo caldeira de locomotivas a vapor. Porém, só após uma terrível explosão que ocorreu em Brockton, Massachusetts (EUA), em 1905, que deixou 58 mortos e 117 feridos, foi formulada a primeira norma americana de uso legal e obrigatório, sendo está a responsável por regular o projeto e construção de caldeiras estacionárias. Essa norma publicada em 1907 é conhecida como Massachusetts Rules, é considerada a semente do Código ASME. Em 1911, foi nomeada uma comissão do ASME para elaborar uma norma, que teve sua primeira edição em 1914, abrangendo apenas caldeiras estacionárias. Já em 1924, foi publica a Seção VIII, abrangendo vasos de pressão não sujeitos a chama. Até o início dos anos 60, as regras de projeto listadas nos códigos eram em sua maioria baseadas na experiência acumulada e procedimentos relativamente simples. Tais regras buscaram garantir a segurança do projeto pela convicção de que a tensão circunferencial do vaso estivesse bem abaixo do que a tensão de escoamento do material utilizado, que por sua vez, teria que ser dúctil, para que conseguisse acomodar de modo seguro as tensões localizadas de pico que apareceram em decorrência do estresse aplicado nos vasos de pressão (TINOCO et al., 2015).

Contudo em 1963 a ASME estabeleceu um comitê especial para realizar uma série de mudanças na filosofia das normas de projetos aplicadas aos vasos de pressão, esta nova filosofia foi primeiramente publicada pelo ASME Seção III, influenciada pelo crescente desenvolvimento das centrais de energia nucleares, que buscavam um melhor entendimento do comportamento estrutural dos vasos, visando eliminar as fraquezas dos códigos existentes e diminuir o elevado conservadorismo. Na nova visão era necessário então uma avaliação mais detalhada das tensões atuantes na estrutura, usando então os conhecimentos da teoria da plasticidade, da mecânica da fratura e da avaliação da vida útil a fadiga (TINOCO et al., 2015).

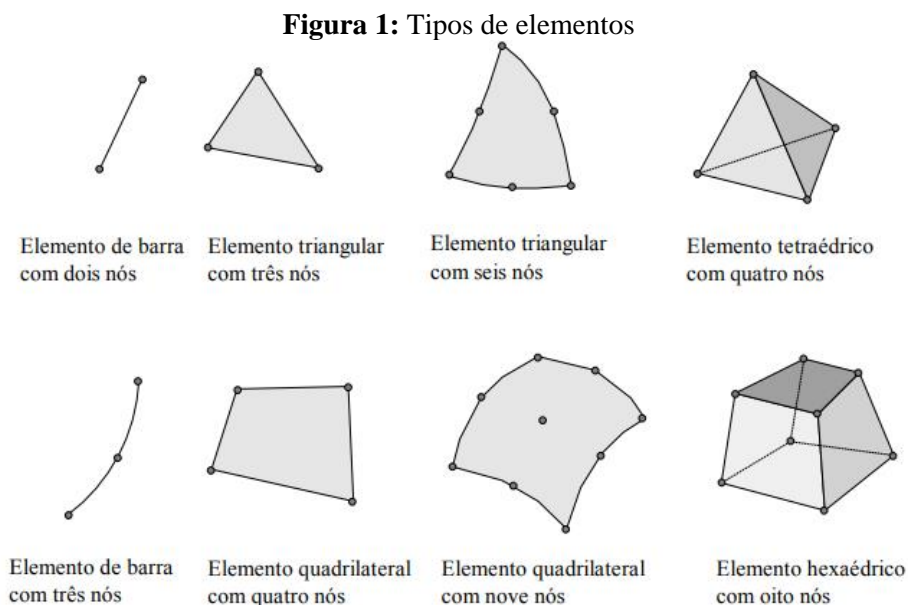
Então foram definidas duas rotas de projetos, sendo a primeira para vasos padronizados mais similar aos procedimentos anteriores, porém ainda com um maior rigor analítico e com coeficientes de seguranças mais baixos, chamada de Design by Rules, a segunda para suprir a necessidade de projetar vasos não padronizados ou com condições não convencionais de operações não convencionais, chamada de Design by Analysis, pois necessita que o projetista faça uma análise detalhada das tensões atuantes no vaso para garantir que as mesma satisfaçam os valores de tensões admissíveis requeridos Norma (MENDONÇA, 2011).

ASME Seção VIII divisão 2 (Regras alternativas para vasos de pressão) teve seu formato baseado na ASME Seção III, e teve sua primeira publicação foi em 1968, onde os procedimentos Design by Analysis eram fornecidos no seu apêndice 4, o que mudou com a revisão geral da divisão 2 que ocorreu em julho de 2007. Desde então os procedimentos de análise de tensões e fadiga fazem parte desse protocolo Norma (MENDONÇA, 2011).

3.2 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em um método numérico que, por meio de uma subdivisão de geometrias complexas, ligadas por nós e por elementos, é capaz de analisar diversos fenômenos físicos. Pode ser descrito através de equações diferenciais parciais, aplicadas em uma geometria, utilizando algumas condições de contorno. (SOUZA, 2003).

A ideia fundamental do MEF, como mencionada anteriormente, busca discretizar regiões complexas com infinitos pontos, utilizando finitos elementos com propriedades conhecidas ligados por nós, formando a malha de elementos que descreve de forma simplificada uma estrutura analisada. Existem diversos tipos de elementos finitos sendo estes, elementos de viga, triangular, quadriláteros ou ainda elementos tridimensionais como elementos tetraédricos, cúbicos hexaédricos e outros como pode ser visto na figura 1 (SOUZA, 2003).



Fonte: SOUZA, 2003

Outrossim, deve-se destacar, que o número de elementos é proporcional a qualidade da aproximação dos resultados, de modo que quanto maior o número de elementos mais próximo do valor exato, maior também o poder computacional exigido, dessa forma deve ponderar a

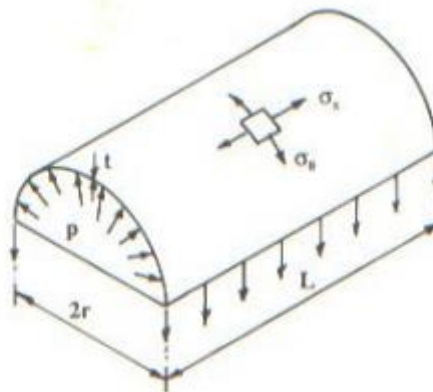
precisão desejada com os valores de convergência aceitáveis, assim mantendo uma boa relação entre esses dois fatores (SOUZA, 2003).

3.3 Teoria de placa e casca

As duas metodologias de projeto - Divisão 1 e 2 -, inicialmente, foram desenvolvidas com base na teoria de placa e cascas, baseando todas as equações na teoria de cascas finas. Dessa forma, todo o conhecimento desenvolvido e até hoje adota as tensões tem como base a teoria de cascas finas, e são válidas para $r/t > 10$, sendo (r) o raio do casco cilíndrico e (t) espessura da parede (MIRANDA, 2007).

Um casco fino, cilíndrico de raio (r) e espessura (t) submetida a um carregamento de pressão interna (p). resultara em tensões que surgirão na parede cilíndrica na direção circunferencial e, caso o cilindro for fechado também nas extremidades, surgirão ainda tensões na direção axial, como visto na figura 1 (MIRANDA, 2007).

Figura 2 :Casco cilíndrico de parede fina



Fonte: Miranda, 2007

O modelo do cilindro - cortado longitudinalmente - é apresentado na Figura 2. Nele, o comprimento, raio e espessura são denotados respectivamente por L , r e t . As tensões circunferenciais, devido à aplicação da pressão interna p , são denotadas por σ_θ e as tensões axiais, por σ_x , que por se tratar de um equipamento com casca fina, são assumidos uniformes através de toda a espessura e ao longo do comprimento (MIRANDA, 2007).

Como as forças devem estar em equilíbrio temos, podemos descrever a secção circunferencial como:

$$2tL\sigma_\theta = 2rLp \rightarrow \sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

De modo análogo, considerando a seção diametral e fazendo o equilíbrio longitudinal encontra-se a tensão longitudinal:

$$2\pi r t \sigma_x = \pi r^2 p \rightarrow \sigma_x = \frac{pr}{2t} \quad (2)$$

Estas tensões são normalmente conhecidas como tensões de membrana, desde que não haja variação da tensão através de espessura, por exemplo, pela ação de tensões de flexão (MIRANDA, 2007).

Caso opte-se por realizar a análise por meio de elementos sólidos, seria necessário, posteriormente, realizar uma linearização de tensão, além de se obter uma malha com maior número de elementos e conseqüentemente maior tempo de resolução. Ao utilizar elementos de casca, ao se analisar por MEF, as tensões de membrana e flexão podem ser obtidas diretamente, além de se obter uma malha com menor número de elementos quando comparada com a malha sólida (ENSUS, 2018).

Desse modo, os elementos de casca por respeitarem a teoria de placas finas onde as deformações e tensões na direção da espessura podem ser desprezadas. Para isso deve-se analisar a relação do raio do vaso com a espessura. Caso a relação de r/t for maior que 10, o vaso pode ser tratado como elemento de paredes finas “thin shell” (ENSUS, 2018).

3.4 Caracterização das tensões

3.4.1 Tensões primarias

São tensões produzidas por cargas mecânicas aplicadas na estrutura, sendo sua principal característica não ser auto limitada, ou seja, caso os valores das tensões primarias atinjam a tensão de escoamento do material, a falha irá ocorrer ou no mínimo deformações plásticas na estrutura do equipamento (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

As tensões primárias normais são subclassificação em:

- Tensão de membrana: que por sua vez também tem duas subclassificações (geral ou local), é obtida usando a teoria de cascas finas.
- Tensão geral de membrana (P_m): caso estejam atuando em todo o equipamento;
- Tensão local de membrana (P_L): caso estejam atuando em discontinuidades no equipamento.
- Tensão de flexão (P_b): localizada longe de discontinuidades e concentrações de tensão, decorrem normalmente de forças mecânicas.

$$P_m \leq K * S \quad (3)$$

$$P_L \leq K * 1,5 * S \quad (4)$$

$$P_b + P_L \leq 1,5 * S \quad (5)$$

3.4.2 Tensões secundárias (Q)

São tensões geradas devido às restrições geométricas no próprio vaso, sendo estas tensões autolimitantes, por isso quando esse tipo de tensão atinge o escoamento ainda está longe de ocorrer uma falha (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

$$P_b + P_L + Q = 3 * S = S_{ps} \quad (6)$$

3.4.3 Tensão de pico (F)

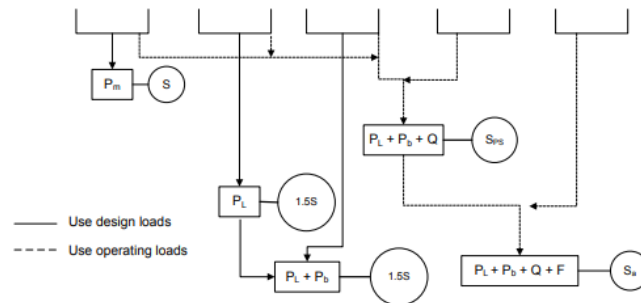
Trata-se de uma tensão extremamente localizada, entretanto não causa distorções notáveis na estrutura, mas podem causar trincas de fadiga (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

$$P_L + P_b + Q + F = S_a \quad (7)$$

O código ASME Secção VIII divisão 2, define as categorias de tensões, e auxilia no entendimento das tensões, como pode ser visto na figura 8. Entretanto, cabe ao projetista categorizar as tensões atuantes, e comparar com os valores admissíveis para cada categoria de tensão. Sendo a etapa de categorização das tensões de grande importância, uma vez que os limites admissíveis estão associados aos modos de falha a serem evitados (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

Figura 3: Stress Categories and Limits of Equivalent Stress

Stress Category	Primary			Secondary Membrane plus Bending	Peak
	General Membrane	Local Membrane	Bending		
Description (For examples, see Table 5.2)	Average primary stress across solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads.	Average stress across any solid section. Considers discontinuities but not concentrations. Produced only by mechanical loads.	Component of primary stress proportional to distance from centroid of solid section. Excludes discontinuities and concentrations. Produced only by mechanical loads.	Self-equilibrating stress necessary to satisfy continuity of structure. Occurs at structural discontinuities. Can be caused by mechanical load or by differential thermal expansion. Excludes local stress concentrations.	1. Increment added to primary or secondary stress by a concentration (notch). 2. Certain thermal stresses which may cause fatigue but not distortion of vessel shape.
Symbol	P_m	P_L	P_b	Q	F



Fonte: ASME seção VIII divisão II

3.5 Critérios de falha ASME seção VIII divisão II

Como mencionado no subitem 5.1.1.2, a ASME leva em consideração os seguintes requisitos de proteção contra falha (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

Colapso Plástico – Avalia possíveis locais onde grandes distorções possam ocorrer, devido a tensão atuante exceder os limites de resistência do material.

Falha Localizada – Pode ocorrer devido a descontinuidades na estrutura gerando pequenas regiões que excedam os limites de resistência do material.

Flambagem – Causada por cargas de compressão ou vácuo em vasos de pressão.

Falha por Fadiga – Componentes submetidos a carregamentos cíclicos, podendo levar ao aparecimento de trincas.

3.6 Análise de projeto pela ASME BPVC seção VIII divisão 1

A divisão 1 fornece uma série de fórmulas necessárias para calcular a espessura requerida, do casco e do tampo, além da tensão de membrana dos componentes básicos do vaso devido à pressão interna e externa. Caso houver cargas adicionais, o projetista deve adotar

procedimentos analíticos, afim de obtê-las. A máxima tensão direta de membrana, pode ser definida como a tensão normal uniformemente distribuída através de toda espessura da seção considerada (TINOCO et al, 2015).

Como escrito no parágrafo UG-23, do código ASME, A parede do vaso deve ser dimensionada de tal forma que a tensão máxima primária geral de membrana, resultante dos carregamentos listados no parágrafo UG-22, de forma simultânea, não exceda os limites de tensão admissível do material do vaso (TINOCO et al, 2015).

ASME VIII-divisão 1 abrange em seu escopo quaisquer vasos de pressão, exceto os seguintes:

- Vasos sujeitos a chama;
- Vasos sujeitos a ocupação humana;
- Vasos com pressão interna de operação entre 0 a 15 psig ou acima de 3000 psig
- Vasos com diâmetro inferior a 6 polegadas;
- Vasos para água pressurizada com pressão de operação até 300 psig
- Vasos para água quente com capacidade de até 0,454 m³ e temperatura até 99°C.

3.7 Análise de projeto pela ASME BPVC seção VIII divisão 1

O projeto pela divisão 2 – por requerer uma maior sofisticação nas certificações dos materiais e requisitos adicionais de detalhes de projeto, pode adota tensões admissíveis mais altas que as da divisão 1, gerando economia de material e, conseqüentemente, um equipamento mais leve (TINOCO et al, 2015).

A divisão possibilita a análise de vasos com geometrias diferentes das convencionais, e também diferentes combinações de carregamento, permitindo a análise de fadiga para condições cíclicas, e a análise de tensões em descontinuidades geométricas. Para tal, é utilizado o Critério de Tresca, por sua facilidade de aplicação e por ser adequada à análise por fadiga, de modo que a intensidade de tensão resultante não deve ultrapassar as tensões máximas admissíveis (TINOCO et al, 2015).

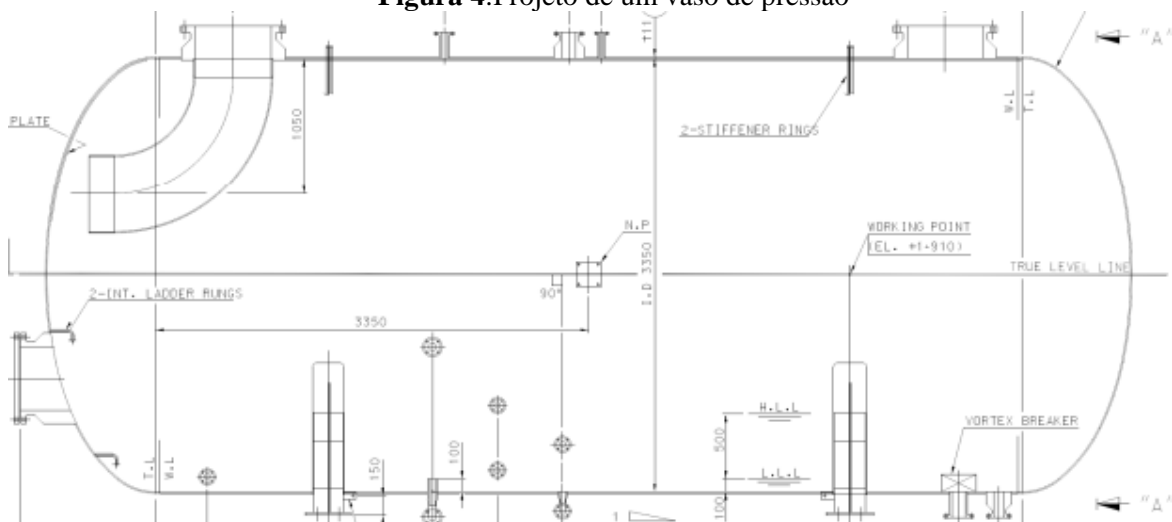
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Estudo do método dos elementos finitos juntamente com o código ASME BPVC seção VIII Divisão 1 e 2

A primeira etapa da pesquisa consiste no entendimento e domínio do método dos elementos finitos, que se trata de uma técnica de análise estrutural. Em paralelo, será feito o estudo do código ASME BPVC seção VIII divisão 1 e 2, que são documentos contendo os conjuntos de normas que auxiliam a fabricação dos vasos de pressão, sendo a divisão 1, ainda, a mais utilizada no Brasil, e baseia-se em equações mais conservadoras, contando assim, com o uso de elevados fatores de segurança. A divisão 2, onde será dado mais relevância, é baseada nas análises das tensões do equipamento, o que requerer profissionais mais capacitados e experientes, pois há um menor conservadorismo no dimensionamento desses equipamentos. Por isso, esse método vem ganhando cada vez mais destaque com a evolução da tecnologia e a chegada de novos softwares ao mercado (TINOCO et al, 2015).

4.2 Análise do projeto e modelagem da estrutura a partir de um vaso existente

Figura 4: Projeto de um vaso de pressão



Enquanto a figura 4 mostra o projeto do vaso, a tabela 1 mostra as informações coletadas a partir desse projeto, sendo este, um vaso de pressão projetado pela divisão 1, e localizado atualmente na cidade de Guimarães.

Tabela 1: Informações de design e operação do vaso de pressão

	Tensões	Temperaturas
DESIGN	3.52 kg/cm ² G	150/-45°C

OPERAÇÃO	Max:0.5kg/cm ² G/ Mim:0.0 kg/cm ² G/	120/-40°C 120/-40°C
MAWP NEW AND COLD	5,53 kg/cm ² G	
MAWP HOT AND CORRODED	3.92 kg/cm ² G	
HYDRO. TEST PRESSURE	8.3 kg/cm ² G	
PNEU. TEST PRESSURE	6.69 kg/cm ² G	
EFICIENCIA DA JUNTA: 0.85/1.0		
CORROSÃO PERMITIDA/FATOR DE CORROSSÃO: 3.0 mm		
MATERIAL: SA516-60N+S5		

A tabela 2, mostra todas as informações dos materiais, bem como suas localizações nas diferentes normas utilizadas, enquanto que a tabela 3, mostra todas as características do material utilizado, tanto para a divisão 1 quanto para a divisão 2.

Tabela 2:Informações do material do vaso: SA516-60

ASME BPVC Secção VIII Divisão 1	Carbon steel Plate SA-516 60; pg:10, N0:27
ASME BPVC Secção I Parte A II	Carbon steel Plate SA-516 60 pg 937
ASME BPVC Secção VIII Divisão 2	Tabela 05 - Carbon steel Plate SA-516 60; pg:378, N0:22
ASME BPVC Section II-Materials-Part D	

Tabela 3:Propriedades mecânicas do SA-516 Gr 60. (-30 a 40) °C

Tensão mínima de escoamento	220 MPa
Tensão mínima de ruptura	415 MPa
Coefficiente de expansão térmica	11,5 × 10 ⁻⁶ (mm/mm/°C)
Coefficiente de Poisson	0,30
Densidade	7750 kg/m ³
Módulo de elasticidade	200 GPa
Tensão admissível (Div. 1)	118 MPa
Tensão admissível (Div. 2)	147 MPa

Para a divisão 1 será analisado se as espessura e pressões de projeto estão de acordo com a norma ASME. Para a divisão 2, a partir do projeto, a estrutura foi modelada por meio do software CAD Solid EdgeTM, consultando todas as tabelas necessárias, para então dar início a criação de um modelo de elementos finitos, sendo a etapa de pré-processamento realizada no software FEMAPTM. O pré-processamento consiste na preparação da geometria, e a criação da malha de elementos finitos usando elementos do tipo QUAD4 da biblioteca de elementos do solver NASTRANTM no software FEMAPTM, como também, será feita a definição das condições de contornos.

5. RESULTADOS E DISCURSÕES

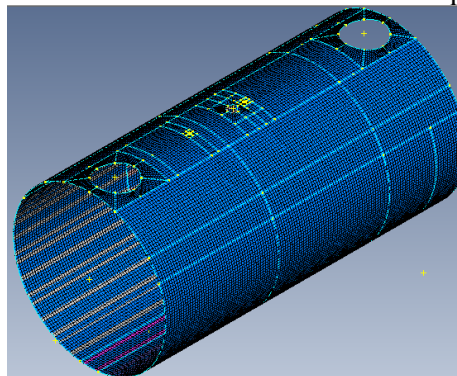
5.1 Dimensionamento e resultados a partir da Divisão 1

A Divisão 1 da norma ASME Seção VIII é chamada de *Design by Rules*, baseada em equações e experiência de diversos projetistas, o que a deixa com um elevado grau de conservadorismo e o limita a vaso de geometrias padrões e com pressão interna ou externa menor ou igual a 1,05 kgf/cm² e com diâmetro interno maior ou igual a 6 polegadas (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

5.1.1. Espessura para o casco cilíndrico pela divisão 1

Para esse caso, já temos a pressão circunferencial nas juntas longitudinais, por isso determinaremos as espessuras requeridas nas principais regiões dos vasos.

Figura 5: Casco cilíndrico com 13mm de espessura



Fonte: Própria.

5.1.1.1. Tensão circunferencial (juntas longitudinais)

Quando a espessura não ultrapassar a metade do raio interior, ou P não excede 0,385 SE, e se tratar de um vaso cilíndrico, as seguintes fórmulas devem ser aplicadas, encontradas no parágrafo UG – 27 da norma ASME divisão 1 (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

$$t_c = \frac{PR}{SE - 0.6P} = \frac{0,542 * 1675}{118 * 1 - 0.6 * 0,542} = 7,71\text{mm} \quad (8)$$

Que é compatível com o valor que se tem no projeto do vaso.

5.1.1.2 Tensão Longitudinal (Juntas Circunferenciais) - UG-27

Quando a espessura não ultrapassar a metade do interior raio, ou P não excede 1,25SE, as seguintes fórmulas devem aplicar (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

$$t_c = \frac{PR}{2SE + 0.4P} = \frac{0,542 * 1675}{2 * 118 * 1 + 0.4 * 0,542} = 3,84\text{mm} \quad (9)$$

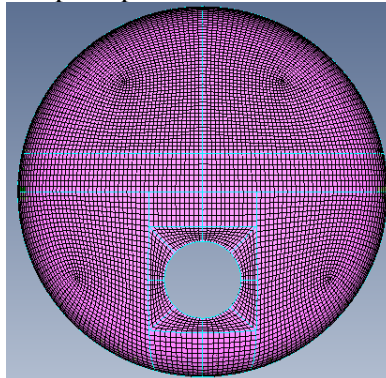
A tensão circunferencial é o dobro da tensão longitudinal, por isso a espessura de chapa para suporta a circunferencial é o dobro da longitudinal.

5.1.2. Espessura do tampo Elipsoidal - UG-32

Tampos elipsoidais com $ts/L \geq 0,002$, será determinado pela equação 10, e representado pela figura 6.

$$t_c = \frac{PD}{2SE - 0.2P} = \frac{0,542 * 3350}{2 * 118 * 1 - 0.2 * 0,542} = 7,69\text{mm} \quad (10)$$

Figura 6: Tampo elipsoidal com 13 mm de espessura.



Fonte: Própria.

A espessura requerida será a maior dentre todas as seções, ademais, por se tratar de um vaso em condições de meio corrosivo, será adicionado 3mm de sobre espessura de corrosão.

Tabela 4: Espessuras requeridas

Espessuras	mm
Espessura devido à Pressão Longitudinal, $t_{k,lon}$	7,71

Espessura devido à Pressão circunferencial, $t_{k,cir}$	3,84
Espessura devido à Pressão elipsoidal $t_{k,eli}$	7,69
Espessura necessária, t_k	7,71 \cong 8

5.1.3. Cálculo da PTH

Como trata-se de um vaso fabricado antes da revisão de 2007, usa-se 1.5*PMTA, porem atualmente o cálculo de acordo com a norma ASME Seção VIII Divisão 1 é de 1.3*PMTA para a tensão de teste hidrostático (ASME BPVC DIVISÃO 1, 2007).

$$PTH = 1,5 * PMTA = 1.5 * 0,542 = 0.813MPA \quad (11)$$

ou

$$8,6 = 8,29 \text{ Kgf/cm}^2$$

Tabela 5: Análise de projeto pela divisão 1

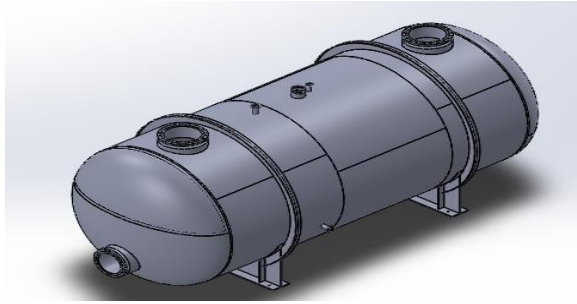
	Projeto	Calculado pela norma	Resultado
Tensão admissível	118Mpa	118Mpa	ok
Espessura necessária	11mm	8mm + 3mm = 11mm	ok
Pressão de teste hidrostático	8,3 Kgf /cm ²	8,29 Kgf/cm ²	ok

5.2 Dimensionamento e resultados a partir da divisão 2

5.2.1 Modelagem e criação da malha

Primeiramente a geometria foi modelada no Solid EdgeTM, como mostra a Figura 7, usando como base o projeto do vaso de pressão e seguindo o código ASME, em seguida, as partes modeladas foram exportado no formato parasolid para o FEMAPTM, para o início a etapa de pré-processamento.

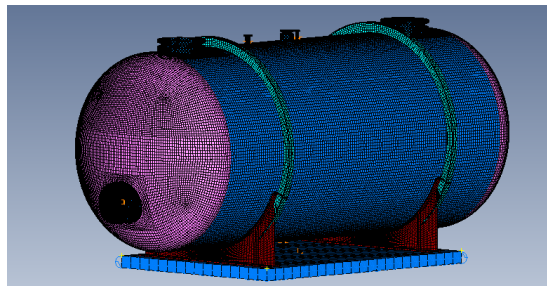
Figura 7: Vaso modelado em 3D por meio do Solid Edge



Fonte: Própria.

Na preparação da malha foi utilizado o elemento sólido tetraédrico linear para os flanges, e o elemento de placa para as demais partes, por sua formulação ser baseada na teoria de placa e casca, como mostrado na Figura 8, que é a mesma utilizada para a análise de vasos de pressão na norma ASME Seção VIII divisão II, sendo capaz de calcular esforços do estado plano de tensão, e esforços devido ao comportamento de placas, sendo essas, as tensões axiais e também as tensões de flexão.

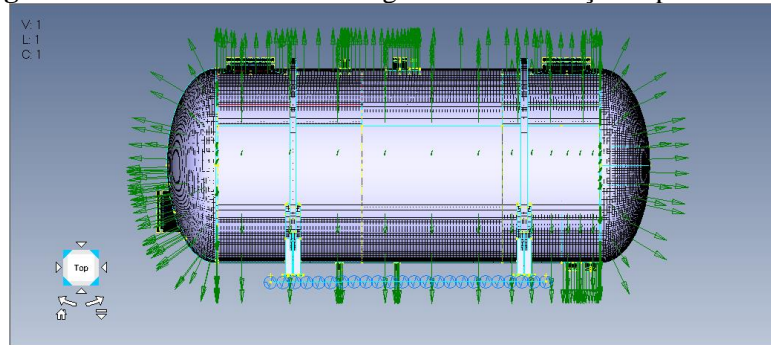
Figura 8: Malha do vaso de pressão por meio do FEMAP



Fonte: Própria.

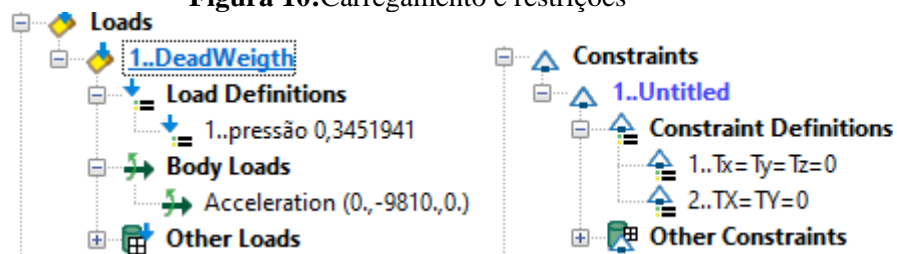
Posteriormente, foi feita a junção das diferentes malhas usando a função Glue do FEMAP. Então, foi aplicado as restrições de deslocamento nos pontos de ancoragem e na base do vaso, e os carregamentos, em Mpa, necessários como mostrado na Figura 9 e na figura 10.

Figura 9: Vaso com todos os carregamentos e restrições aplicadas.



Fonte: Própria.

Figura 10: Carregamento e restrições



Fonte: Própria.

Na análise, por esse tipo de elemento respeitar a teoria de placas finas, as tensões na direção da espessura podem ser desprezadas, podendo obter-se as tensões de membrana e flexão utilizando a definição “menbrane” ou “Top/Bot”, e ainda obter uma malha com menor número de elementos se comparada com a malha sólida. A norma utilizada para a análise dos vasos foi método dos elementos finitos, conforme a ASME Seção VIII Divisão 2, de modo, que as tensões de Von Mises devem ser separadas em categorias denominadas de primária, secundária e pico, sendo definido um limite de tensão para cada uma delas de acordo com a norma já mencionada. (ENSUS, 2018).

5.3 resultados a partir da divisão 2

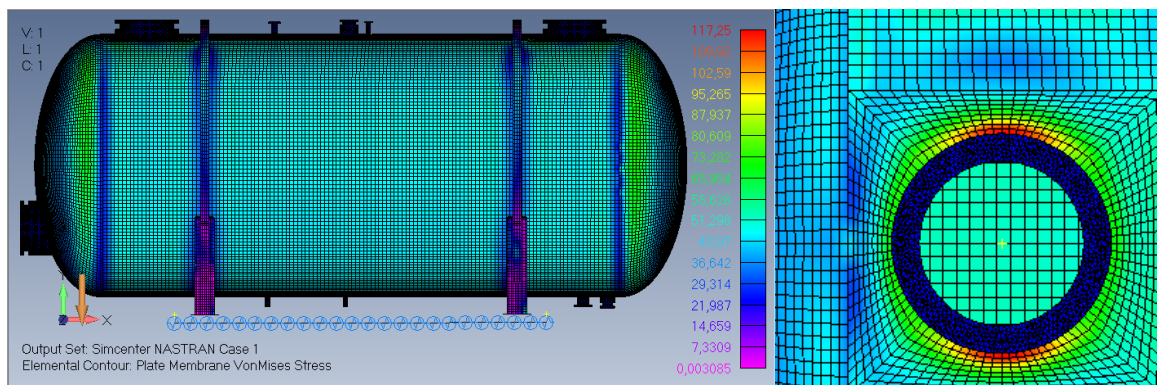
5.3.1 Colapso Plástico

Nesse trabalho, por se tratar de um vaso de geometria e carregamentos simples, será realizado a verificação da integridade do equipamento apenas para colapso plástico, uma vez que o vaso se enquadra, também, na divisão 1.

5.3.1.1 Analise tensão de geral de membrana

Na figura 11, é possível visualizar as tensões em uma escala de cores que vão das maiores tensões (vermelhas) para as menores (em escalas de azul), a partir daí, comparando a tensão admissível do material mostrados na tabela 1, que é 147Mpa, percebe-se que os valores para as tensões de membrana generalizada são bem inferiores que o permitido, e ainda que os maiores valores encontra-se em discontinuidades, e por isso, não são classificados como tensões geral de membrana (ASME BPVC DIVISÃO 2, 2007).

Figura 11:Tensão de membrana



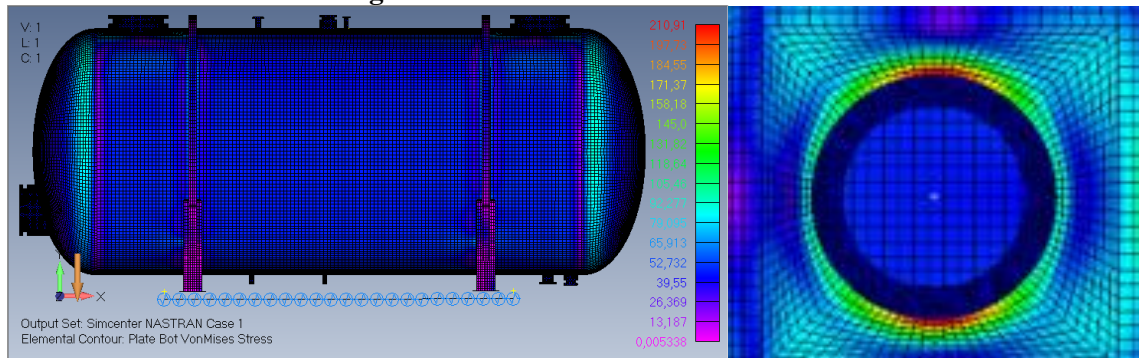
Fonte: Própria.

5.3.1.2 Análise tensão de membrana local

Para a análise de tensão local de membrana, ainda usando a figura 11, obtemos como maior valor a tensão 117,25Mpa, e por norma, o limite admissível é de $1,5 \times$ tensão admissível do material que é de 220,5 Mpa, e mais uma vez a tensão de membrana local encontra-se bem a baixo do que o permitido.

5.3.1.3 Análise tensão de Membrana + Flexão

Para a análise de tensão de membrana + flexão, as tensões analisadas serão top/bot von mises Stress como mostrado na figura 12, que por usar elemento de casca serão iguais, esse tipo de tensão como visto em norma é limitado em $1,5 \times$ tensão admissível do material que resulta em 220,5 Mpa. Como visto, essa tensão localiza-se longe de discontinuidades e concentrações de tensão, e decorrem normalmente de forças mecânicas, por isso os picos de tensão não correspondem a elas, e os valores estão bem a baixo que o permitido.

Figura 12:Tensão Membrana + Flexão

Fonte: Própria.

5.3.1.4 Análise de tensão secundária

Para a análise de tensão secundária a ASME Secção VIII divisão 2, determina um limite de $3 \times$ tensão admissível do material, resultando em 441Mpa, bem a baixo dos valores observados por meio da figura 12 de 210Mpa.

Tabela 6:Resultado da análise de colapso plástico

Colapso Plástico	Tensão admissível da matéria	Tensão admissível pela Divisão 2	Resultado
Análise tensão de geral de membrana	147Mpa	147Mpa	Aprovado
Análise tensão de membrana local	147Mpa	$1,5 \times 147 = 220,5\text{Mpa}$	Aprovado
Análise tensão de membrana + flexão	147Mpa	$1,5 \times 147 = 220,5\text{Mpa}$	Aprovado
Análise de tensão secundária	147Mpa	$3 \times 147 = 441\text{Mpa}$	Aprovado

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o resultado do presente trabalho de graduação em engenharia mecânica, fica notório que o projeto do vaso de pressão analisado, segue e aplica todas as condições de espessuras e tensões exigidos pela norma ASME secção VIII Divisão 1.

Em segunda análise, que tem como base a ASME secção VIII Divisão 2, mostra por meios de seus valores de tensões, que a divisão 1 conta com altos valores de fator de segurança, aumentando o peso do equipamento e a demanda de material. Deve-se saber que os materiais usados em cada fabricação possuem suas diferenças, pois ao passo que a divisão 2 aumenta suas tensões admissíveis, aumenta também os critérios de fabricação de cada material que será utilizado no equipamento. Sendo assim, o custo de produção de um vaso dimensionado com a divisão 1 e outro dimensionado pela divisão 2, devem ser cotados e comparados para se ter certeza da redução de custo, uma vez que as duas normas de projeto não interagem entre si. Entretanto os benefícios da divisão 2 vão além da redução de custo, permitindo uma redução de peso, e permitindo um detalhamento das tensões e deformações antes mesmo da produção do equipamento, o que evidencia concentradores de tensões e evita possíveis falhas de projeto.

REFERÊNCIAS

ASME - ASME BPVC 2010 - Section II, Part A_ Materials - Ferrous Material

ASME, 2010, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. II, Part D Properties (Metric) Materials, ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials, Nova Iorque.

ASME, 2010, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 1, American Society of Mechanical Engineers, Nova Iorque.

ASME, 2010, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 2, American Society of Mechanical Engineers, Nova Iorque.

ASME, 2010, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 3, Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels, Nova Iorque.

ENSUS. Disponível online: <https://ensus.com.br/elementos-finitos-vaso-de-pressao/> (09/06/2022)

TELLES, P. S., 1996, Vasos de Pressão, Rio de Janeiro, 2ª Edição, Editora LTC.

TINOCO, E.; PATRÍCIO, N.; FREIRE, P. S. Curso básico de análise de tensões em vasos de pressão e tubulações. 16 dez. 2015. 88.

MENDONÇA, D. P. Análise de tensões através do método dos elementos finitos de um vaso de pressão projetado conforme código ASME. Mestrado, Universidade estadual paulista, Guaratinguetá, 2011. 137.

SILVA, Adson Bezerra da. Projeto de vaso de pressão segundo norma ASME e análise pelo método dos elementos finitos. Mestrado, UFPE, 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.