

O uso de simulação de FEM/FEA no projeto de vasos de pressão em atendimento a ASME BPVC seção VIII-Divisão 1 e 2

Jadson Jácome da Silva ^[1], Alex Sandro de Araújo Silva ^[2]

^[1]Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; Jadson Jácome da Silva; jacome.jadson@gmail.com

^[2]Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia Mecânica; Alex Sandro de Araújo Silva; alex.Araujo@ufersa.edu.br

Data da defesa: 15/06/22;

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 a suas aplicações que podem abranger grandes pressões de trabalho e diferentes fluidos. No seguinte trabalho, um vaso existente foi analisado pela norma ASME Seção VIII. Para verificar se o dimensionamento ocorreu de forma correta, foi utilizado a divisão 1, e em seguida, foi aplicado a divisão 2 dessa mesma norma, que se trata de 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 de um vaso empregado na indústria do petróleo. 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, onde foi exportado para o Femap e realizado 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 abaixo do que o permitido pela divisão 2 o que indica uma grande possibilidade de diminuição da espessura, sem causar riscos a sua estrutura.

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

1. INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são recipientes estanques capazes de conter um fluido pressurizado, podem ser fabricados com diversas formas e dimensões, desenvolvem diversos papéis fundamentais na indústria, como 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 indústrias. Dentre estas, encontram-se as refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas, terminais de armazenamento e distribuições de petróleo, indústria alimentícia, farmacêutica dentre outras [1].

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 [2].

O código ASME Seção VIII, divisão 2, tem seu dimensionamento utilizando métodos numéricos, que, com os recentes avanços da tecnologia é algo bem mais acessível às indústrias. Com o uso de análises numéricas

para o projeto, e uma melhor análise nos materiais empregados. A divisão 2, possibilita utilizar maiores valores de tensão admissível para os materiais empregados, consequentemente menores valores de fator de segurança. Reduzindo assim, o custo e o peso dos equipamentos mantendo ou até aumentando a segurança.

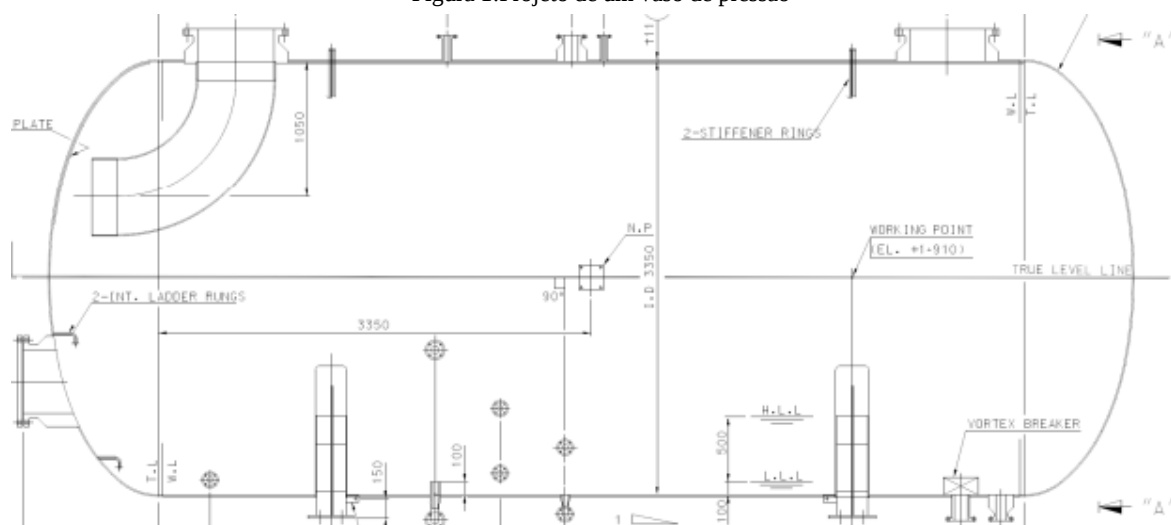
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 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. E em paralelo, 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 este o mais utilizado no Brasil e nos EUA. A Divisão 1 baseado em equações mais conservadoras, fazendo o uso de elevados fatores de segurança, e a divisão 2, onde será dado mais relevância, baseada nas análises das tensões dos vasos, o que requerer profissionais mais capacitados e experientes, pois a um menor conservadorismo no dimensionamento dos equipamentos. Entretanto, esse método vem ganhando cada vez mais destaque com a evolução da tecnologia e a chegada de novos softwares ao mercado [3].

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

Figura 1:Projeto de um vaso de pressão



Enquanto a Figura 1 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 Guamaré.

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

	Tensões	Temperaturas
DESIGN	3.52 kgf/cm^2	150/-45°C
OPERAÇÃO	Max:0.5kgf/cm^2	120/-40°C
	Mim:0.0 kgf/cm^2	120/-40°C

MAWP NEW AND COLD	5,53 kgf/cm ²
MAWP HOT AND CORRODED	3.92 kgf/cm ²
HYDRO. TEST PRESSURE	8.3 kgf/cm ²
PNEU. TEST PRESSURE	6.69 kgf/cm ²
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
Coeficiente de expansão térmica	$11,5 \times 10^{-6}$ (mm/mm/°C)
Coeficiente 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 a espessura e as pressões de projeto estão de acordo com a norma ASME. E posteriormente, para a divisão 2, a partir do projeto, a estrutura foi modelada por meio do software CAD Solid Edge™, consultando todas as tabelas necessárias, para então dar início a criação de um modelo de elementos finitos. A etapa de pré-processamento foi realizada no software FEMAP™. O pré-processamento consiste na preparação da geometria, criação da malha de elementos finitos usando elementos do tipo QUAD4

da biblioteca de elementos do solver NASTRANTM no software FEMAPTM, definição das condições de contornos, e pôr fim a análise.

2.3 Classificação das tensões

2.3.1 Tensões primárias

Produzidas pelas cargas mecânica aplicadas na estrutura, sendo sua principal característica não ser auto limitada ou seja, caso os valores das tensões primárias atinjam a tensão de escoamento do material, a falha irá ocorrer ou no mínimo deformações plásticas na estrutura do equipamento [3,6].

As tensões primárias normais são sub classificadas em:

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

$$P_m \leq K * S \quad (5)$$

$$P_L \leq K * 1,5 * S \quad (6)$$

$$P_b + P_L \leq 1,5 * S \quad (7)$$

2.3.2 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 [3,6].

$$P_b + P_L + Q = 3 * S = S_{ps} \quad (8)$$

2.3.3 Tensão de pico (F)

Trata-se de uma tensão extremamente localizada, entretanto não causa distorções notáveis na estrutura, entretanto pode causar trincas de fadiga, de corrosão sob tensão (CST) ou fratura frágil [3,6].

$$P_L + P_b + Q + F = S_a \quad (9)$$

2.4 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:[6]

- **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. RESULTADOS

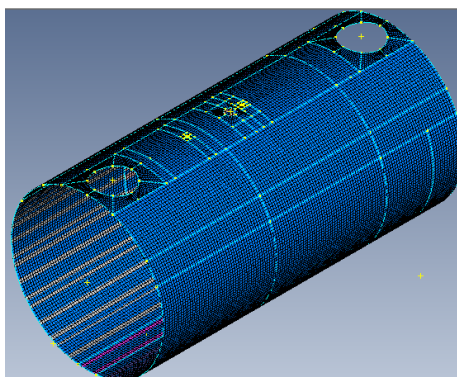
3.1 Dimensionamento a partir da Divisão 1

A Divisão 1 da norma ASME Seção VIII é chamada de *Design by Rules* baseado 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 [4].

3.1.1. 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 2: Casco cilíndrico com 13 mm de espessura



3.1.1.1. 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, encontradas no parágrafo UG – 27 da norma ASME divisão 1 devem ser aplicadas [5].

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

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

3.1.1.2 Tensão Longitudinal (Juntas Circunferenciais) - UG-27

Quando a espessura não ultrapassar a metade do interior raio do vaso, ou P não excede 1,25SE, as seguintes fórmulas podem aplicar. [5]

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

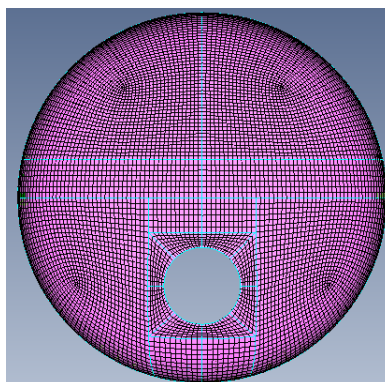
A tensão circunferencial é o dobro da tensão longitudinal, por isso a espessura de chapa para suporta a circunferencial é o dobro da longitudinal.

3.1.2. Espessura do tampo Elipsoidal - UG-32

Tampos elipsoidais com $ts/L \geq 0,002$, será determinado pela Equação 3, e representado pela Figura 3.

$$t_c = \frac{PD}{2SE - 0.2P} = \frac{0,542 * 3350}{2 * 118 * 1 - 0.2 * 0,542} = 7,69mm \quad (3)$$

Figura 3:Tampo elipsoidal com 13 mm de espessura.



A espessura requerida será a maior dentre todas as seções, como pode ser visto na Tabela 4, e por se tratar de um vaso com condições meio corrosivo, será adicionado 3 mm 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	$7,71 \cong 8$

3.1.3. Cálculo da Pressão de teste hidrostático

Como trata-se de um vaso fabricado antes da revisão de 2007, usa-se 1.5*PMTA (Pressão máxima de trabalho permitido), 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.[4]

$$PTH = 1,5 * PMTA = 1,5 * 0,542 = 0,813MPa$$

(4)

ou

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

Tabela 5: Analise de projeto pela divisão 1

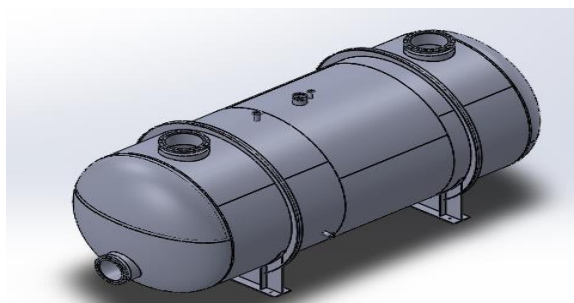
	Projeto	Calculado pela norma	Resultado
Tensão admissível	118MPa	118Mpa	ok
Espessura necessária	11 mm	8mm + 3mm = 11mm	ok
Pressão de teste hidrostático	8,3 Kgf/cm ²	8,29 Kgf/cm ²	ok

3.2 Dimensionamento a partir da Divisão 2

3.2.1 Modelagem e criação da malha

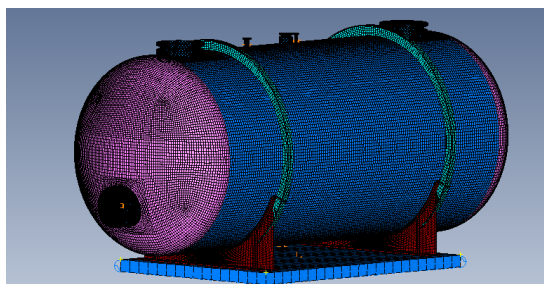
Primeiramente a geometria foi modelada no Solid Edge™, como mostra a Figura 4, usando como base projeto do vaso de pressão e seguindo o código ASME, em seguida as partes modeladas foram exportado no formato Parasolid para o FEMAP™, para dar início a etapa de pré-processamento.

Figura 4: Vaso modelado em 3D por meio do Solid Edge



Na malha foi utilizado o elemento solido tetraedrico linear para os flanges, e o elemento de placa para as demais partes. Pois sua formulação ser baseada na teoria de placa e casca, como mostrado na Figura 5, que é a mesma utilizada para a analise de vasos de pressão na norma ASME Secção 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 5: Malha do vaso de pressão por meio do FEMAP



Posteriormente é feita a junção das diferentes malhas usando a função Glue. Então é aplicado as restrições de desloamento nos pontos de ancoragem na base do vaso, e os carregamentos, em Mpa, necessários como mostrado na Figura 6-7.

Figura 6: Vaso com todos os carregamentos e restrições aplicadas.

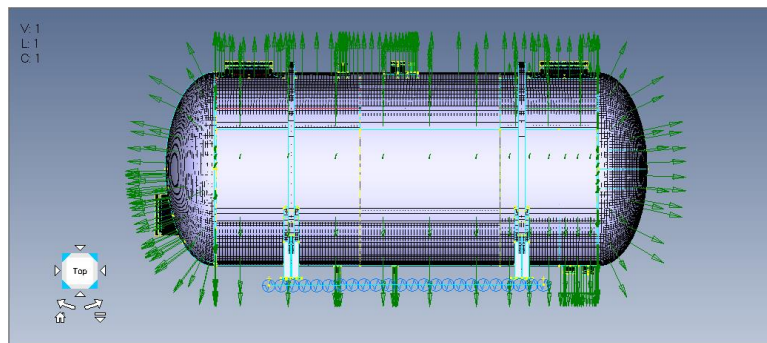
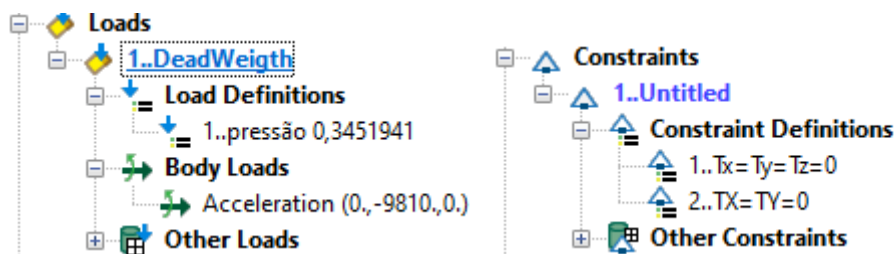


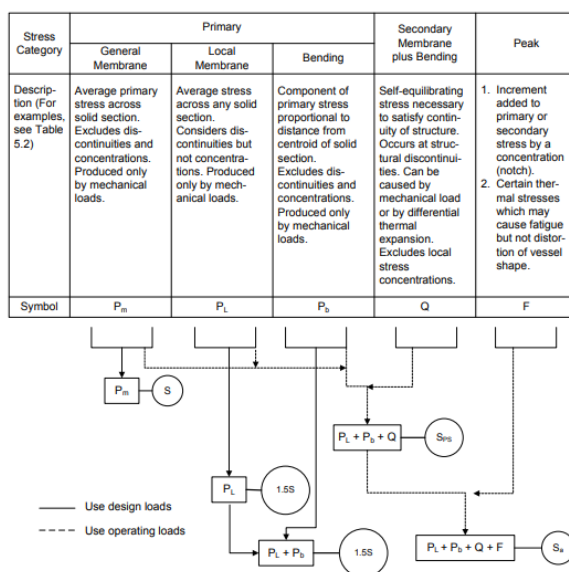
Figura 7: Carregamento e restrições



Para a análise, por esse tipo de elemento respeitar a teoria de placas finas as tensões na direção da espessura podem ser desprezadas, podendo ainda obter as tensões de membrana e flexão utilizando a definição “membrane” ou “Top/Bot”, e ainda obter uma malha com menor número de elementos se comparada com a malha sólida, modelo possui 179882 elementos, e 89137 nos. A norma utilizada para a análise de vasos pelo método dos elementos finitos é a ASME Seção VIII Divisão 2, onde 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 citada. [9]

O código ASME Seção 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 [3,9].

Figura 8: Stress Categories and Limits of Equivalent Stress



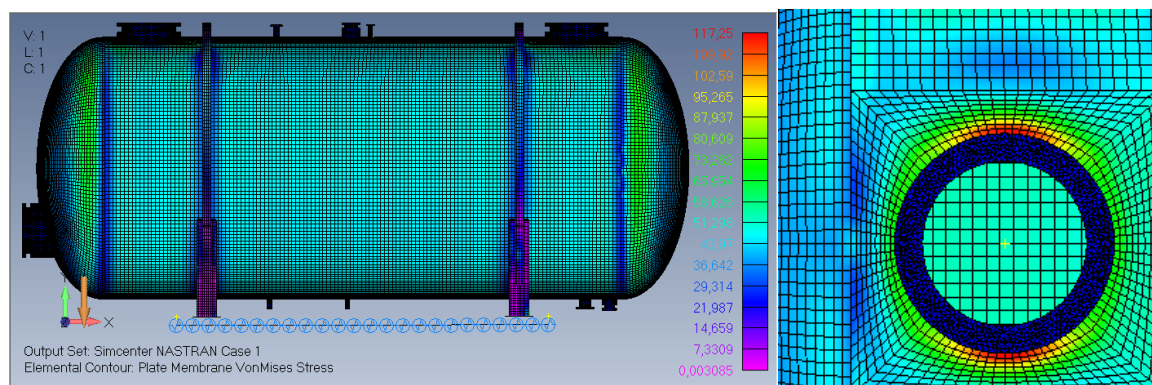
3.4.1 Análise para colapso Plástico

Nesse trabalho por se tratar de um vaso de geometria e carregamentos simples, será realizado a verificação a partir da análise obtida juntamente com os critérios da norma, apresentados na Figura 8, apenas para colapso plástico.

3.4.1.1 Análise da tensão de geral de membrana

Na Figura 9 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, mostrado na tabela 1, que é 147 MPa, 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, o que ainda sim, não são classificados como tensões geral de membrana [3,9].

Figura 9: Tensão de membrana



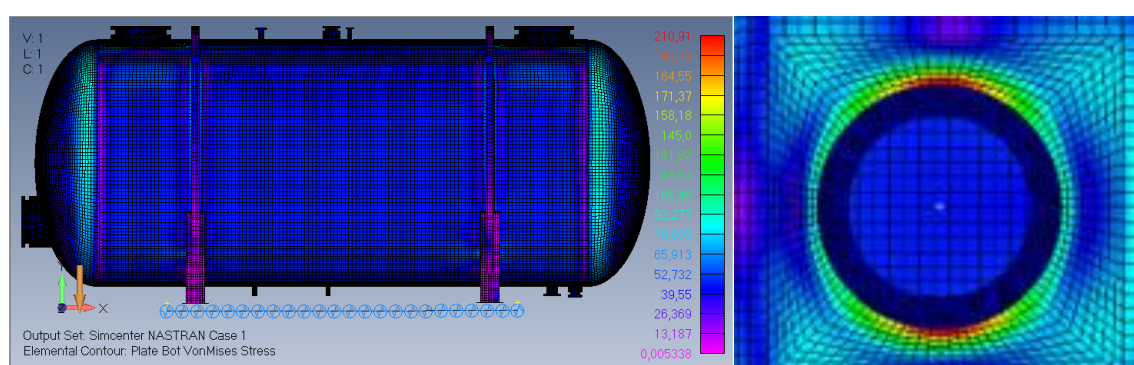
3.4.1.2 Análise tensão de membrana local

Para a análise de tensão local de membrana, ainda usando a figura 9, obtemos como maior valor a tensão 117,25Mpa, e por normar, 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.

3.4.1.3 Analise tensão de membrana+flexão

Para a análise de tensão de membrana + flexão, as tensões analisadas seram Top/bot von mises Stress como mostrado na figura 10, 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 descontinuidades 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 [3,9]..

Figura 10:Tensão Membrana + Flexão



3.4.1.4 Analise de tensão secundaria

Para a análise de tensão secundaria 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.

Tabela 6:Resultado da análise de colapso plástico

Colapso Plástico	Tensão admissível do materia	Tensão admissível pela Divisão 2	Resultado
Analise tensão de geral de membrana	147Mpa	147Mpa	Aprovado
Analise tensão de membrana local	147Mpa	$1,5 \times 147 = 220,5\text{Mpa}$	Aprovado
Analise tensão de membrana+flexão	147Mpa	$1,5 \times 147 = 220,5\text{Mpa}$	Aprovado
Analise de tensão secundaria	147Mpa	$3 \times 147 = 441\text{Mpa}$	Aprovado

4. CONCLUSÃO

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 meio 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.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Programa de Recursos da ANP (Agência nacional do petróleo), gestão FINEP. Juntamente com PRH – 55.1- Estratégias Sustentáveis da indústria do petróleo, Gás natural e biocombustíveis, pelo auxílio e por todo o suporte proporcionado durante a pesquisa.

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

6. REFERÊNCIAS

- [1] TELLES, P. C. D. S. *Vasos de Pressão*. Rio de Janeiro, 3rd ed, Livros técnicos LTC, 1996.
- [2] 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.
- [3] TINOCO, E.; PATRÍCIO, N.; FREIRE, P. S. Curso básico de análise de tensões em vasos de pressão e tubulações. 16 dez. 2015. 88.
- [4] SILVA, Adson Beserra 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.
- [5] ASME. 2010. American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Pressure Vessels. New York: ASME.
- [6] ASME. 2010. American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Pressure Vessels. New York: ASME.
- [7] ASME. 2010. American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, Pressure Vessels. New York: ASME.
- [8] ASME - ASME BPVC 2010 - Section II, Part A_ Materials - Ferrous Material
- [9] ENSUS. Disponível online: <https://ensus.com.br/elementos-finitos-vaso-de-pressao/> (09/06/2022)