

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DE TENSÕES EM VASOS DE PRESSÃO DE PAREDES FINAS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Alexandre Faustino Vieira, alexandre Vieira.engmec@gmail.com¹

John Cleber da Fonseca Teles, john-teles@hotmail.com¹

Washington Batista Lima, w_blima@yahoo.com.br¹

¹Universidade Santa Úrsula (USU), Rua Fernando Ferrari, 75 – Botafogo CEP: 22231-040 – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro,

Resumo: Vasos de pressão são recipientes projetados para resistir a diferenças entre a pressão interna e externa. O projeto desses vasos consiste em dimensioná-los para resistir à pressão atuante e a esforços externos. Além disso, o projeto deve prever quais são os materiais e processos de fabricação adequados. Neste trabalho são comparadas as tensões atuantes no costado, nos tampos e bocais de um vaso de pressão cilíndrico, obtidas através da norma ASME e pelo método de Elementos Finitos (MEF). A ferramenta computacional ANSYS Workbench foi utilizada como plataforma para o desenvolvimento de modelos tridimensionais com elementos 3D do tipo sólidos e do tipo casca (shell). Comparações entre os resultados de tensões calculados por meio da norma ASME e os obtidos em MEF mostraram diferenças nos níveis das tensões encontradas. Os parâmetros de entrada foram: tipo de material, pressão interna, temperatura e diâmetro do vaso. Os resultados obtidos nas análises com elementos dos tipos sólido e casca mostraram que, para vasos de paredes finas, a diferença entre o valor encontrado na análise de MEF e o valor obtido pelos cálculos analíticos (ASME) é cerca de 19% para o casco cilíndrico e 12% para os tampos, sendo que a norma ASME apresenta valores mais conservadores.

Palavras-chave: Vasos de pressão, análise de tensões, MEF

1. INTRODUÇÃO

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

Todos estes equipamentos constituem a parte mais importante e os itens de maior custo em numerosas indústrias, tais como refinarias e outras instalações petrolíferas, indústrias químicas e petroquímicas em geral, indústrias farmacêuticas e alimentares, etc.

Foi necessário a regulamentação de projetos e construção de Vasos de Pressão, por meio de normas e códigos, devido a frequentes explosões de caldeiras que ocorreram nos primórdios do século XIX, época em que se iniciava, com a Revolução Industrial, o uso intensivo de máquinas a vapor. Cada código adota critérios e metodologias próprias, sendo que no Brasil os mais adotados são os americanos ASME Seção VIII, Divisão 1 e a norma regulamentadora NR-13 que definem as exigências de projeto, construção e instalação.

Esse trabalho, por meio de um estudo de caso de um vaso de armazenagem de condensado, visa comparar os resultados obtidos dos cálculos de tensões atuantes nas paredes do vaso de pressão pelo método analítico fundamentado na norma ASME Seção VIII, Divisão 1, com os resultados obtidos por meio do Método de Elementos Finitos com o auxílio do software ANSYS.

2. VASOS DE PRESSÃO

2.1. Definição e Classificação

O nome vaso de pressão (pressure vessel) designa, genericamente, todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado. Dentro de uma definição tão abrangente, inclui-se uma enorme variedade de equipamentos, como uma panela de pressão de cozinha, e até os mais sofisticados reatores nucleares. (Silva Telles, 2013)

Esse trabalho trata especificamente dos Vasos de Pressão não sujeitos a chama, que podem ser considerados como equipamentos de processo voltado para armazenagem.

2.2. Formatos e partes principais

Em todos os vasos de pressão existe um invólucro estanque, externo e contínuo, que é denominado "parede de pressão" do vaso, ou seja, o elemento do vaso que contém o fluido pressurizado. A parede de pressão pode ser simples ou múltipla, bem como pode assumir vários formatos, dependendo principalmente das dimensões e da finalidade do equipamento. As dimensões que caracterizam um vaso de pressão são o diâmetro interno (DI) e o comprimento entre tangentes (CET). O diâmetro interno é medido pela face interna da parede. O comprimento entre tangentes, que se aplica apenas aos vasos com corpos cilíndricos ou cilíndricos compostos, é o comprimento total do corpo cilíndrico, ou a soma dos comprimentos dos corpos cilíndricos e cônicos sucessivos. As "linhas de tangência", que limitam o comprimento entre tangentes, são as linhas traçadas, próximo a ambos os extremos do vaso, na tangência entre os corpos cilíndricos e os tampos de fechamento. A Figura 1 mostra alguns exemplos de vasos de diversos formatos e posições de instalação. (Silva Telles, 2013)

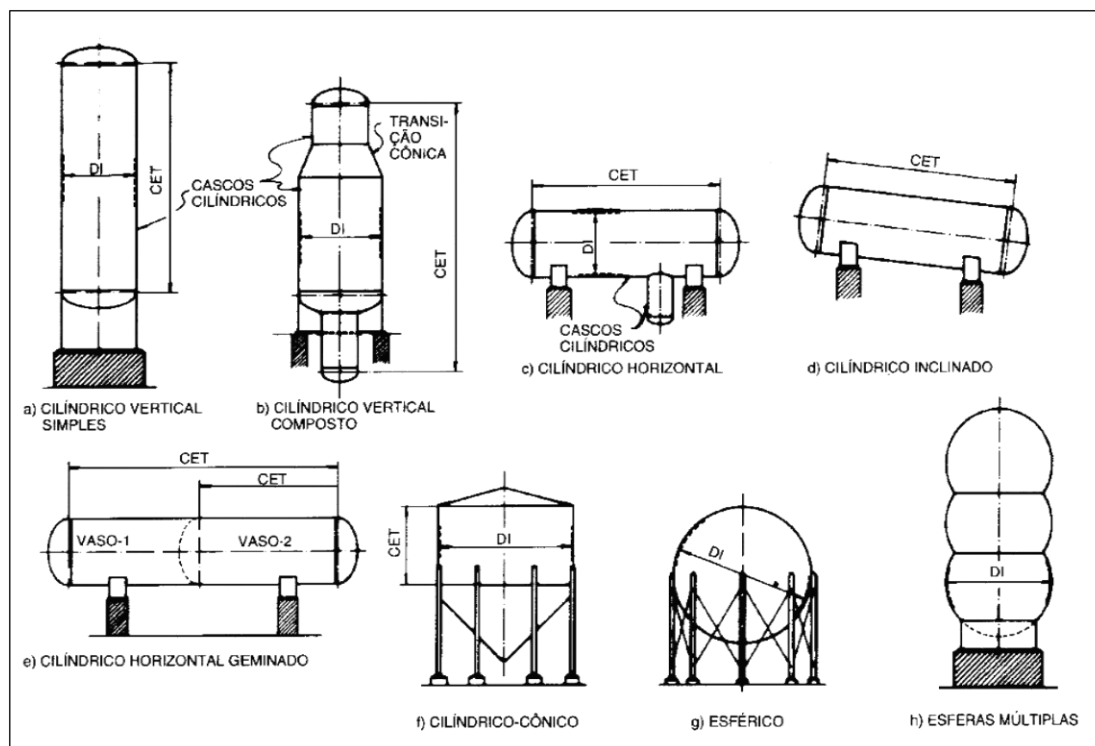


Figura 1. Principais formatos e posições de vasos de pressão.

A parede de pressão compõe-se basicamente do casco do vaso e dos tampos de fechamento. Para a maior parte dos vasos o casco é cilíndrico. Essa preferência deve-se ao fato de que o formato cilíndrico é o mais fácil de se fabricar e transportar, presta-se bem a maioria dos serviços, e é o que permite o aproveitamento de chapas inteiras para a fabricação do vaso.

Denominam-se tampos as peças de fechamento dos cascos cilíndricos dos vasos de pressão. Os tampos podem ter vários formatos, dos quais os mais usuais são os seguintes: elíptico, toriesférico, hemisférico, cônico e plano.

Os vasos de pressão também são compostos de aberturas para diversas finalidades, sem as quais os vasos seriam completamente inúteis, como são os casos das ligações com tubulações de entrada e de saída (bocais), ligações para instrumentos, bocas de visita e etc...

Além das partes citadas, os vasos de pressão possuem sempre outras partes, não submetidas a pressão, como é o caso do suporte do vaso, e frequentemente também outras peças, internas e externas, para atender a diversas finalidades. (Silva Telles, 2013)

3. NORMAS PRINCIPAIS

As normas de projeto de vasos de pressão são, textos normativos desenvolvidos por associações técnicas ou por sociedades de normalização públicas ou particulares de diversos países. As normas foram estabelecidas não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo e projeto dos vasos de pressão, mas principalmente garantir condições mínimas de segurança para a operação.

O código ASME e a norma regulamentadora NR-13 são os mais utilizados no Brasil, sendo responsáveis por ditar os requisitos necessários para materiais, projeto, fabricação, montagem e testes da maioria dos vasos de pressão, permutadores e caldeiras utilizadas na indústria do petróleo. (Silva Telles, 2013).

3.1. Código ASME

ASME (American Society of Mechanical Engineers) é uma sociedade de engenheiros que define normas técnicas para equipamentos mecânicos. Uma das principais normas da ASME é o BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code), que fornece regras para o projeto, fabricação e inspeção de caldeiras e vasos de pressão.

A Seção VIII do código trata de Vasos de Pressão e contém as seguintes divisões:

- Divisão 1 - Regras para construção de vasos de pressão;
- Divisão 2 - Regras alternativas para construção de vasos de pressão;
- Divisão 3 - Regras alternativas para a construção de vasos de alta pressão.

3.1.1. Modelo Analítico do Casco Cilíndrico e Pescoços dos Bocais.

Para determinação da espessura do casco cilíndrico do vaso de pressão de paredes finas apresentado no estudo de caso, o código ASME, seção VIII, Divisão 1, utiliza da Eq. (1).

$$t = \frac{PR}{SE-0,6P} + C \quad (1)$$

Onde:

t = espessura mínima para pressão interna.

R = raio interno do cilindro.

P = pressão interna de projeto.

E = coeficiente de eficiência de solda.

S = tensão admissível básica do material, em função da temperatura de projeto do vaso (Tab. 2).

C = margem para corrosão.

Com a determinação da espessura (t), é calculada a tensão a partir da Eq. (2).

$$S = \frac{1}{E} \frac{PR}{t} + 0,6P \quad (2)$$

Todos os cálculos referentes aos cascos cilíndricos aplicam-se também aos pescoços de bocais e outras partes cilíndricas dos vasos submetidos a pressão interna.

3.1.2. Modelo Analítico do Tampo.

Para determinação da espessura do tampo elíptico do vaso de pressão de paredes finas apresentado no estudo de caso, o código ASME, seção VIII, Divisão 1, utiliza da Eq. (3).

$$t = \frac{PR}{SE-0,1P} + C \quad (3)$$

Com a determinação da espessura (t), é calculada a tensão a partir da Eq. (4).

$$S = \frac{1}{E} \frac{PR}{t} + 0,2P \quad (4)$$

3.2. NR-13

A NR-13 é a norma regulamentadora que estabelece regras compulsórias a serem seguidas no projeto, operação, inspeção e manutenção de caldeiras e vasos de pressão instalados em unidades industriais e outros estabelecimentos públicos no Brasil.

A NR-13 inclui a obrigação da determinação do valor da PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível) para todos os vasos em operação no Brasil e do Teste Hidrostático na fase de fabricação. É necessário que todos os vasos de pressão em operação possuam um prontuário com memória de cálculo, código aplicado no projeto, especificação dos materiais, etc.

4. MODELO E MATERIAIS

São realizados os cálculos da espessura e tensões no casco, tampos e pescoços dos bocais do modelo simplificado de um vaso de armazenagem, conforme mostrado na Fig. 2, de acordo com as fórmulas apresentadas no código ASME, seção VIII, Divisão 1.

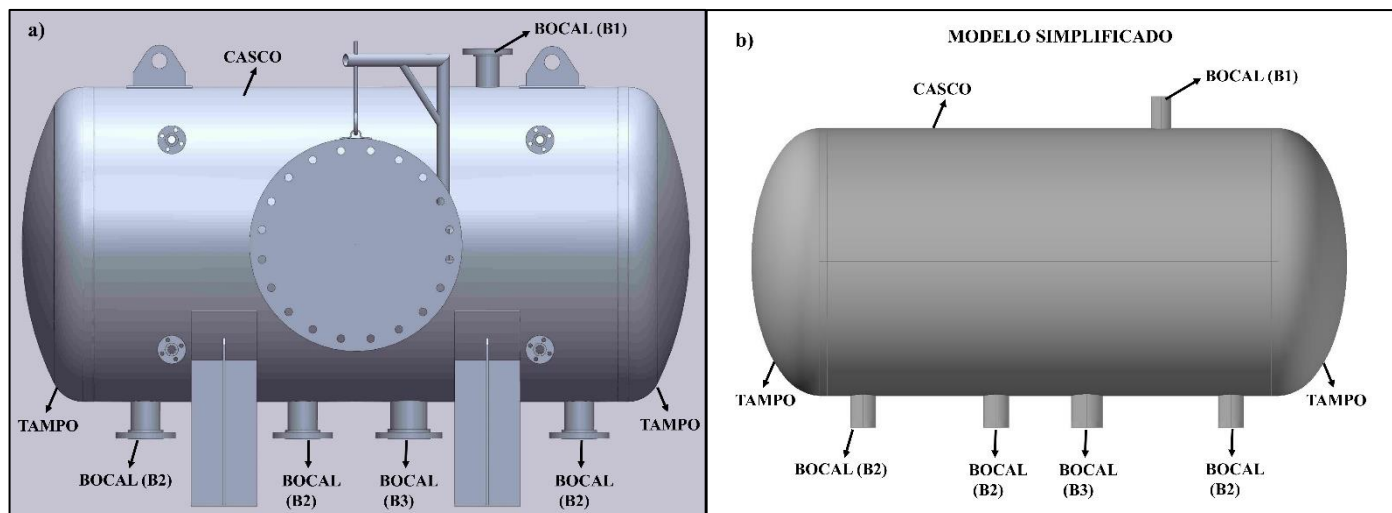


Figura 2. a) Vaso de pressão e b) Modelo simplificado

4.1. Características do Vaso de Pressão e Material

Os dados de projeto referentes ao vaso de pressão, com cilindro horizontal e tampas elípticas, utilizado como modelo, são descritos na Tab. 1. Na Tabela 2 são descritos os dados do material utilizado.

Tabela 1. Dados de projeto do Estudo de caso.

Descrição	Incógnita	Valor
Raio interno	R	595 mm
Pressão interna de projeto	P	0,785 MPa
Temperatura	T	235 °C
Coeficiente de eficiência de solda	E	0,85%
Margem para corrosão	C	3 mm

Tabela 2. Dados do material utilizado.

ASTM A516-70 (Aço-Carbono Si)		
Propriedade	Símbolo	Valor
Tensão admissível básica do material (260°C)	S	138 MPa
Tensão de Escoamento	Sy	260 MPa
Tensão de Ruptura	Su	485 MPa
Módulo de Elasticidade	E	207 Gpa
Coeficiente de Poisson	v	0,30

5. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF (Método de Elementos Finitos) é uma alternativa aos modelos analíticos convencionais que pode ser aplicada para qualquer situação, independente da complexidade, fornecendo resultados com tolerâncias aceitáveis para engenharia. (Segerlind, 1984). O método pode ser aplicado em objetos com formas irregulares e compostos por diferentes materiais com condições de contorno variadas. Pode ser aplicado a problemas estacionários, dependentes do tempo e com propriedades não-lineares de material.

O MEF é a base computacional para diversos softwares de CAE (Computer Aided Engineering) como o ANSYS, que é utilizado para a comparação de resultados do estudo de caso analisado.

Os dados do material adotado (Tab. 2) foram alimentados na base de dados do Ansys. As geometrias do estudo de caso analisado foram redesenhadas no programa de forma tridimensional para otimizar a velocidade da análise.

Além da geometria, outro fator crucial na análise do Ansys é a seleção da malha. A malha é dividida em vários elementos distribuídos na geometria analisada, tendo as ligações de cada elemento chamadas de nós. Os cálculos com MEF são realizados apenas onde existem nós, e a densidade de nós em determinada região de uma peça influencia os resultados obtidos. Desta forma, quanto maior for a densidade de nós em determinada região da peça, maior a proximidade dos resultados obtidos do valor exato. No entanto, quanto mais nós existirem na análise, mais demorado é o processamento no programa.

Foram gerados dois modelos de análise, um com elemento do tipo casca (shell) e outro com elementos sólidos. Os elementos de casca são naturalmente adequados para a modelagem de peças finas (chapas metálicas), onde é indicado a espessura da chapa ao software que, de acordo com a malha escolhida, faz a distribuição dos elementos sobre a superfície do modelo. Os elementos sólidos são mais adequados para modelos volumosos, onde os elementos 3D são distribuídos por toda a espessura da peça modelada.

Para o modelo com elementos de casca, foi adotado uma malha triangular. No modelo com elementos sólidos foi adotada uma malha tetragonal. Para o refino do tamanho dos elementos em ambos os modelos, foi feita uma análise de convergência com relação a um ponto de coordenada na parte central do tampo conforme mostrado na Fig. 3.

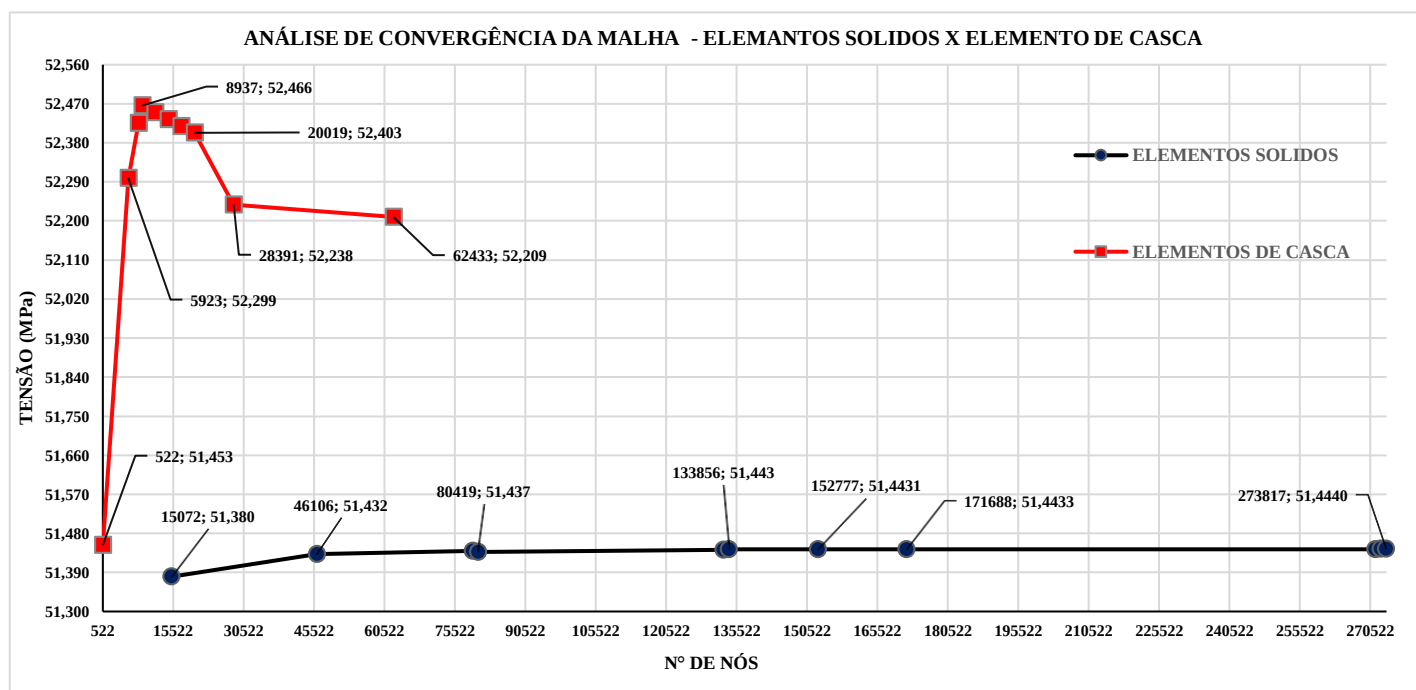


Figura 3. Analise de convergência da região central do tampo.

Na Figura 3, podemos ver que para os elementos sólidos, a partir de 133856 nós, as malhas apresentam uma variação mínima de 0,001MPa para o mesmo ponto. Para os elementos de casca, a partir de 28391 nós, as malhas apresentaram uma variação mínima de 0,029MPa para um mesmo ponto. Desta forma, essas malhas foram adotadas para todas as análises executadas de forma a obter resultados adequados com a otimização do tempo de processamento do Ansys.

Na Figura 4, podemos ver a malha adotada sobre a superfície de alguns itens analisados.

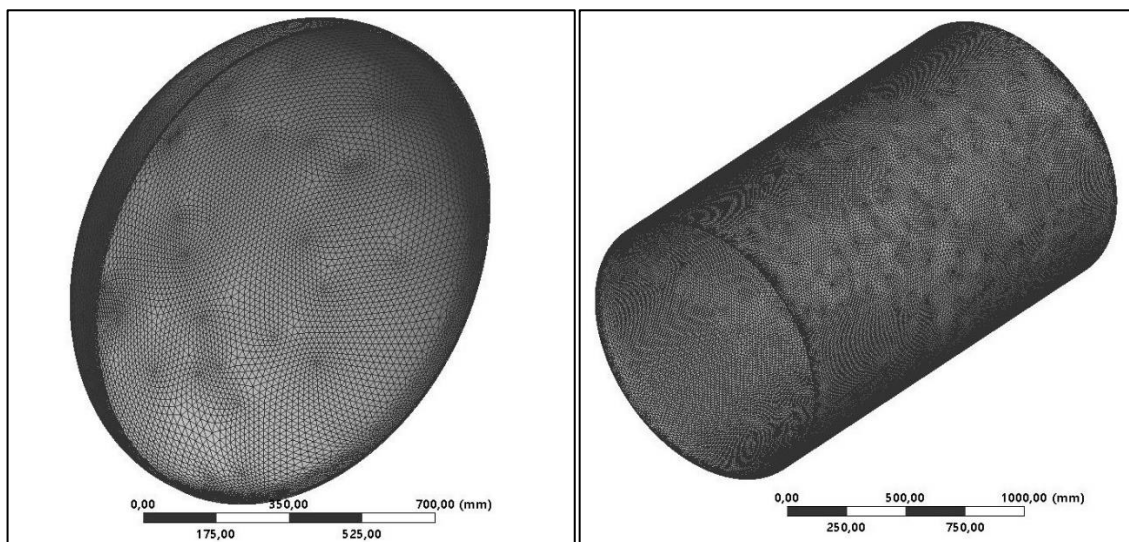


Figura 4. Malha adotada no Tampo (elemento sólido) e Casco (elemento de casca).

5.1. Condições de Contorno.

Foi aplicada a pressão de 0,785 MPa (Tab. 1) na face interna do tampo (Fig. 5), casco e bocais.

A análise do Vaso foi feita em cada componente de forma separada. Desta forma, foi introduzida a condição de contorno de suporte fixo (fixed support) nas extremidades do casco, tampo e bocais. Esse tipo de condição de contorno de suporte fixo é mais rígido que o tipo de ligação de união existente no vaso.

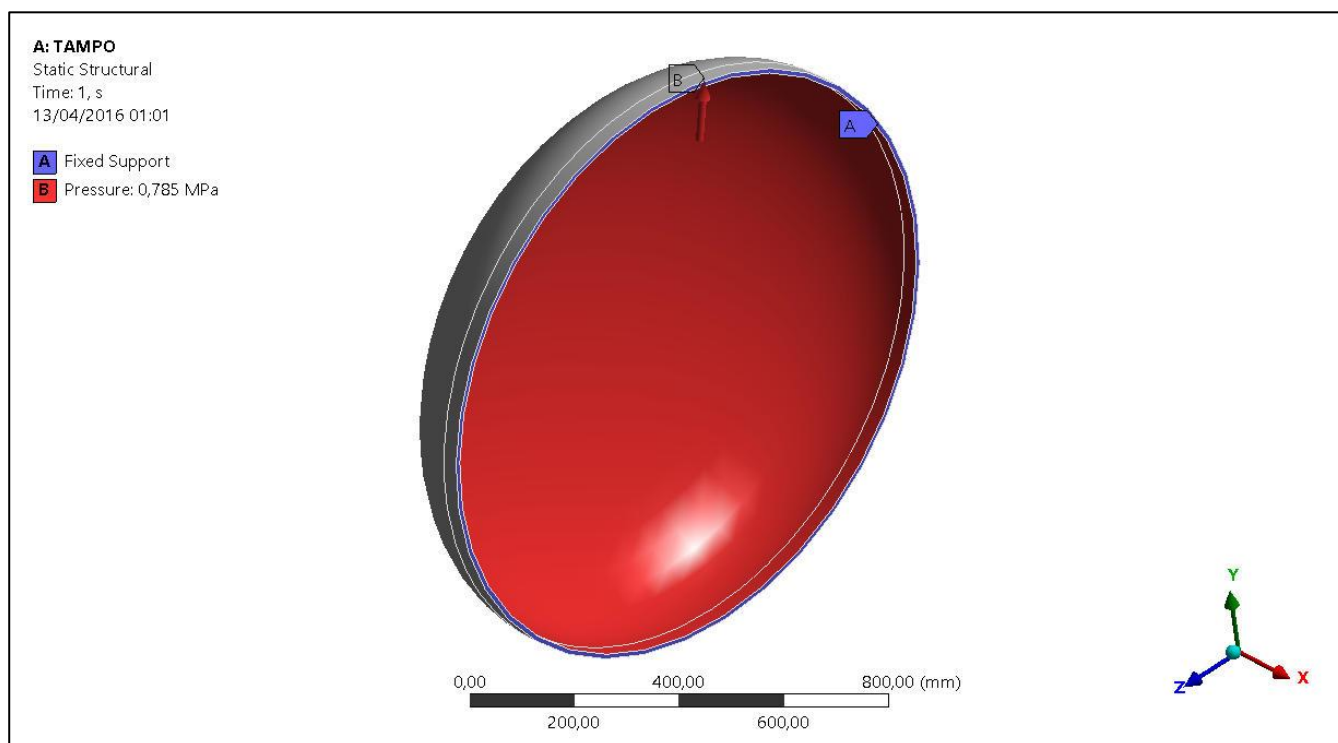


Figura 5. Condição de contorno do tampo elíptico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o Código ASME, seção VIII, Divisão 1, por meio da Eq.(1), foram obtidas as espessuras para o Casco cilíndrico e os pescoços dos bocais do vaso e da Eq.(3), a espessura do Tampo elíptico. A partir das espessuras encontradas, foram determinada as tensões por meio da Eq.(2) para o casco e bocais e, com a Eq.(4) para o tampo, conforme indicado na Tab. 3.

Tabela 3. Tensões obtidas através do Código ASME.

ASME, seção VIII, Divisão 1	
Partes do Vaso	Tensão (MPa)
Casco	69,72
Tampo	57,72
Bocal - B1	7,11
Bocal - B2	8,39
Bocal - B3	9,57

A fim de comparação com os resultados analíticos obtidos por meio da norma ASME, foram analisados os resultados de Tensão Principal Máxima das análises em MEF. Os resultados são demonstrados com os valores máximos e mínimos na Fig. 6, para o casco cilíndrico, Fig. 7 para o tampo elíptico, Fig. 8 para o bocal B1, Fig. 9 para o bocal B2 e Fig. 10 para o bocal B3.

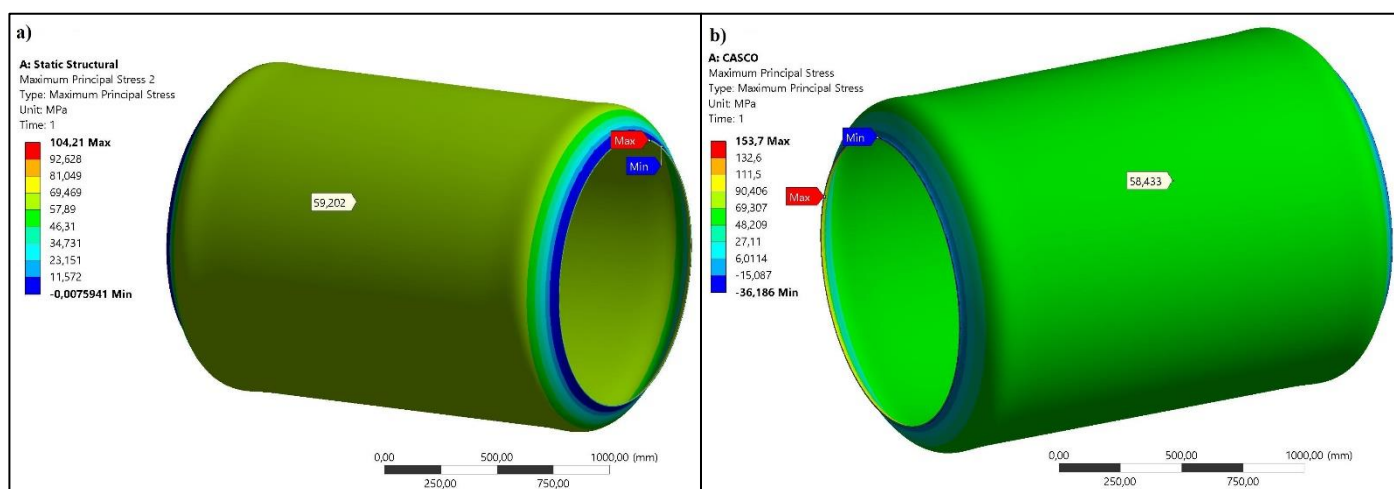


Figura 6. Distribuição de tensões no Casco Cilíndrico. Analise de Casca(a), análise elemento solido(b).

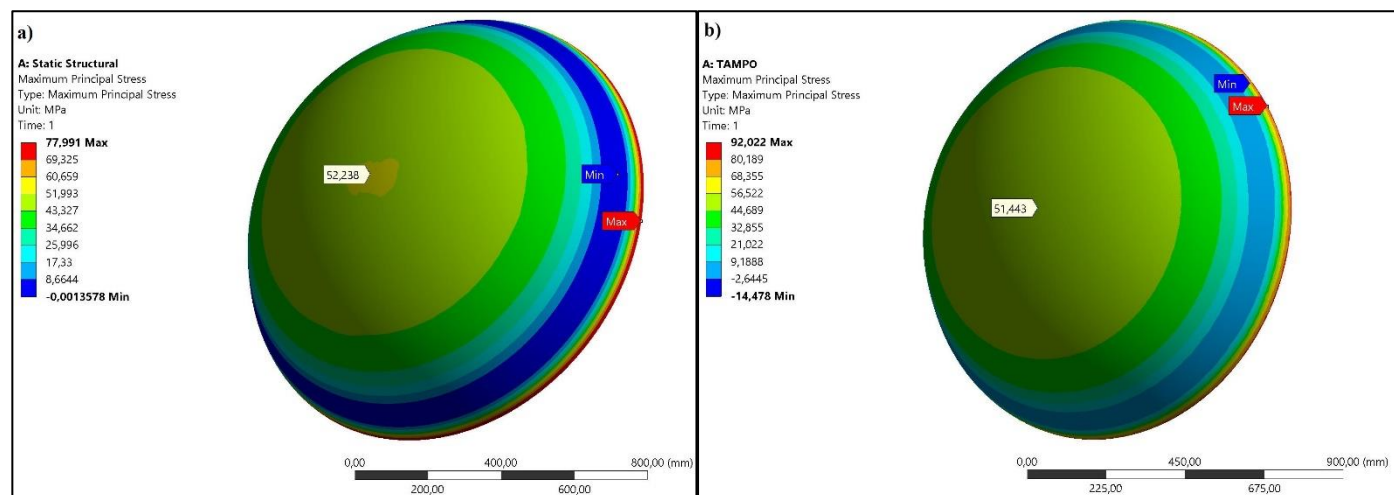


Figura 7. Distribuição de tensões no Tampo Elíptico. Analise de Casca(a), análise elemento solido(b).

Nas Figuras 7 e 8, podemos observar que as tensões máximas estão localizadas exatamente nas superfícies onde foram indicadas as condições de contorno de suporte fixo. Conforme indicado no item 5.1, esse tipo de fixação é mais rígido que a ligação de união existente no vaso, portanto, serão considerados como tensão máxima os maiores valores de tensão nas regiões sem influência da condição de contorno. Desta forma, para o casco cilíndrico na análise com elemento de casca será o valor de 59,202 MPa e, para elementos sólidos, 58,433 MPa. No tampo elíptico o valor de 52,238 MPa para análise com elemento de casca e 51,443 para análise com elemento sólido.

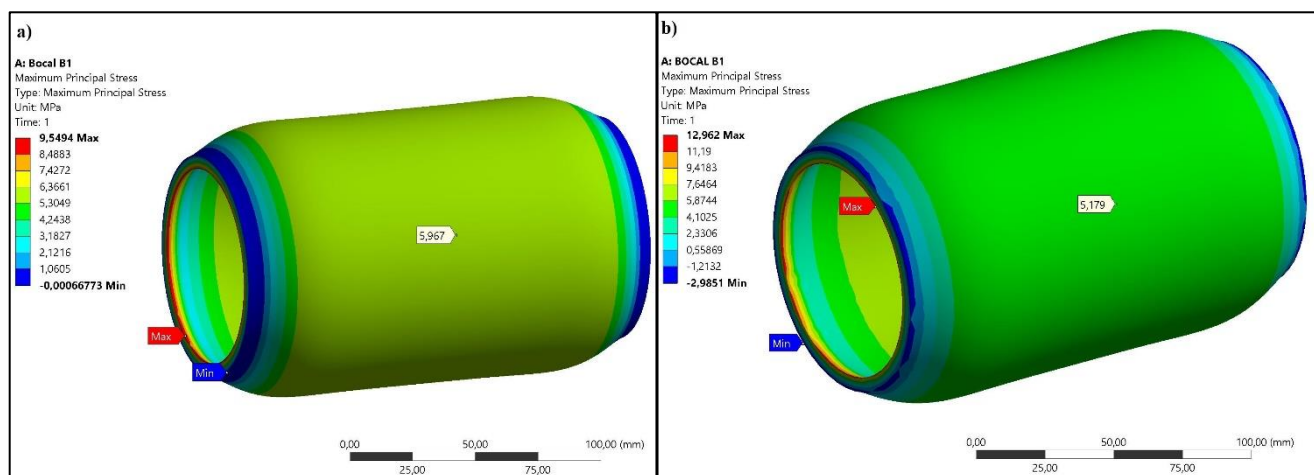


Figura 8. Distribuição de tensões no bocal B1. Análise de Casca(a), análise elemento solido(b).

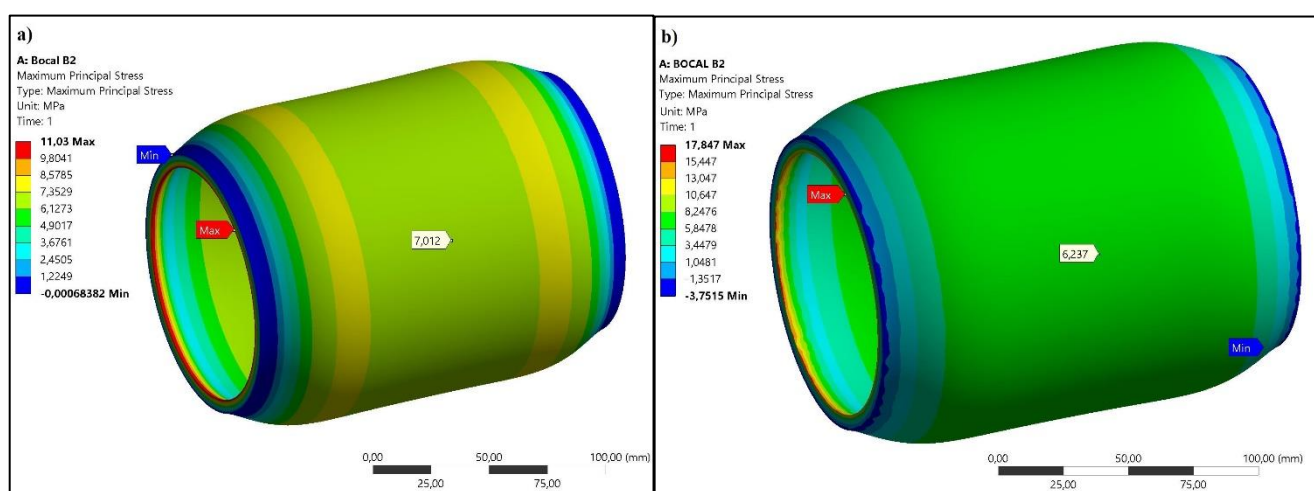


Figura 9. Distribuição de tensões no bocal B2. Análise de Casca(a), análise elemento solido(b).

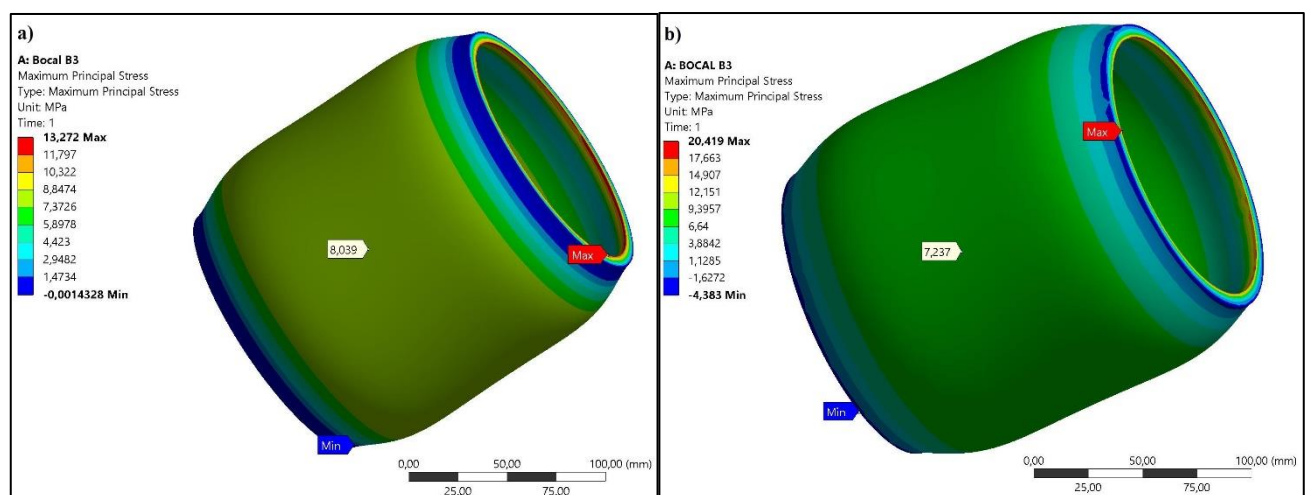


Figura 10. Distribuição de tensões no bocal B3. Análise de Casca(a), análise elemento solido(b).

Conforme indicado anteriormente, a tensão máxima localizada na extremidade dos bocais sofre influência da condição de contorno. Desta forma, será considerado como tensão máxima para análise de elementos de casca e solido para o bocal B1, 5,967 MPa e 5,179 MPa, respectivamente. Da mesma maneira, para o bocal B2, 7,012 MPa e 6,237 MPa e para o bocal B3, 8,039 MPa e 7,237 MPa. Na Tabela 4 são comparados os resultados dos cálculos analíticos por meio da ASME, Seção VIII, Divisão 1 e as análises do MEF feita por meio do software Ansys no modelo.

Tabela 4. Comparação de tensões encontradas nas análises.

ANÁLISE DE RESULTADOS						
Partes do Vaso	ASME (MPa)	MEF-Elemento de Casca(MPa)	MEF-Elemento Sólido (MPa)	MEF(casca) X ASME (%)	MEF(sólido) X ASME (%)	MEF(casca) X MEF(sólido) (%)
Casco	69,72	59,20	58,43	17,77	19,32	1,32
Tampo	57,72	52,24	51,43	10,49	12,22	1,57
Bocal - B1	7,11	5,97	5,18	19,16	37,29	15,22
Bocal - B2	8,39	7,01	6,24	19,65	34,52	12,43
Bocal - B3	9,57	8,04	7,24	19,04	32,24	11,08

Os resultados do MEF encontrados para o modelo podem ser considerados dentro do esperado, visto que os valores de tensão foram menores do que os encontrados nos cálculos analíticos provenientes da ASME, Seção VIII, Divisão 1. A alguns trabalhos (Iecker, 2014 e Silva, 2015) também mostram análises mais conservadoras por parte na ASME na comparação com modelos analisados no Ansys.

A diferença entre a comparação analítica (ASME) e os valores encontrado para os modelos do Casco é de cerca de 19%, logo, uma redução de espessura mínima pode ser considerada para redução dos custos de projeto. Para o Tampo, a diferença de cerca de 12%.

A diferença nas análises dos bocais chega a ser superior a 32% no modelo com elementos sólidos e superior a 19% no modelo com elementos de casca, logo, uma redução de espessura poderia ser considerada. No entanto, o que é mandatório no dimensionamento dos pescoços dos bocais é a espessura da tubulação que estiver conectada ao vaso. (Silva Telles, 2013). Desta forma, os pescoços dos bocais podem obter um superdimensionamento em relação a pressão interna do vaso para se adequar as tubulações conectadas.

Na comparação entre as duas análises de MEF, nota-se uma diferença menor que 2% para as análises do casco e tampo, evidenciando a eficiência do modelo de casca para análises de modelos de chapas finas, visto que esse tipo de modelo tem um processamento mais veloz. A diferença superior a 10% encontradas na comparação dos dois modelos para os bocais evidencia o melhor processamento da análise de elemento sólidos para modelos de maior espessura, tendo em vista a distribuição dos elementos 3D por toda a espessura do modelo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No dimensionamento de vasos de pressão não é comum, com exceção para os vasos de pressão especiais (ASME, Seção VIII, Divisão 3), a análise de MEF. Isso ocorre pelo seu alto grau de investimento em softwares, além da necessidade de treinamento para correta utilização do método. A utilização do MEF não se limita apenas ao conhecimento prático de programas tão avançados como o Ansys, logo, não é recomendada a utilização dos softwares sem os mínimos conhecimentos de engenharia necessários e sem as condições normativas cabíveis ao projeto dimensionado.

Os resultados obtidos no trabalho são satisfatórios, mostrando que para o casco cilíndrico dos vasos de paredes finas o código ASME, Seção VIII, Divisão 1, pode ser considerado conservador. No entanto, corroboram com o dimensionamento dos tampos, não justificando o alto custo de investimento em softwares para esse tipo de análise.

É importante deixar claro que tanto a análise realizada em MEF, quanto as condições normativas aplicadas (ASME, Seção VIII, Divisão 1), não abordam todos os esforços solicitantes de um vaso de pressão, tais como, as ações do vento, impactos, esforços de dilatação, etc. O cálculo para esses esforços fica a cargo do projetista e a consulta das demais normas cabíveis.

8. REFERÊNCIAS

ASME, 2013, “Boiler and Pressure Vessel Code - Section VIII - Division 1: Rules for construction of Pressure Vessels”. New York.

IECKER, Thyago Duarte, 2014, “Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos”, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de educação tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET, Rio de Janeiro.

Silva, Adson Beserra, 2015, “Projeto de vaso de pressão segundo norma ASME e análise pelo método dos elementos finitos”, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife.

Telles, Pedro C. da Silva.,2013, “Vasos de Pressão”. 2.ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro.

Vieira, Alexandre Faustino, 2015, “Vasos de Pressão - Análise de tensões em vasos de pressão de paredes finas”, Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Santa Úrsula — USU, Rio de Janeiro.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

STRESS ANALYSIS OF PRESSURE VESSELS WITH THIN WALLS BY FINITE ELEMENT METHOD

Alexandre Faustino Vieira, alexandre Vieira.engmec@gmail.com¹

John Cleber da Fonseca Teles, john-teles@hotmail.com¹

Washington Batista Lima, w_blima@yahoo.com.br¹

¹Universidade Santa Úrsula (USU), Rua Fernando Ferrari, 75 – Botafogo CEP: 22231-040 – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro,

Abstract. Pressure vessels are recipients design to resist differences between internal and external pressures. The engineering project of these vessels consist of designing them to withstand the pressure acting and other external efforts. Furthermore, the project should predict the appropriate materials and manufacturing processes. In this work will be compared the stresses acting on the wall, heads and nozzles of a cylindrical pressure vessel obtained by ASME standards and the Finite Element Method (FEM). The computational tool ANSYS Workbench was used as a platform for design of three-dimensional models with 3D solid and shell type elements. Comparisons between stresses results estimated by ASME standards and the ones estimated by FEM showed differences in the stresses levels. The input parameters were material type, besides internal pressure, temperature and vessel diameter. The obtained results with solid and shell type elements analysis shown that for thin wall vessels, the difference between the measured value by FEM and the measured value by ASME is about 19% for the cylindrical shell and 12% for heads, whereas ASME standards presents the most conservative values.

Keywords: Pressure vessels, Stress analysis, FEM

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.