

ANÁLISE DAS TENSÕES ATUANTES EM UM TAMPO PARA VASOS DE PRESSÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS¹

Matheus de Almeida²
 Marcellus Tiburcio Fontenelle³
 Daiane Carla Casonatto⁴
 Bruno Turmina Guedes⁵

RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos que armazenam, transportam e processam vários tipos de fluidos, sua norma para parametrização mais utilizada no Brasil hoje é a norma ASME SEC VIII Divisão 1, estabelecendo regras para o dimensionamento dos principais componentes (casco, tampo e etc.). O método de elementos finitos, é um método numérico descrito por equações diferenciais parciais com condições de contorno, aplicável na solução de vários problemas de engenharia. Com isso o objetivo deste trabalho busca estabelecer um comparativo entre esses dois métodos e mostrar se um modelo matemático como o MEF pode ter maior êxito em apresentar valores de tensões com uma aproximação mais acurada em relação ao método analítico da norma. Para o estudo primeiro foram escolhidos dois modelos de tampos falsa-elipse, estabelecendo os parâmetros de cálculo finalmente realizando uma comparação entre as tensões máximas atuantes em cada tampo calculada por cada método. Os resultados mostraram que os valores das tensões máximas atuantes calculadas pelo MEF foram próximos aos valores obtidos pelo método analítico do código ASME.

Palavras-chave: ASME. Método de Elementos Finitos (MEF). Vasos de Pressão.

1 INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são equipamentos projetados para armazenar, transportar e processar diferentes fluidos a diferentes pressões e temperaturas, seja qual for o tipo, tamanho, geometria ou finalidade (TELLES, 2007).

O primeiro código americano, para vasos de pressão foi publicado pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), em 1925, intitulado “Rules For Construction of Pressure Vessels”, Section VIII, 1925 Edition. Mas foi em 1968 após uma revisão da antiga Seção VIII que a divisão 1 veio a surgir, sendo método mais aplicado e difundido no Brasil atualmente. Utilizado como parâmetro para projeto e fabricação de vasos de pressão, tem como característica principal estabelecer regras para o dimensionamento dos principais

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica E-mail: matheus.almec@gmail.com

³ UCEFF Faculdades. Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: marcellus.fontenelle@gmail.com

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: daianecasonatto@uceff.edu.br.

⁵ Docente do curso de Eng. Mecânica. E-mail: brunoguedes@uceff.edu.br.

componentes sendo eles, o casco, tampos, reduções, flanges, bocais e reforços (FALCÃO, 2008).

Contudo, vale destacar também um método bastante utilizado hoje no campo da engenharia que é o método de elementos finitos (MEF) que segundo Filho (2013), é uma ferramenta utilizada para determinar as tensões e deformações de qualquer que seja o sistema mecânico apresentado, independentemente de sua geometria, e que está sujeito a ações externas, tendo como foco principal apresentar respostas satisfatórias, em termos de economia ou na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares do componente em estudo.

Atualmente, no Brasil a norma mais utilizada para vasos de pressão é a norma ASME Seção VIII Divisão 1, que foi desenvolvida principalmente para assegurar melhores condições de segurança e operação possuindo grandes coeficientes de segurança. Deste modo, ao ser aplicada em um cálculo de tensões que ocorrem em um tampo para vaso de pressão, pode apresentar valores que não são condizentes com a realidade. É nessa hora que um método mais robusto como o de elementos finitos é uma boa opção, pois é um método numérico que possui capacidade de avaliar diferentes sistemas mecânicos proporcionando resultados precisos e confiáveis, ou seja, quando utilizados para uma análise, o método de elementos finitos pode apresentar valores de tensões mais próximas de valores reais. Sendo assim, esta análise comparativa busca demonstrar se um modelo matemático robusto como o MEF é capaz de apresentar valores de tensões com uma aproximação mais relevante em relação ao método analítico da norma e mostrar qual dos dois métodos mais se adequa nesse caso.

O objetivo geral deste estudo é analisar as tensões atuantes em um tampo para vasos de pressão através do método de elementos finitos. Os objetivos específicos são, calcular as tensões atuantes em um tampo (seguindo a metodologia do código ASME SEC VII Divisão 1), fazer uma análise do mesmo componente (utilizando o método de elementos finitos através do software ANSYS) e por fim uma comparação dos resultados.

Nesse contexto, o atual trabalho justifica-se pela necessidade de comparar se um modelo matemático como o método de elementos finitos (MEF), consegue apresentar valores de tensões com uma aproximação mais relevante em relação ao método analítico da norma e mostrar qual dos métodos mais se adequa nesse caso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VASOS DE PRESSÃO

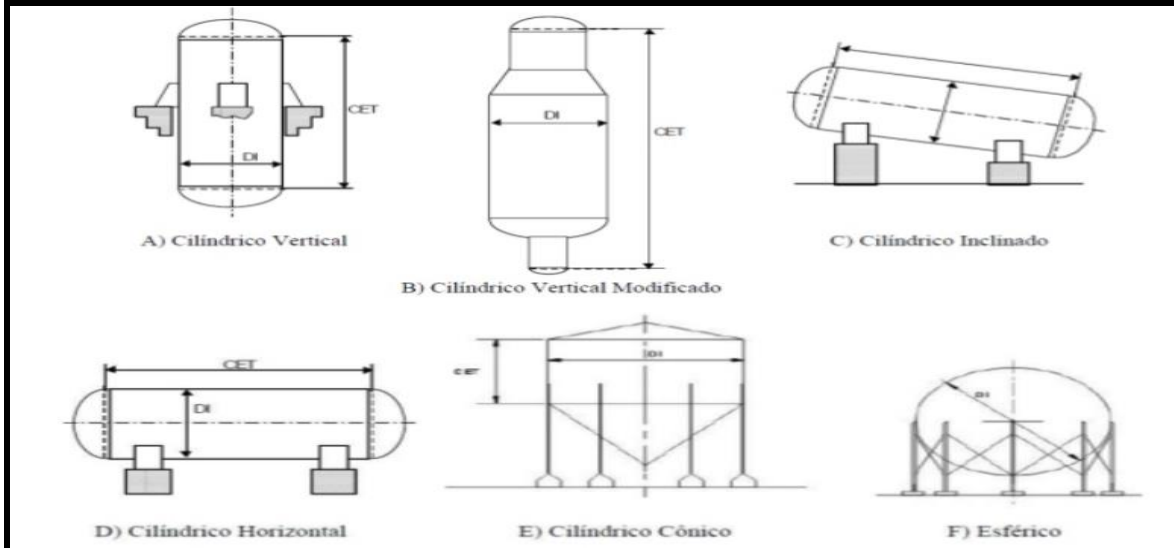
Vasos de pressão é todo tipo de reservatório, independentemente de sua geometria, tamanho ou aplicação, que contenham fluidos e que são projetados para suportar com segurança pressões internas superiores a 0,1 MPa ou inferior a pressão atmosférica e também casos em que se encontram submetidos a pressão externa, realizando a atividade de armazenar fluidos (SANTOS, 2010).

Com relação as suas faixas de trabalho, seu campo de operação é bastante amplo, operando desde o vácuo absoluto até pressões próximas à 400 MPa, e suas temperaturas de trabalho variam de aproximadamente o zero absoluto até a casa dos 1500 °C (TELLES, 2007).

2.1.1 Formatos e Posições de Instalação de Vasos de Pressão

São encontrados na maioria das vezes nas suas três formas principais: cilíndrica, cônica e esférica (TELLES, 2007). Na Figura 1 é possível ver os formatos e posição de instalação de vasos de pressão.

Figura 1 - Modelos de Vasos de Pressão



Fonte: (TELLES, 2007).

Sobre seu formato cilíndrico, é o modelo mais utilizado na indústria, por ser de fácil fabricação e transporte e possui o melhor aproveitamento de chapas na hora da fabricação diminuindo o desperdício de material (OTTERBACH, 2012).

O formato esférico por não possuir discontinuidades é teoricamente o formato ideal para casco de pressão, pode-se chegar a menores espessuras em condições iguais para pressão e volume contido (OTTERBACH, 2012).

O formato cônico é aplicado nas indústrias quando convém reduzir ou aumentar o diâmetro de um determinado cilindro. Usado também quando o fluido que se está trabalhando é muito viscoso ou se tem necessidade de diminuir as perdas por escoamento (OTTERBACH, 2012).

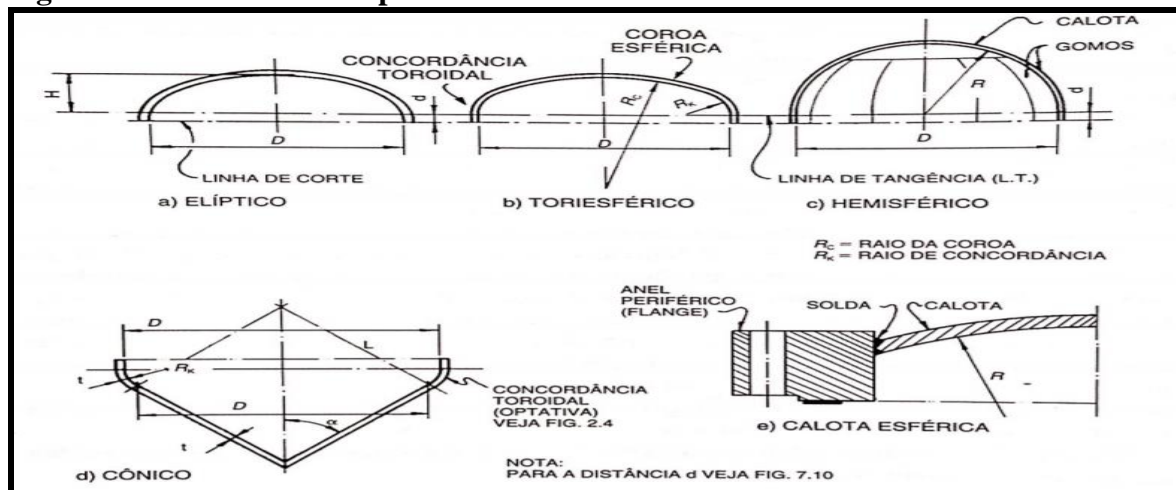
A respeito de suas posições de instalação, dependem exclusivamente da aplicação que serão submetidos sendo suas posições básicas de trabalho: horizontal, vertical ou inclinado (IECKER, 2014).

Entre todas as posições de instalação a posição horizontal é a mais comum e geralmente utilizada para trocadores de calor e vasos de acumulação (TELLES, 2007). Já quando trabalham na posição vertical é pelo fato de precisarem escoar algum tipo de fluido. Essa posição é bastante vantajosa pois ocupam menos espaço (OTTERBACH, 2012). Na posição inclinada, o vaso de pressão é introduzido em situações onde o material que se encontra no interior do vaso precisa ser escoado pela ação da gravidade (TELLES, 2007).

2.1.2 Tampos de Vasos de Pressão

Os tampos de um vaso de pressão são as peças de fechamento do cilindro. Podem ser encontrados em vários formatos sendo os mais comuns: elíptico, Toriesférico, hemisférico, cônico e plano (TELLES, 2007). Segue na Figura 2 os modelos de tampos mais usuais.

Figura 2 - Modelos de Tampos



Fonte: (TELLES, 2007).

O formato elíptico é usualmente empregado para pressões superiores a 1 MPa (10,2 kgf/cm²). Sua seção transversal se assemelha a uma elipse com seu raio variando continuamente fazendo com que a transição entre o tampo e o cilindro seja suavizada. A forma elipsoidal é definida pela relação entre eixo maior e menor, onde um arranjo de 2:1 faz com que sua altura seja um quarto do seu próprio diâmetro interno (LAWATE; DESHMUKH, 2015).

Esse modelo de tampo não é tão eficiente para lidar com tensões como o hemisférico, então as regras de projeto exigem uma espessura maior. As fórmulas de projeto do código ASME para formato elíptico 2:1 são próximas da do cilindro, neste caso resultando em uma espessura exigida para o tampo de 0,4947 polegadas contra 0,500 polegadas para o cilindro (MOORE; TOMLINSON, 2019).

No caso do tampo Toriesférico, são bastante utilizados e normalmente aplicados quando o trabalho exigir pressão inferior a 1 MPa (10,2 kgf/cm²), acima desse ponto não se tornam rentáveis. Sua seção é formada por uma calota esférica central com raio constante e por uma seção de transição para o cilindro conhecida como junta (Knuckle). Essa junta é aplicada no tampo para evitar que uma descontinuidade na peça produza algum ponto de tensão excessivo trazendo possíveis problemas (LAWATE; DESHMUKH, 2015).

Sua fabricação é mais simples que a do tampo elíptico. E a mesma se torna mais simples a medida que o raio de junta for menor, porém quanto menor for o raio menor será sua resistência (TELLES, 2007).

O tampo hemisférico é considerado o mais resistente entre os modelos de tampos, onde sua espessura pode ser metade da espessura do casco cilíndrico de mesmo diâmetro (TELLES, 2007).

Seu modelo não permite que sejam fabricados por chapas planas, por isso, é todo confeccionado a partir de pequenos gomos soldados que formam o tampo. O resultado é que o processo torna o custo final maior e acaba que esse formato de tampo apenas seja viável quando sua aplicação exigir que o vaso seja de grande diâmetro ou que precisem trabalhar em altas pressões (MOORE; TOMLINSON, 2019).

De modo geral, o tampo cônico possui uma fácil fabricação, mas não são muito utilizados pelo motivo de não apresentarem grande resistência. Em todos os casos são usados como tampo inferior, onde se tem necessidade do escoamento de algum tipo de fluido de forma rápida (IECKER, 2014).

Para os modelos que apresentarem semiângulo maior que 30° , o código ASME, Seção VIII, Divisão 1 antecipa que seja realizado uma junta para alívio, sendo dispensado em casos onde é feito um estudo de análise de tensão (parágrafo 1-5, Divisão 1) (TELLES, 2007).

No caso dos tampos planos, existe uma grande variedade dos mesmos, sendo os modelos mais comuns os não removíveis para baixas pressões, cego parafusado removível, cego com anel rosqueado e forjado não removível para alta pressão. Sua escolha visa a economia e depende principalmente do diâmetro, pressão de trabalho e recurso de fabricação (TELLES, 2007).

2.2 CÓDIGO ASME

A *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) é uma associação de profissionais na área da engenharia que desenvolve o projeto de código, construção, inspeção e testes de equipamentos, incluindo caldeiras e vasos de pressão (ROBERTO, 2016).

Tendo sua seção VIII o maior destaque e utilização em projetos de vasos de pressão no Brasil atualmente, sendo a mesma dividida em três subdivisões (DEMOLINER, 2015).

2.2.1 Divisão 1 – *Rules for Construction of Pressure Vessel*

Criada em 1968, após uma revisão da antiga seção VIII, a divisão 1 é o código mais aplicado no Brasil (DEMOLINER, 2015). Seu escopo estabelece as regras para dimensionar os principais componentes (casco, tampo, reduções, flanges bocais e reforços) estando sujeitos a pressão interna ou externa (FALCÃO, 2008).

Outro ponto é que a divisão 1 utiliza-se do critério de falha da Tensão Principal Máxima ou Critério de Rankine e a mesma não pode ser utilizada quando for necessária a análise de fadiga (IECKER, 2014).

Fica como sendo a tensão máxima admissível (S_{adm}) a própria tensão permitida do material utilizado na construção do equipamento de acordo com a norma. E essa mesma tensão irá variar em função do material e temperatura de projeto. Para a norma ASME Seção VIII Divisão 1, as tensões máximas admissíveis dos materiais tirando o ferro fundido são dados em função da temperatura na Seção II, parte D, Subparte 1, Tabelas 1A e 1B, da norma ASME. Todas as tensões são calculadas com elevados fatores de segurança, limitando as

tensões atuantes em níveis bastante seguros com espessuras de paredes maiores (IECKER, 2014).

Qualquer vaso de pressão projetado segundo esta norma, fica sujeito a limitações de pressões internas de no mínimo 103 kPa (1,05 kgf/cm²) até 20685 kPa (210,93 kgf/cm²) ou pressão externa de no máximo 103 kPa (1,05 kgf/cm²) (SOUZA, 2015).

Para cálculos de espessura necessária de cascos e tampos, a norma baseia-se na teoria da membrana em função da pressão interna ou externa, desprezando efeito da flexão devido a espessura da parede. Outras tensões, como as tensões primária de flexão, são controladas indiretamente por fatores de correção, já as tensões secundárias e tensões localizadas máximas são todas controladas indiretamente por diversas exigências (TELLES, 2007).

2.2.2 Divisão 2 – *Rules for Construction of Pressure Vessel – Alternative Rules*

A divisão 2 foi criada em 1969, como forma de alternativa para divisão 1. Essa alternativa adota critérios e detalhes de projeto, fabricação, exames e testes mais rigorosos e tensões admissíveis superiores, além de não possuir limite para pressão de projeto (FALCÃO, 2008). Para essa divisão é adotado a teoria da "máxima tensão de cisalhamento" (ruptura pelo cisalhamento máximo) ou Critério de Tresca (FALCÃO, 2008).

2.2.3 Divisão 3 – *Rules for Construction of Pressure Vessels – Alternative Rules for High Pressure Vessels*

Sendo a mais recente, criada em 1997, a divisão 3 é direcionada para vasos que trabalhem a alta pressão, acima de 70 MPa (IECKER, 2014).

Adota a mesma teoria da divisão 2, a "máxima tensão de cisalhamento". Sua principal diferença é que exige uma análise mais rigorosa e a utilização de materiais para fabricação é restrita (FALCÃO, 2008).

2.3 EQUAÇÕES PARA PROJETO DE TAMPOS CONFORME O CÓDIGO ASME SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1

Todas as fórmulas para o cálculo das tensões que atuam sobre um tampo são apresentadas abaixo, de acordo com a norma ASME Seção VIII Divisão 1.

2.3.1 Cálculo de tampo Toriesférico para pressão interna

Segundo ASME Seção VIII Divisão 1, a equação para tampo Toriesférico é igual:

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

$$M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right) \quad (2)$$

Onde:

S = Tensão crítica atuante no tampo [MPa];

t = Espessura mínima necessária [mm];

P = Pressão interna de projeto [MPa];

L = Raio da coroa central [mm];

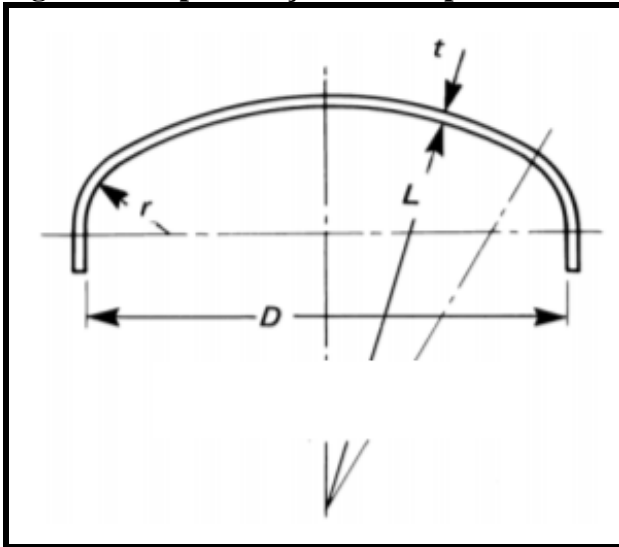
M = Fator de forma (Os valores usuais de M podem ser encontrados na tabela 1-4-2, do código ASME, Seção VIII, Divisão 1);

r = Raio de concordância (Knuckle) [mm];

E = Coeficiente de eficiência de solda;

Na Figura 4 encontra-se um modelo de tampo Toriesférico

Figura 3 - Especificações do tampo Toriesférico



Fonte: (ASME, 2017).

É interessante assim como no tampo Elíptico adotar uma sobreespesura para o tampo Toriesférico para compensar o adelgaçamento consequente do processo de conformação (TELLES, 2007).

2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

O Método de elementos finitos, é um método numérico aproximado, que possui capacidade de analisar diversos fenômenos físicos que acontecem em meio contínuo, onde os mesmos são descritos por equações diferenciais parciais, com condições de contorno. É um método genérico, e aplicável na solução de vários tipos de problemas de engenharia (SOUZA, 2003).

Para Alves Filho (2013), o cálculo de flexão de uma viga apoiada apresenta determinadas equações diferenciais, que embora trabalhosas são possíveis de se resolver, porém este tipo de solução analítica não se aplica à grande maioria dos problemas práticos de engenharia. Deste modo, uma das estratégias para a resolução desses problemas é considerá-los como um sistema discreto.

No método de elementos finitos a ideia de um sistema discreto ou discretização de um sistema contínuo, considera dividir determinada estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si nos pontos discretos (FILHO, 2013).

Sendo o domínio de definição do modelo matemático dada pela divisão de um número discreto de elementos de dimensão finitas, onde os pontos de conexão entre esses elementos são conhecidos como nós do modelo ou nodais (SORIANO, 2003).

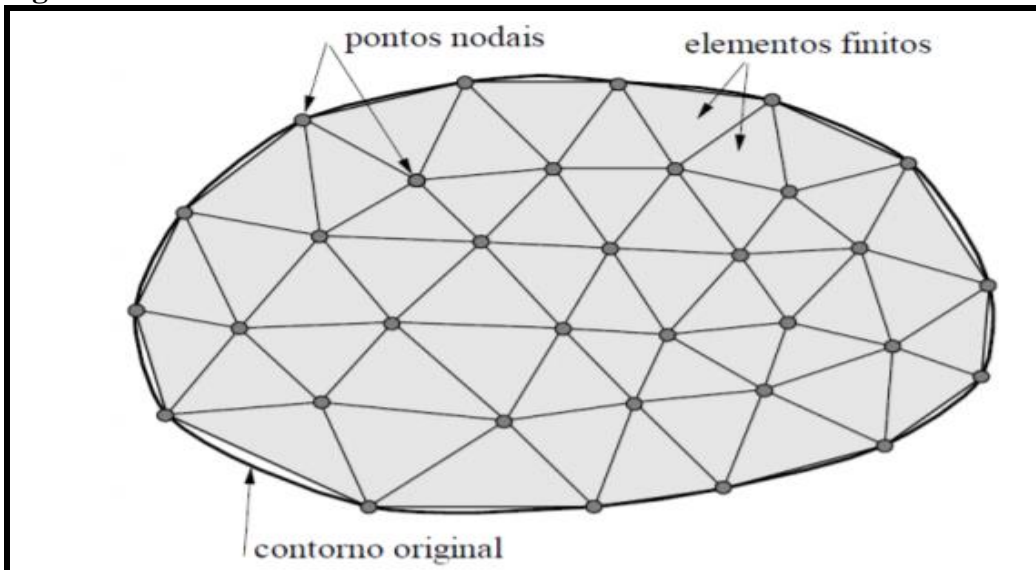
Calculando o deslocamento dos nós do modelo, é possível calcular o comportamento interno de cada elemento, e esse deslocamento calculado vai ser mais próximo do real quanto mais detalhadas forem as propriedades atribuída aos elementos escolhidos, que representam o trecho da estrutura entre os nós. Sendo assim, o elemento discretizado deve ser bem definido para que o modelo idealizado chegue o mais próximo do real (FILHO, 2013).

Neste contexto, entende-se que os parâmetros que descrevem o comportamento do sistema são os deslocamentos dos nós, possibilitando determinar os esforços internos, tensões e avaliar a resistência da estrutura em específico. Parâmetros esses conhecidos como variáveis de estado, pois são elas que apresentam o estado de equilíbrio da estrutura (FILHO, 2013).

O desenvolvimento do MEF é amplo e existe um grande número de elementos disponíveis. Por isso, na hora da discretização de um determinado modelo matemático é aconselhável aplicar elementos finitos robustos e eficientes (SORIANO, 2003). Onde a satisfatoriedade dos resultados de determinado modelo envolvendo análise por MEF esta ligada com a forma e a quantidade de elementos de malha (SOUZA, 2015).

Na Figura 8 é possível verificar uma malha de elementos finitos.

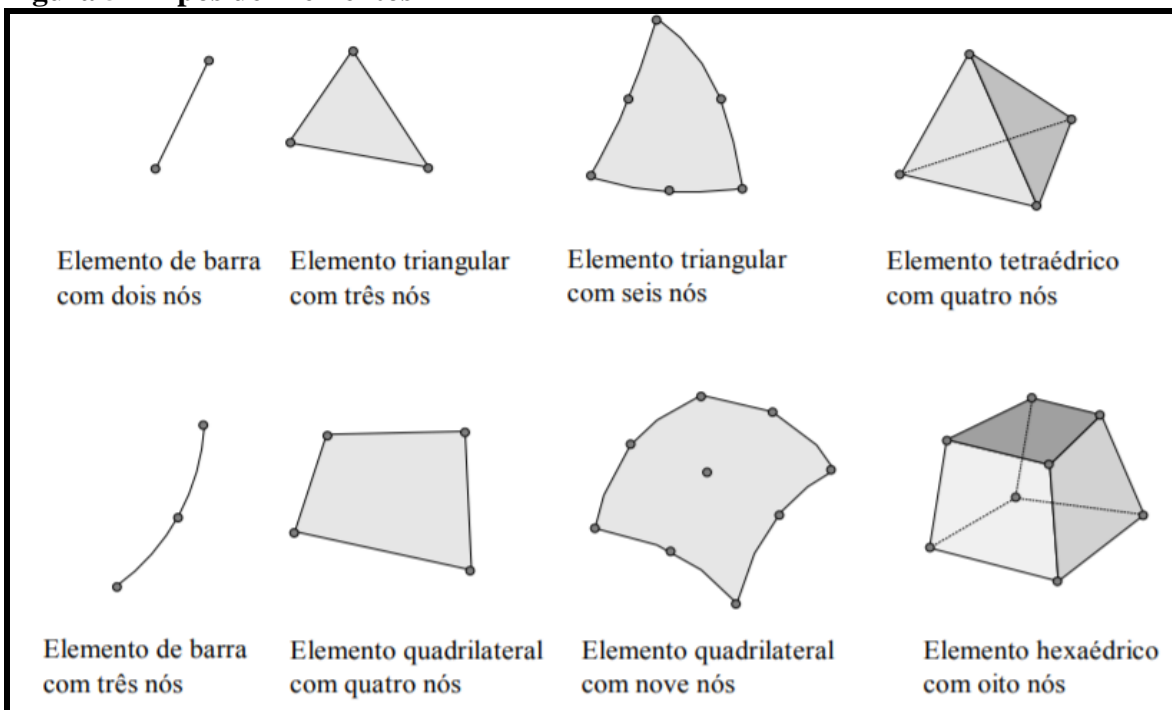
Figura 4 - Malha de Elementos Finitos



Fonte: (SOUZA, 2003).

Entre os diversos modelos de elementos finitos que já foram desenvolvidos, os mesmos apresentam diversas formas geométricas e sua aplicação vai ser levada em consideração de acordo com o tipo e dimensão de cada problema em específico (uni, bi ou tridimensional) (SOUZA, 2003). Na Figura 9, encontram-se algumas formas geométricas de elementos.

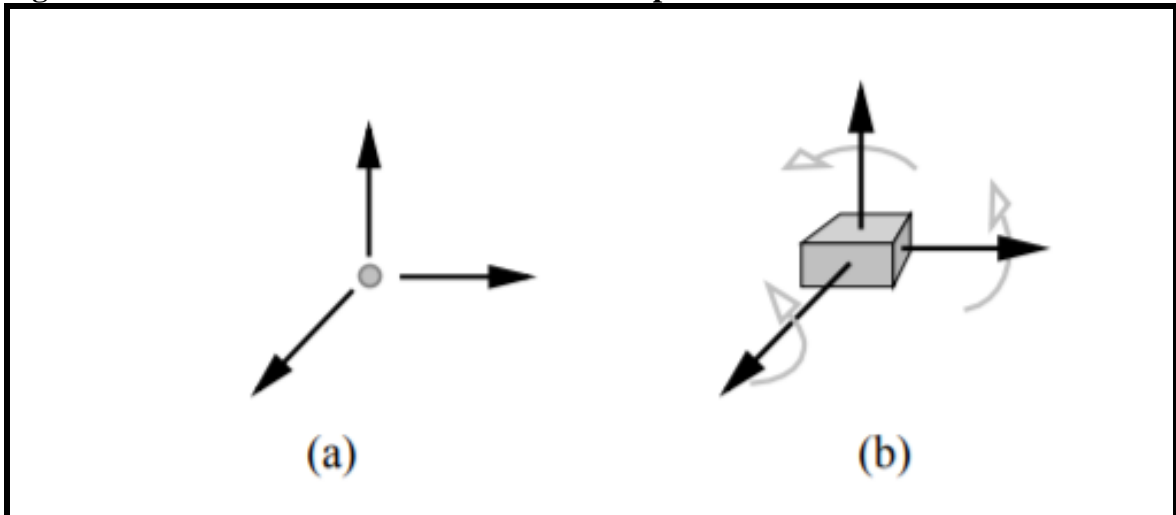
Figura 5 - Tipos de Elementos



Fonte: (SOUZA, 2003).

Outro conceito muito importante no MEF, é o conceito de grau de liberdade. Sua origem se baseia no movimento de partículas nos problemas de mecânica. Por isso, a idéia de grau de liberdade consiste em descrever o movimento dos nós, que em um espaço tridimensional pode apresentar três movimentos de translação e três movimentos de rotação. (SOUZA, 2003). A Figura 10 apresenta os graus de liberdade em determinado ponto.

Figura 6 - Graus de Liberdade de determinado ponto



Fonte: (SOUZA, 2003).

Sendo que, o comportamento de cada elemento será descrito pelo número e posicionamento de cada nó e também pelo(s) grau(s) de liberdade de cada nó. Um exemplo disso se dá na análise de tensões de um problema tridimensional, onde cada nó irá apresentar três graus de liberdade. Estes movimentos ou deslocamentos dos nós são as principais incógnitas em uma análise pelo método de elementos finitos (SOUZA, 2003).

2.5 PROGRAMA ANSYS

O ANSYS é um software de elementos finitos que tem a capacidade de simular os mais variados problemas de engenharia (IECKER, 2014). Este programa possui a capacidade de sete tipos diferentes de análises de estruturas, sendo elas, estática, modal, harmônica, dinâmica, de flambagem, dinâmica explícita e também características especiais como mecânica da fratura (MARINHO, 2002).

Marinho (2002) explica que em uma análise de estrutura, o programa divide o procedimento em etapas, sendo elas: pré-processamento, solução e pós-processamento.

- Pré-processamento – modelar a estrutura a ser estudada, definir o tipo de elemento e o material do mesmo.
- Solução – determinar os tipos de forças que atuam sobre a estrutura, suas condições de apoio e o modelo de análise escolhido (estática, dinâmica etc.).
- Pós-processamento – rever os resultados das análises e avaliar o desempenho da estrutura, com as ferramentas de pós-processamento.

Por ser um sistema autoalimentado, após efetuar as etapas e a respectiva análise apresentar de alguma maneira resultados que não são esperados, ou seja, não haver convergência, pode-se começar do início, reavaliando os passos e refazendo os mesmos (SILVA, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em primeiro momento foi buscado definir os modelos de tampos para a análise, onde foi definido os modelos de tampos toriesférico falsa elipse, o primeiro modelo foi um com diâmetro de 674 mm, tendo um raio central de 620,3 mm, um raio de concordância de 108,3 mm e espessura de 12,7 mm. Já o segundo modelo foi um modelo com diâmetro de 318 mm, seu raio central é de 288 mm, um raio de concordância de 54,9 mm e espessura de 3 mm. Os parâmetros para cálculo também foram estabelecidos sendo eles, a pressão de trabalho em 10 bar, temperatura de trabalho 120 °C e o material foi definido sendo como SA-285-C.

Quadro 1 - Propriedade Mecânicas do Aço SA-285-C

Propriedade	Valor
Massa específica	7750 kg/m ³
Módulo de elasticidade (Young)	192.10 ³ MPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Tensão de escoamento	177 MPa
Limite Resistência	379 MPa
Tensão admissível (120°C)	108 MPa

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Tendo todos os dados a etapa seguinte foi aplicar as equações (1) e (2) para encontrar a tensão que atuava no tampo segundo a norma ASME, para depois ter como parâmetro de comparação com os valores que foram encontrados pelo método de elementos finitos.

Após feitos os cálculos, o próximo passo foi encontrar os valores através do método de elementos finitos. Em um primeiro momento foi feito o desenvolvimento dos dois modelos em CAD para que pudessem ser rodados no software de elementos finitos (MEF).

Já dentro do software o primeiro passo para a análise foi inserir as propriedades do material selecionado que é o aço SA-285-C, sendo que as propriedades inseridas foram a massa específica, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

Com as propriedades estabelecidas foi então definido o tipo de análise, nesse caso Estrutura Estática (*Static Structural*), pelo fato de ser o mais simples e também como o carregamento da pressão interna é feito de forma gradativa até o valor máximo, este foi o tipo de análise que melhor se encaixa. Logo após, foram definidas as condições de contorno e aplicação dos carregamentos, onde o carregamento da pressão foi aplicado na face interna dos tampos e o suporte engastado foi aplicado na própria face onde é feito a união do tampo ao casco.

Para a geração de malha e também uma comparação entre diferentes tipos de elementos, primeiramente foi feito uma malha com elementos tridimensionais tetraédricos e depois uma malha com elementos tridimensionais hexaédricos. Ainda na geração de malha foi aplicado um recurso de convergência utilizado para refinamento da malha, verificando a convergência dos resultados e o tempo de processamento, onde foi aplicado 2 % de variação entre um resultado e outro. Por último, a solução solicitada para esta análise foi a máxima tensão principal, possibilitando fazer a comparação direta com os valores apresentados pela norma.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TAMPO Ø674 mm TORIESFÉRICO FALSA-ELIPSE

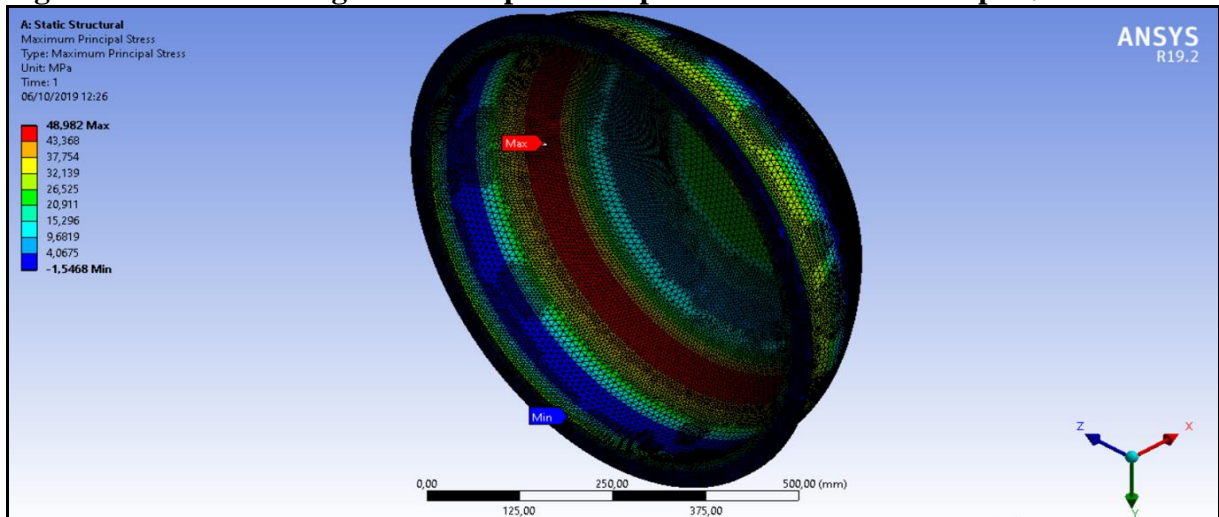
De acordo com os resultados encontrados os valores de tensão máxima obtidos segundo o método de elementos finitos com elementos tetraédricos e elementos hexaédricos, ficaram semelhantes aos valores obtidos pelo método analítico, para o tampo toriesférico falsa-elipse de Ø674mm, conforme mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tensões Máximas: Tampo Toriesférico Falsa-Elipse Ø674mm

	ASME (MPa)	MEF (MPa) Tetraédricos	MEF (MPa) Hexaédricos
Tensão Máxima Principal	47,1	48,984	48,982

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Como pode-se observar os resultados ficaram bastante semelhantes, mostrando que é plausível conciliar ambos os métodos para uma verificação mais apurada. Isso demonstra como o método de elementos finitos e o método analítico da norma servem um como complemento do outro. Para os tipos de elementos que embora sejam diferentes seus resultados foram praticamente iguais, indicando que nesse caso tanto um quanto o outro tipo de elemento pode muito bem representar a situação.

Figura 7 – Resultado Segundo MEF para Tampo Toriesférico Falsa-Elipse Ø674mm

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Conforme a Figura 11, pode-se observar que a máxima tensão atuante fica na região de concordância do tampo pois é ali que se tem a transição de geometria fazendo com que apresente maior concentração de tensão.

4.2 TAMPO Ø318 TORIESFÉRICO FALSA-ELIPSE

Para o tampo toriesférico falsa-elipse de Ø318mm onde os resultados estão representados na Tabela 3, nota-se que os valores de tensão máxima obtidos pelo método de elementos finitos com elementos tetraédricos e hexaédricos, ficaram bastante semelhantes aos valores obtidos pelo método analítico.

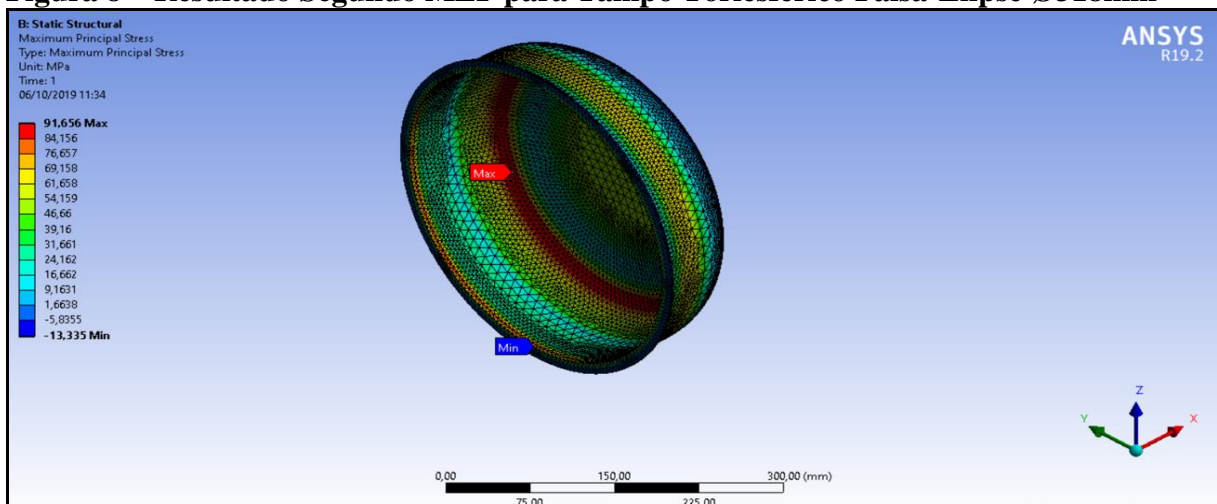
Tabela 3 - Tensões Máximas Tampo Toriesférico Falsa-Elipse Ø318mm

	ASME (MPa)	MEF (MPa) Tetraédricos	MEF (MPa) Hexaédricos
Tensão Máxima Principal	90,65	91,656	91,727

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Conforme as Figuras 11 e 12 a faixa representada na cor em vermelho das imagens mostram onde a máxima tensão está atuando. Neste caso como comentado antes esta mesma faixa em vermelho fica exatamente na região de concordância do tampo provando que quando bem definida a peça a ser analisada ou qualquer outro tipo de sistema mecânico o MEF representa perfeitamente as regiões que mais são prejudicadas em decorrência dos carregamentos.

Contudo vale pontuar que mesmo a faixa em vermelho mostrando que é nessa região onde atua a máxima tensão não significa que o componente em questão não vai suportar o carregamento. Por exemplo no caso dos tampos analisados sua tensão admissível ficou na faixa dos 108 MPa, ou seja, ambos os tampos avaliando especificamente a máxima tensão principal conseguem suportar facilmente o carregamento imposto. Claro que como mostra a tabela 3 a máxima tensão do tampo de diâmetro de 318 mm está bem próxima do valor admissível, mas isso se dá pelo fato de que a parede do tampo é de apenas 3 mm.

Figura 8 – Resultado Segundo MEF para Tampo Toriesférico Falsa-Elipse Ø318mm

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Já, na parte do MEF na questão análise dos modelos um problema que surgiu com frequência foi a falta de capacidade de processamento da máquina utilizada para rodar o MEF.

Provando que para se trabalhar com ele é necessário investir pesado em máquinas com alta capacidade de processamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostraram que os valores das tensões máximas atuantes calculadas pelo MEF foram próximos aos valores obtidos pelo método analítico do código ASME, porém para se trabalhar como o MEF é necessário um investimento alto em relação a máquinas com capacidade de processamento de dados, software e acima de tudo profissional com capacidade técnica, para melhor refinamento dos resultados.

Vale comentar também conforme se nota nas Figuras 11 e 12, que é uma ferramenta bastante útil pelo fato de apresentar muito bem as regiões que mais sofrem devido os carregamentos, assim ao utilizar-se desta ferramenta os projetistas podem interpretar essas situações e terem tratativas diferentes em relação a essas regiões em específico.

Mesmo o método de elementos finitos sendo bastante eficaz em termos de resultados, rapidez e precisão não é uma ferramenta tão acessível e requer que se tenha um investimento inicial bastante pesado pelo fato de exigir um profissional com capacidade técnica e também máquinas que possuam alta capacidade de processamento.

Para um trabalho futuro caberia mudar a geometria do tampo e aplicar um melhor refinamento de malha, sendo que para isto será necessário empregar máquinas que tenham maior capacidade de processamento de dados, para que possam ser analisados e comparados os resultados.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

ASME Sec. VIII – Div.1 “**Boiler and Pressure Vessel Code – Rules For Construction of Pressure Vessels**”. Ed. 2017.

DEMOLINER, Stefan. **ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DA NORMA ASME SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 E DIVISÃO 2**. 2015. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FALCÃO, Carlos. **Projeto Mecânico Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos**. Revisão 2008.

IECKER, Thyago Duarte. **Análise de Tensões em Vasos de Pressão através do Método de Elementos Finitos**. 2014. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2014.

LAWATE, Sourabh; DESHMUKH, B. B. Analysis of Heads of Pressure Vessel. **International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology**, Solapur, v. 4, n. 2, p.759-765, fev. 2015.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Equipamentos industriais e de Processo**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MARINHO, Ivy Jeann Pinto. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. 2002. Dissertação (Pós-graduação) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MOORE, Cameron; TOMLINSON, Michael. **Comparison Between Head Types: Hemi, SE, F&D and Flat**

Disponível em: <pveng.com/home/asme-code-design/comparison-between-head-types-hemi-se-fd-and-flat/>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

OTTERBACH, Joao Claudio H. **Características construtivas de um vaso de pressão tipo charuto para armazenamento de GLP**. SENAI-RS, 2012.

ROBERTO, Fabio. **Como surgiu a Norma ASME**. 2016. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/hist%C3%B3ria-da-norma-asme-fabio-roberto>>. Acesso em: 18 abr. 2019.

SANTOS, Valdir Aparecido dos. **Prontuário Para Projeto e Fabricação de Equipamentos Industriais: Tanques, vasos, trocadores de calor, colunas, reatores, serpentinas, agitadores, etc**. São Paulo: Ícone Editora Ltda, 2010.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Edusp, 2003.

SOUZA, Amanda Lemos Lucas de. **Projeto Básico de uma Vaso Separador Trifásico de Gás, Água e Óleo de acordo com o Código ASME VIII Divisão II**. 2015. 246 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

SOUZA. R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém, 2003.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de Pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TOMAZINI, Guilherme Abreu. **Diretrizes básicas para projetos de vasos de pressão segundo a ASME**. 2015. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.