

ANÁLISE DAS TENSÕES DOS VASOS DE PRESSÃO EM AÇO INOX 304L

Leonardo Finoti Moreira¹, Maria de Lourdes Martins Magalhães²,
Maria Eduarda Martins Magalhães³

Resumo: A demanda pelo desenvolvimento ocasiona um grande interesse do setor industrial por novos projetos tecnológicos. Na área da engenharia, existem inúmeros desafios em relação aos vasos de pressão, já que tais reservatórios são projetados para atuar de forma segura a pressões internas diferentes da pressão externa, que ainda podem ser geradas a partir da aplicação de calor, através de uma fonte interna ou externa, ou qualquer combinação destes fatores. Dessa forma, tais pressões podem causar fadiga e fratura, afetando a integridade estrutural desses reservatórios, que podem ser classificados como cilíndrico vertical, cilíndrico horizontal, esférico, entre outros. Devido a relevância da função dos vasos de pressão em diversas áreas da Indústria como óleo e gás, papel e celulose, nuclear, entre outras, ressalta-se a importância para o objeto de estudos das tensões internas e externas dos vasos de pressão de acordo com a ASME Seção VIII divisões I e II, NR-13. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é avaliar o material e as tensões internas e externas dos vasos de pressão fabricados com aço inoxidável 304L através do método dos elementos finitos, com o auxílio do software ANSYS, a fim de incrementar os resultados em termos de inovação e produtividade em parceria com uma empresa do setor de caldeiraria industrial, situada no Município de Santo André-SP. Através das simulações computacionais pelo método dos elementos finitos, os resultados demonstraram que o vaso separador/ evaporador é seguro, ao preservar sua integridade estrutural e atender às normas e técnicas vigentes, relacionadas aos requisitos elaborados na fase de projeto.

Palavras-chave: ASME. Caldeiraria industrial. Método dos elementos finitos. Vasos de pressão separador/ evaporador.

1 Mestrando em Engenharia Mecânica - COPPE UFRJ.

2 Professora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estácio de Sá - Campus Maracanã.

3 Aluna de Graduação em Engenharia Química da Faculdade SENAI CETIQT.

1 INTRODUÇÃO

A caldeiraria está inserida em uma área da indústria mecânica que aponta um desenvolvimento contínuo com a finalidade de atender as demandas de novos desafios, devido à necessidade de satisfazer determinados segmentos da indústria cada vez mais exigentes por segurança e eficiência, evitando que o meio ambiente e a sociedade sejam impactados por falhas estruturais, ocasionando desastres ambientais e sociais. Atualmente, o Brasil adota como padrão o código ASME, que é exigido em normas brasileiras como a exemplo a própria NR-13, que tem como objetivo condicionar inspeção de segurança e operação de vasos de pressão e caldeiras.

A busca pela excelência nos processos de projetos de engenharia, motivada pela necessidade de criação de materiais e equipamentos que apresentem resultados mecânicos satisfatórios e ainda agreguem valor aos mesmos, alinhada a uma metodologia de pesquisas científicas que ampliem e modernizem as tecnologias atuais, visando minimizar custos e maximizar a produtividade na área de engenharia e fabricação de equipamentos seguros e com alta qualidade tecnológica e inovadora, demonstram a necessidade de estudos que investiguem métodos inovadores relacionados aos projetos de engenharia voltados aos vasos de pressão conforme prevê a própria NR-13 quanto de inspeção de segurança que deve ser respaldada por exames e testes. Neste caso, desde a sua concepção, ou seja, durante a fase de desenvolvimento do projeto e produto são analisados os pontos críticos do equipamento e mitigado os riscos antes mesmo de sua fabricação.

O propósito de obter novas técnicas e conhecimentos que viabilizem a produtividade, qualidade e lucro do produto torna-se um fator relevante no cenário atual. Dessa forma, a caldeiraria industrial apresenta-se como um setor da indústria metalúrgica que é responsável pela produção de equipamentos complexos e de alto valor agregado. Cabe ainda ressaltar, que a indústria de caldeiraria, emprega e requer profissionais que demandem conhecimentos técnicos capazes de aplicar cálculos para a tensão dominante na atual ASME VIII seção 2, pois tais tensões são baseadas no método da energia de deformação, também conhecido como método de Von Mises (ASME, 2019). Desta forma, busca-se o desenvolvimento de equipamentos inovadores, seguros, e com grande aplicabilidade na indústria (TELLES, 2007).

Além das tensões de membrana em função da pressão interna, outros tipos de tensão podem ser desenvolvidos na parede dos vasos, devido a ação do vento e ambiente salino; esforços nos bocais relacionados à dilatação térmica da tubulação ou de equipamentos instalados; esforços de reação ligados ao peso próprio do equipamento sobre seu suporte (ASME, 2019).

A análise das tensões pode ser realizada por determinados métodos, sendo eles experimentais, analíticos ou numéricos:

a) Métodos Experimentais: são utilizados quando a aplicação de métodos analíticos ou numéricos é muito difícil ou impossível, devido à utilização de elementos ou estruturas reais submetidas às cargas estáticas e/ou dinâmicas previstas.

b) Métodos analíticos: apesar de se mostrar mais trivial em relação aos demais métodos para análise de tensões o uso da mecânica dos sólidos, sua aplicação é limitada a casos muito particulares, pois considera a distribuição pré-concebida de tensões ou de deformações, o que pode levar a erros por não corresponder à realidade.

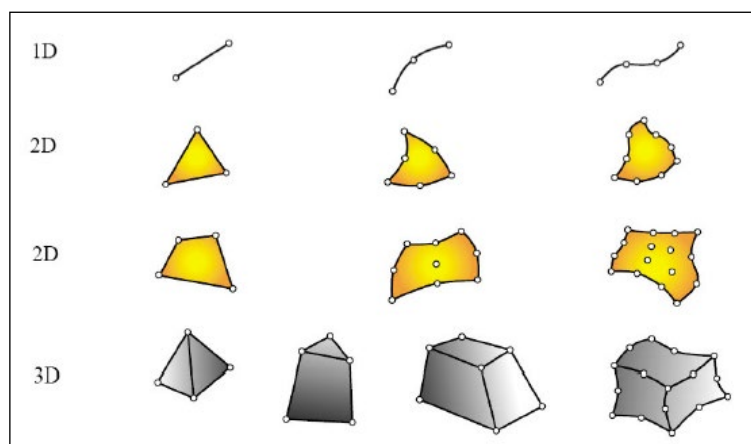
c) Métodos numéricos: são utilizados principalmente em estruturas complexas, pois possuem maiores flexibilidades na busca por melhores soluções, possibilitando a análise de geometrias onde é exigida uma maior complexidade devido às necessidades do projeto. Assim, nota-se que os principais métodos numéricos são os de diferenças finitas, elementos finitos e elementos de contorno.

O método de elementos finitos constitui uma ferramenta para solução numérica de equações diferenciais parciais de problemas de engenharia e ciência aplicada. O estudo pode ser realizado através de softwares, alinhado com a ASME, juntamente com os dados do aço inox 304L, utilizado na fabricação do vaso de pressão e o seu dimensionamento.

Vaso de pressão é um nome genérico para designar reservatórios pressurizados, de qualquer tipo, dimensão, formato ou finalidade, entre os quais encontram-se além dos vasos de pressão propriamente ditos, os reatores, torres de destilação, de fracionamento e de retificação e ainda os trocadores de calor, aquecedores, resfriadores, condensadores, refeedores, caldeiras, entre outros (TELLES, 2007).

O Método de Elementos Finitos (MEF) teve a sua origem em 1943, quando o matemático Courant, baseado no método de aproximação de Ritz estabelecido em 1909, apresentou uma solução polinomial para um problema de torção, seguindo procedimentos considerados como MEF (AGARWAL, 2013). Diversos tipos de elementos foram desenvolvidos com variadas formas geométricas em função do tipo e da quantidade de dimensões do problema. A Figura 1 indica a geometria de alguns tipos de elementos finitos (AZEVEDO, 2003).

Figura 1 - Tipos de Elementos Finitos



Fonte: AZEVEDO (2003)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

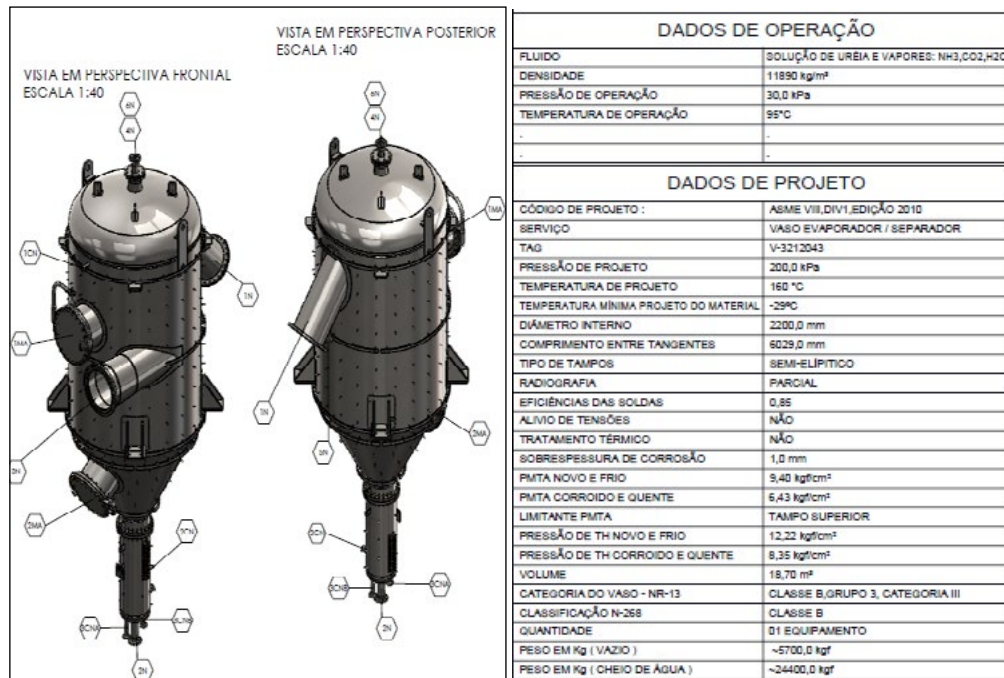
O material de fabricação do vaso estudado é o aço INOX 304L, cuja classificação AISI determina um teor máximo de 0,03% de carbono e 12% de níquel em sua composição, conferindo uma melhor aplicação na fabricação de equipamentos.

Os códigos ASME Seção VIII Divisões 1 e 2 utilizam as tensões admissíveis estabelecidas no código ASME Seção II, Parte D, que apresenta diversas tabelas, onde as tensões admissíveis são estratificadas pela seção do Código ASME.

2.1. Dimensionamento do Vaso de Pressão

Com a finalidade de estudar as tensões no vaso de pressão, foi produzido o projeto de fabricação e conseqüentemente, o dimensionamento do vaso, onde foram definidos a pressão máxima de operação, pressão de projeto, pressão máxima de trabalho admissível, pressão do teste hidrostático, temperatura máxima de operação, temperatura de projeto, temperatura mínima de projeto do material, corrosão admissível e eficiência das juntas soldadas conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Vaso Evaporador/ Separador, dados de Operação e Projeto.



Nesse cenário, a partir dos fatores elencados e dos dados de operação e de projeto apresentados, pretende-se evitar tensões excessivas e riscos ao perfeito funcionamento do equipamento.

2.2. Análise das Tensões do Vaso

Além da definição do tipo de vaso de pressão estudado (vaso evaporador/ separador), definiu-se também o desenvolvimento dos desenhos detalhados do vaso e a utilização do software Ansys Workbench baseado no Ansys Mechanical (ANSYS-USA, 2022) para a realizar as simulações. Dessa forma, foi realizada a modelagem do vaso de pressão (FIGURAS 3, 4 e 5), conforme dados do projeto e ASME B16.5. A - Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS ½ Through NPS 24 Metric/Inch Standard.

Figura 3 - Vista Isométrica do vaso de pressão

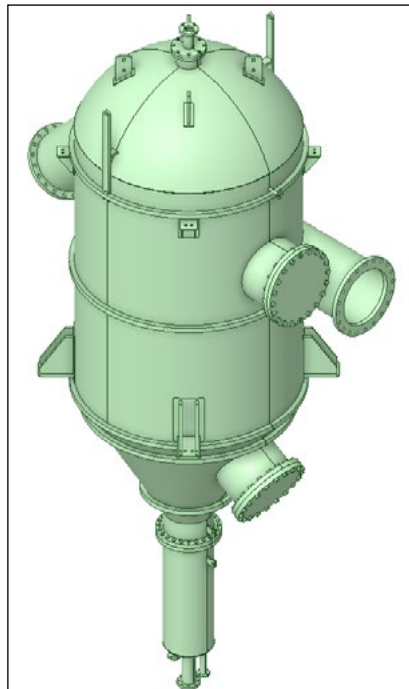


Figura 4 - Vista Superior do vaso de pressão

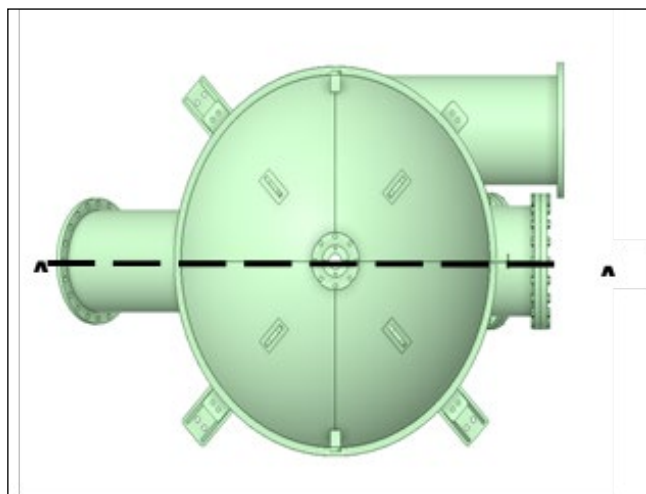
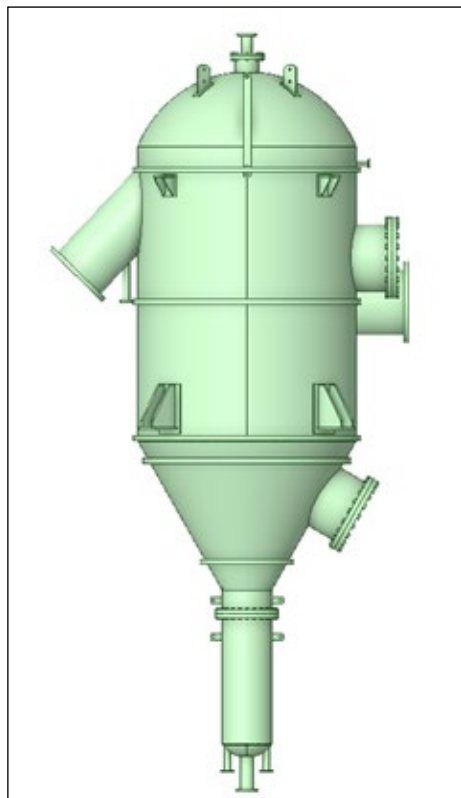


Figura 5 - Vista Frontal do vaso de pressão



Ao adotar o propósito de verificação da capacidade estrutural desse componente, as seguintes premissas foram assumidas:

- a) Considerou-se o comportamento linear elástico do componente;
- b) O material atribuído para o vaso separador/evaporador é o aço inox 304L, de acordo com as propriedades informadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades de projeto do aço inox 304L

| Propriedades de Projeto | |
|--------------------------------|--------------|
| Módulo de Elasticidade | 200 Gpa |
| Limite de Escoamento | 210 Mpa |
| Densidade | 8.000 Kg m-3 |

c) A temperatura de projeto do vaso separador/evaporador é de 160°C. Dessa forma, foi aplicado um fator de correção nas tensões admissíveis conforme ASME B31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems, edição 2020 (TABELA 2). Como a temperatura de projeto é intermediária às

temperaturas disponíveis na norma, foi realizada uma interpolação linear (TABELA 3) para se obter o fator de correção atrelado a temperatura de projeto, conforme orientação da norma, chegando-se ao valor de 0,954 à temperatura de 160°C.

Tabela 2 - Fator de redução de temperatura para tubo de aço

| Temperature, °F (°C) | Temperature Derating Factor, <i>T</i> |
|-----------------------------|--|
| 250 (121) or lower | 1.000 |
| 300 (149) | 0.967 |
| 350 (177) | 0.933 |
| 400 (204) | 0.900 |
| 450 (232) | 0.867 |

GENERAL NOTE: For intermediate temperatures, interpolate for derating factor.

Fonte: ASME (2020)

Tabela 3 - Interpolação linear

| Interpolação | |
|-------------------------|--------------------------|
| Temperatura (°C) | Fator de Correção |
| 149 | 0,967 |
| 177 | 0,933 |

Fonte: Adaptado de ASME (2020)

Como o propósito dessa análise não foi analisar as tensões no corpo dos estojos aplicados nas juntas flangeadas, os contatos 1, 2, 3 e 4 (FIGURAS 6 e 7) foram modelados como *Bonded*, ou seja, um tipo de contato que permite uma solução linear, sem admitir o movimento relativo entre as partes.

Figura 6 - Contatos das juntas flangeadas

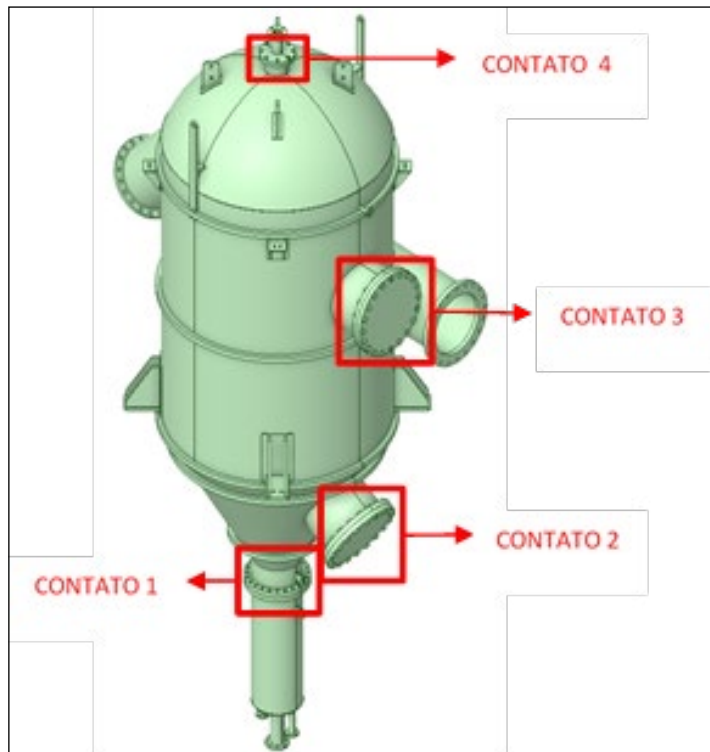
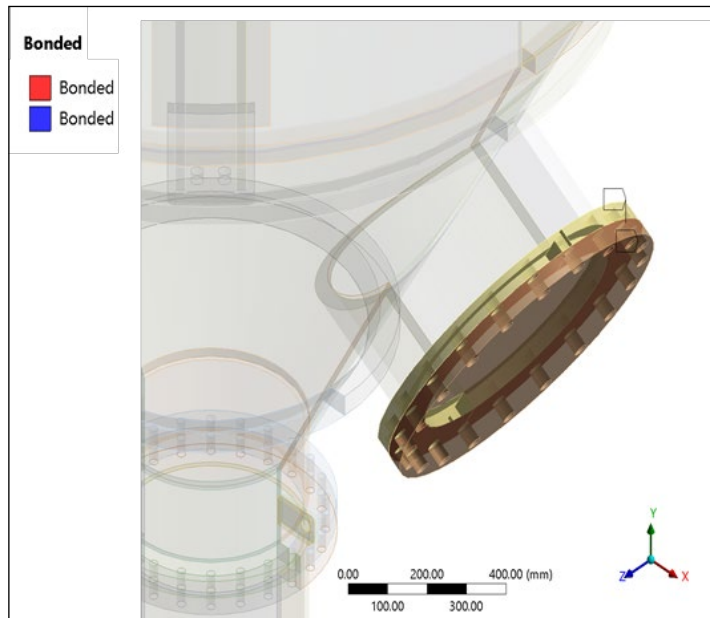
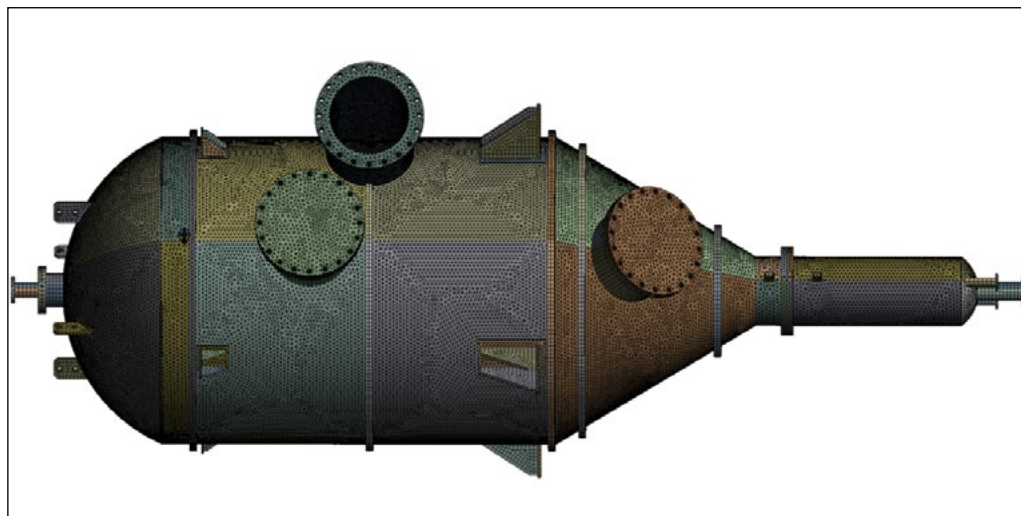


Figura 7 (contato 2) - Modelagem típica da junta tipo Bonded



O método de geração da malha em toda a estrutura (FIGURA 8) foi o tetraédrico de 2ª ordem, com elementos de aresta de 30 mm.

Figura 8 - Geração da Malha

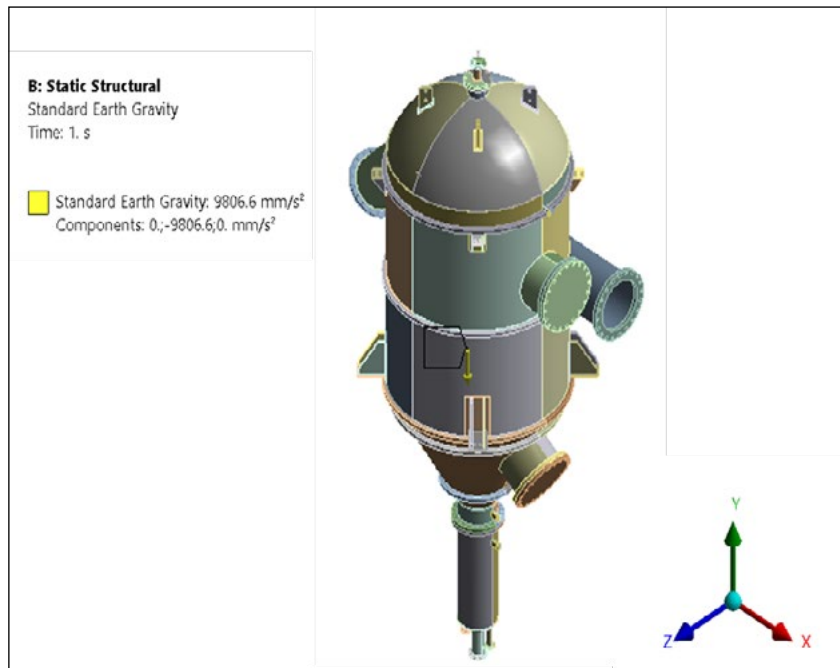


Também aplicou-se a aceleração da gravidade entre o primeiro e o segundo *step* da análise e mantido seu valor constante até o final, na direção -Y e com o valor de 9806,6 mm/s², de acordo com o Tabela 4 e a Figura 9.

Tabela 4 – Valores da aceleração da Gravidade

| tempo (s) | aceleração (mm.s ⁻²) |
|-----------|----------------------------------|
| 0 | 0 |
| 1 | - 9.806,60 |
| 2 | - 9.806,60 |

Figura 9 – Aplicação da aceleração da gravidade



Todos os apoios externos do vaso separador/evaporador foram modelados como suportes fixos (FIGURAS 10 E 11) para representar a real fixação desse componente.

Figura 10 - Vista superior dos apoios externos

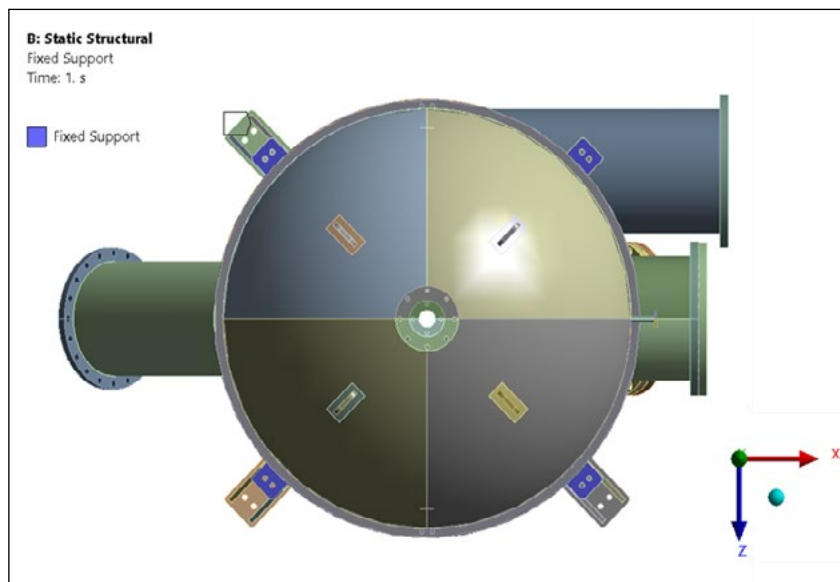
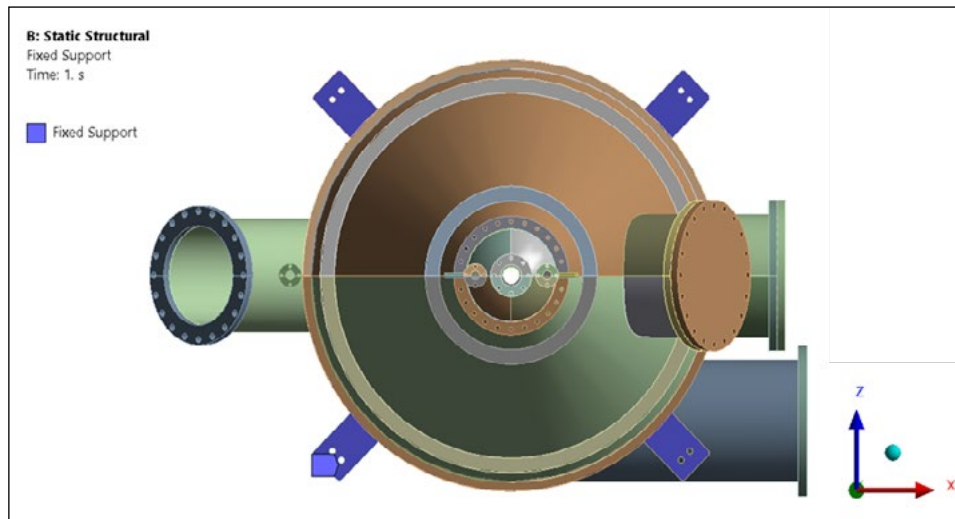


Figura 11. Vista inferior dos apoios externos



Ainda foi aplicada uma pressão de 1 MPa em todas as paredes internas do vaso separador/evaporador (FIGURAS 12 e 13) para levar a estrutura ao seu limite no regime elástico. A pressão foi aplicada dividindo a etapa, chamada de *step* de aplicação da pressão, em 11 *substeps*.

Figura 12 - Vista Frontal do vaso separador/evaporador (corte AA)

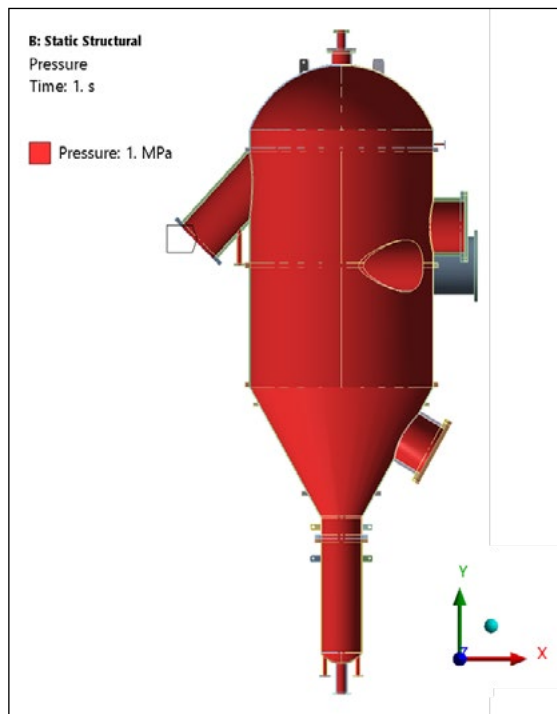
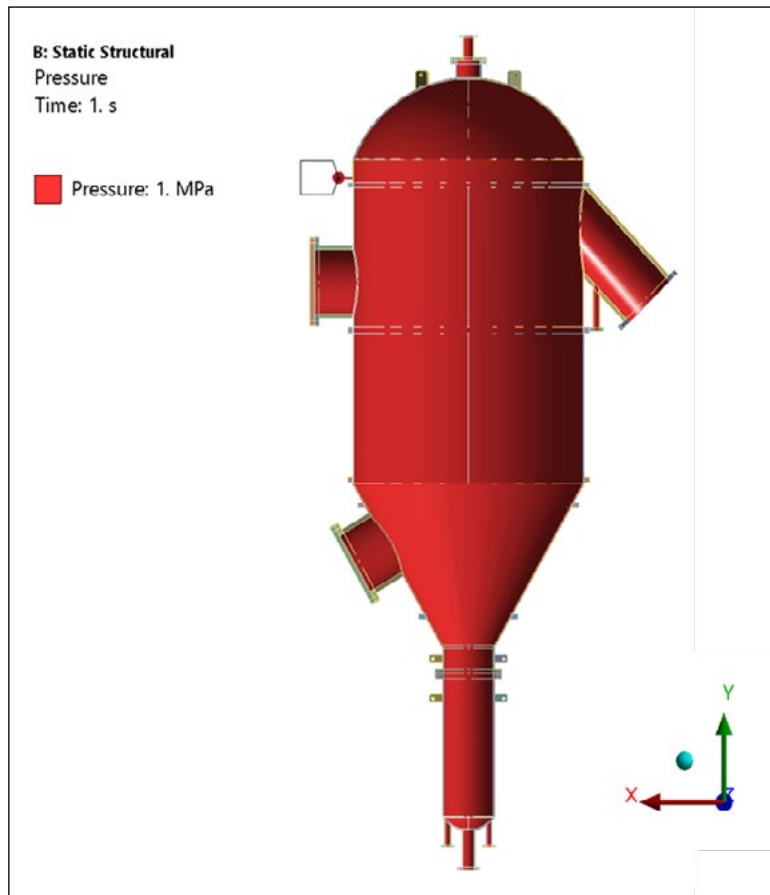


Figura 13 - Vista Posterior do vaso separador/evaporador (corte AA).



3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Ao considerar o fator de correção nas tensões admissíveis do componente, em função da temperatura, conforme foi evidenciado na seção de premissas, o limite de escoamento (TABELA 5) foi corrigido para o seguinte valor:

Tabela 5 - Limite de escoamento

| Limite de Escoamento | |
|---|-------------|
| Limite de Escoamento do Material | 210,000 Mpa |
| Limite de Escoamento Após Fator de Correção | 200,265 Mpa |

Com o limite de escoamento do material corrigido, as tensões equivalentes de Von-Mises foram plotadas no corpo do vaso separador/evaporador e os resultados estão evidenciados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Vista Isométrica, Frontal e Posterior

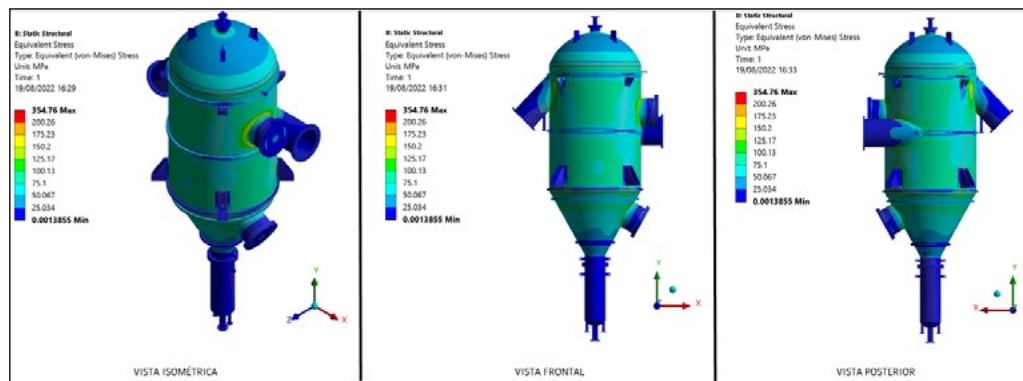
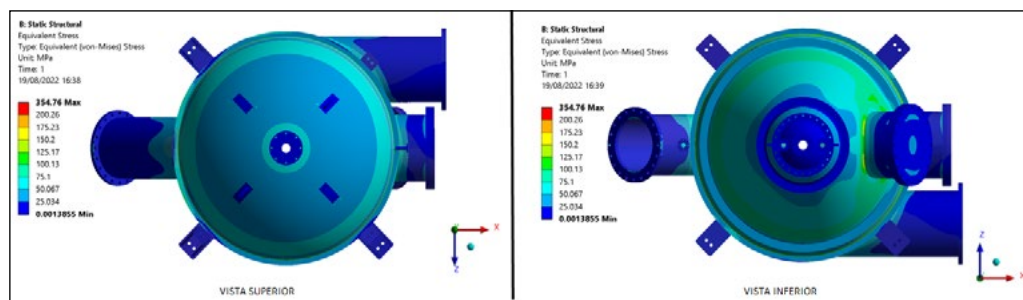
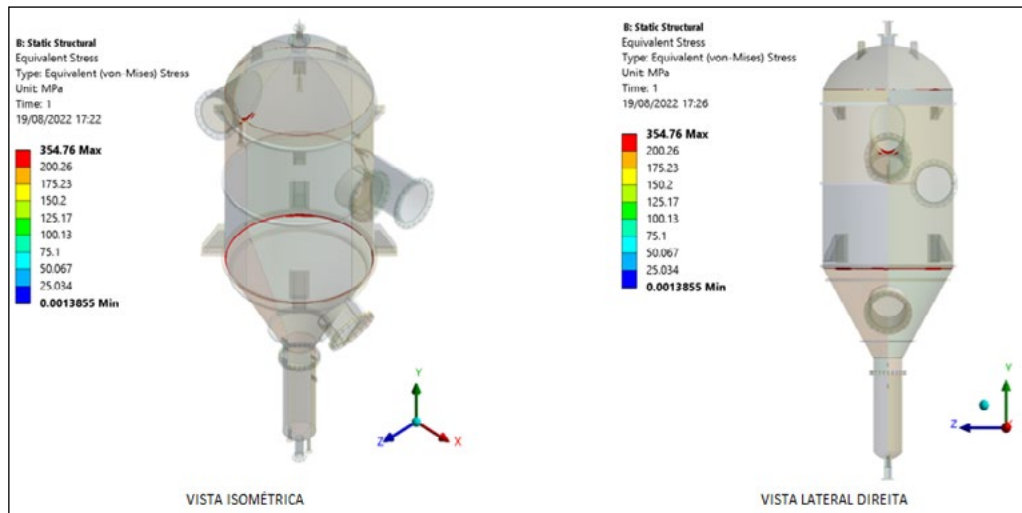


Figura 15 - Vista Superior e Inferior



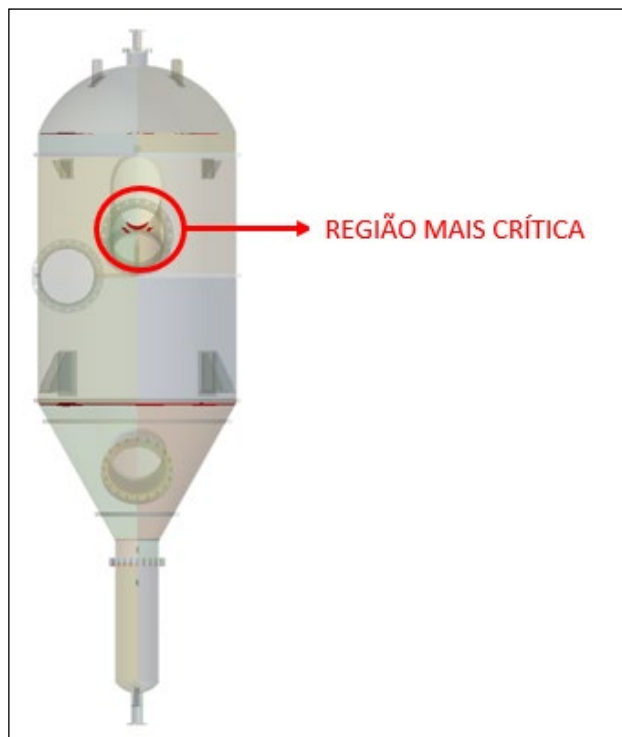
Aplicando um filtro para visualizar as regiões onde a tensão equivalente de Von-Mises ultrapassou o limite de escoamento corrigido (FIGURA 16), percebe-se que o vaso separador/evaporador apresenta regiões concentradoras de tensão.

Figura 16 - Limite de escoamento corrigido



A região apontada na Figura 17 é a região mais crítica da estrutura, concentrando tensões mais elevadas. Por esse motivo, essa região foi escolhida como região limitante e nela foi aplicado o método de linearização de tensão previsto na ASME/BPVC SEC VIII-2 - SECTION VIII DIVISION 2 ALTERNATIVE RULES - RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS (2020).

Figura 17 - Região crítica da estrutura



A ASME estabelece critérios para a tensão de membrana e para o somatório das tensões de membrana e flexão. Tais critérios estão descritos nas Equação 1:

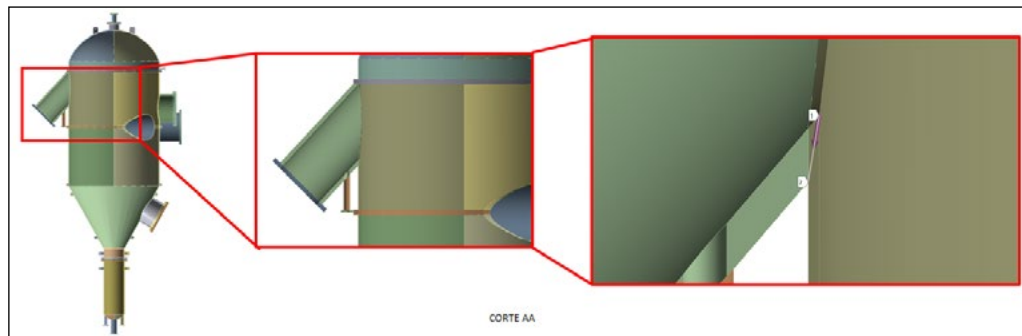
$$\begin{array}{l}
 P_m \leq S_y \\
 P_m + P_b \leq 1.5S_y
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \longrightarrow \\
 \longrightarrow
 \end{array} \right.
 \begin{array}{l}
 P_b : \text{Tensão de flexão} \\
 P_m : \text{Tensão de membrana} \\
 S_y : \text{Limite de escoamento}
 \end{array}
 \quad (1)$$

Para o caso estudado, tem-se os seguintes critérios, de acordo com a Equação 2:

$$\begin{array}{l}
 P_m \leq 200.265 \text{ MPa} \\
 P_m + P_b \leq 300.398 \text{ MPa}
 \end{array}
 \quad (2)$$

O caminho no qual foi aplicado o método de linearização de tensão foi criado na região mais crítica, na direção do vetor gradiente com menor norma (FIGURA 18).

Figura 18 - Linearização de Tensão



Os critérios de tensões de membrana e membrana + flexão foram avaliados no decorrer da análise e constatou-se que o critério de membrana + flexão foi atingido primeiro, no *timestep* 1,883 s. Como a pressão foi aplicada de forma linear, pode-se realizar uma interpolação entre os valores aplicados na análise e constatar que o critério de tensão de membrana + flexão foi atingido para o valor de pressão de 0,883 MPa. A (TABELA 6) apresenta os valores de tensão nesse *substep*.

Tabela 6 – Valores de tensão na *substep*

| tempo (s) | Membrana (Mpa) | Membrana + Flexão (Mpa) |
|-----------|----------------|-------------------------|
| 1,883 | 192,87 | 300,18 |

Portanto, baseando-se nas normas mencionadas no decorrer das análises e nas premissas evidenciadas na segunda seção conclui-se que a pressão limite de projeto para esse vaso separador/ evaporador é de 0,883 MPa.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou resultados satisfatórios, pois ao observar-se os dados do Vaso Evaporador/ Separador, dados de Operação e Projeto, fica evidente que o equipamento é seguro e atende os requisitos elaborados na fase de projeto. Desta forma, o projeto mostrou-se extremamente relevante, uma vez que além dos cálculos elaborados para a construção do vaso de pressão, foi possível garantir, através de simulações de elementos finitos, que o reservatório é seguro e atende às normas técnicas vigentes, estando de acordo assim, os requisitos elaborados na fase de projeto.

Nesse contexto, devido aos avanços nos programas computadorizados que têm como finalidade realizar análises de tensões por elementos finitos, observa-se que não há limitações quanto às relações geométricas. Ainda é

importante ressaltar que a redução de preço dos programas de computador para análise de tensões por elementos finitos e o aumento da capacidade de processamento dos computadores pessoais viabiliza a adoção do método de elementos finitos para todos os casos e possibilita maior flexibilidade no dimensionamento de bocais de vasos de pressão e de toda a sua estrutura, de forma a proporcionar equipamentos mais seguros, ganhos na redução de custos e proporciona a indústria de Caldeiraria Industrial uma maior competitividade em um mercado tão desafiador.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Programa de Pesquisa Produtividade da Universidade Estácio de Sá, ao CNPQ pelo auxílio e a Empresa Power Systems pelo apoio nos estudos deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, R. B. Introduction to Finite Element Analysis. ME 273 Lecture Notes. San José State University, San José, Califórnia, USA, 2013.

ASME. Rules for Construction of Pressure Vessels, ed., vol. Section VIII Division 1, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2019.

ASME. Rules for Construction of Pressure Vessels, ed., vol. Section VIII Division 2, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2019.

ASME. Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications A-240/SA-240M, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Materials, 2017.

AZEVEDO, A. F. M. Método de Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003.

NR 13 – Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálico de Armazenamento, D.O.U, 2019.

TELLES, SILVA. Vasos de Pressão, 2ª ed. Rio de Janeiro: TLC, 2007, p. 6-11.