



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DIEGO PETER LUNA

**IMPLEMENTAÇÃO DE APLICATIVO PARA
DETERMINAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO
SEGUNDO A ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO I E
ANÁLISE COMPARATIVA**

Recife

2023

DIEGO PETER LUNA

**IMPLEMENTAÇÃO DE APLICATIVO PARA
DETERMINAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO SEGUNDO
A ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO I E ANÁLISE
COMPARATIVA**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador(a): ADSON BESERRA DA SILVA

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Luna, Diego Peter.

Implementação de aplicativo para determinação de vasos de pressão segundo a ASME seção VIII divisão I e análise comparativa / Diego Peter Luna. - Recife, 2023.

67 : il., tab.

Orientador(a): Adson Beserra da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. ASME. 2. Programação em Python. 3. Método dos Elementos Finitos. 4. Vasos de pressão. I. Silva, Adson Beserra da. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Diego Peter Luna

**IMPLEMENTAÇÃO DE APLICATIVO PARA DETERMINAÇÃO DE VASOS DE
PRESSÃO SEGUNDO A ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO I E ANÁLISE
COMPARATIVA**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 05/05/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adson Beserra da Silva (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Francisco Espedito de Lima (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial aos meus pais, pelo amor, incentivo e pela oportunidade de me dedicar aos estudos.

A meu orientador, Prof. Me. Adson Beserra da Silva, pela grande paciência, dedicação e pelos valiosos conselhos e sugestões, que foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, pela formação acadêmica e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso.

Aos meus amigos e colegas de turma, agradeço pela convivência e pelo apoio mútuo durante todo o período do curso.

*“A persistência é o caminho do êxito.”
(Autor: Charles Chaplin)*

RESUMO

Este trabalho apresenta o processo de elaboração de um projeto de vaso de pressão de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma ASME. Além disso abordamos o desenvolvimento de um programa utilizando a linguagem de programação Python, com o objetivo de automatizar o cálculo de parâmetros do projeto. Efetuou-se também uma análise comparativa dos parâmetros calculados analiticamente e daqueles determinados pelo aplicativo. Por fim, utilizamos o método dos elementos finitos para efetuar simulações com o propósito de validar o projeto do vaso determinado.

Palavras-chaves: ASME, Programação em Python, Método dos Elementos Finitos, Vaso de Pressão.

ABSTRACT

This paper presents the process of developing a pressure vessel design according to the parameters established by the ASME standard. Additionally, we discuss the development of a program using the Python programming language to automate the calculation of project parameters. We also conducted a comparative analysis of the parameters calculated analytically and those determined by the application. Finally, we used the finite element method to perform simulations with the purpose of validating the determined vessel design.

Keywords: ASME, Python, Finite Element Method, Pressure Vessel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos variados de vasos de pressão	21
Figura 2 – Tela principal do VSCode	23
Figura 3 – Tela principal do Octave	23
Figura 4 – Simulação de produto realizada com base em análise de elementos finitos	24
Figura 5 – Fluxograma do processo	25
Figura 6 – Esquemático do vaso	26
Figura 7 – Tabela 1A da norma ASME Seção II	27
Figura 8 – Tabela 1A da norma ASME Seção II	28
Figura 9 – Tabela 1A da norma ASME Seção II	28
Figura 10 – Tabela de valores de coeficientes para diferentes condições de suporte	30
Figura 11 – Esboço de um vaso de pressão com suportes	31
Figura 12 – Gráfico da constante K1	31
Figura 13 – Esquemático de uma abertura reforçada	34
Figura 14 – Exemplo de tabela de banco de dados	36
Figura 15 – Aba esquerda do ANSYS Mechanical mostrando as condições de simulação, e tipos de resultados obtidos	37
Figura 16 – Janela do banco de dados de materiais	39
Figura 17 – Janela do banco de dados de fluidos	39
Figura 18 – Aplicativo com os campos preenchidos	40
Figura 19 – Aplicativo com as espessuras calculadas	41
Figura 20 – Seção de dados de entrada do relatório do vaso	42
Figura 21 – Seção de dados calculados do relatório do vaso	42
Figura 22 – Seção de folha de cálculo do relatório do vaso	43
Figura 23 – Janela de banco de dados de resultados	43
Figura 24 – Vista frontal do vaso	47
Figura 25 – Vista isométrica do vaso	48
Figura 26 – Vista fronta da malha do vaso	48
Figura 27 – Transição entre costado e tampo	49
Figura 28 – Valores de tensões máximos e mínimos encontrados no vaso	50
Figura 29 – Tensões no vaso	50
Figura 30 – Tensões nos concentradores de tensão	51
Figura 31 – Concentradores de tensão na boca de visita e entrada principal	51
Figura 32 – Concentrador de tensão na saída alta	52
Figura 33 – Concentrador de tensão na saída baixa	52
Figura 34 – Concentrador de tensão no poço de dreno	52
Figura 35 – Tensões no apoio de suporte	53

Figura 36 – Tensões na região de conexão do tampo com o costado	53
Figura 37 – Código de determinação da sobreespessura de corrosão	64
Figura 38 – Código de determinação da espessura mínima do Casco	64
Figura 39 – Código de determinação da espessura mínima dos tampo	65
Figura 40 – Código de determinação do peso Q suportado por um apoio	66
Figura 41 – Código da análise de Zick	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de projeto para este trabalho.	26
Tabela 2 – Valores determinados manualmente.	38
Tabela 3 – Análise comparativa dos resultados.	44
Tabela 4 – Aberturas no vaso.	45
Tabela 5 – Condições de contorno.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code
CAD	Computer Aided Design
MEF	Método dos Elementos Finitos
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Metade do ângulo do cone	°
A	Distância da sela até a linha tangente	mm
A_r	Área requerida	mm ²
A_1	Área de excesso de espessura na parede do vaso	mm ²
A_2	Área disponível na projeção externa da abertura	mm ²
A_3	Área disponível na projeção interna da abertura	mm ²
A_5	Área de material adicionado como reforço	mm ²
b	Largura da sela	mm
C_a	Sobre-espessura de corrosão	mm
D	Diâmetro interno	mm
D_i	Diâmetro interno da parte cônica do tampo toro-cônico	mm
D_p	Diâmetro externo do elemento de reforço	mm
d	diâmetro da abertura	mm
E	Eficiência de junta	
F	Fator de correção	
f_{r1}	Fator de redução de força	
f_{r2}	Fator de redução de força	
f_{r4}	Fator de redução de força	
h	Distância da abertura além da superfície interna do vaso	mm
K_1	Constante de momento fletor longitudinal	
K_2	Constante de tensão de cisalhamento tangencial	
K_3	Constante de tensão circunferencial no suporte	
K_4	Constante de tensão adicional no tampo	
L	Comprimento entre tangentes	mm

L_c	Raio interno de coroa	mm
Q	Peso suportado por um suporte	N
R	Raio interno	mm
r	Raio interno de junta	mm
S_{adm}	Tensão admissível	MPa
S_1	Tensão longitudinal máxima	MPa
S_2	Tensão tangencial máxima de cisalhamento	MPa
S_3	Tensão circunferencial máxima combinada	MPa
S_4	Tensão máxima adicional no tampo	MPa
S_5	Tensão causada pela pressão interna	MPa
t	Espessura	mm
T_d	Temperatura de projeto	$^{\circ}C$
t_i	Espessura nominal da projeção interna da abertura	mm
t_n	Espessura da parede da abertura	mm
t_r	Espessura mínima do costado	mm
t_{rn}	Espessura mínima da parede da abertura	mm
t_s	Espessura mínima de tampo após conformação	mm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Vasos de Pressão	21
3.2	Normas	22
3.2.1	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)</i>	22
3.2.2	<i>American Society of Mechanical Engineers (ASME)</i>	22
3.3	Aplicativo	22
3.3.1	<i>Linguagem de Programação</i>	23
3.3.1.1	<i>Python</i>	23
3.4	Análise computacional	24
3.4.1	<i>Simulação pelo Método dos Elementos Finitos</i>	24
4	METODOLOGIA	25
4.1	Determinação do Vaso	26
4.1.1	<i>Determinação de material</i>	27
4.1.2	<i>Determinação de elementos do vaso</i>	28
4.1.2.1	<i>Costado ou Casco</i>	28
4.1.2.1.1	<i>Casco cilíndrico</i>	28
4.1.2.1.2	<i>Casco esférico</i>	29
4.1.2.2	<i>Tampos</i>	29
4.1.2.2.1	<i>Tampo elipsoidal com $t_s/L_c \geq 0,002$</i>	29
4.1.2.2.2	<i>Tampo Toro-esférico</i>	29
4.1.2.2.3	<i>Tampo Hemisférico</i>	29
4.1.2.2.4	<i>Tampo Cônico</i>	30
4.1.2.2.5	<i>Tampo Toro-cônico</i>	30
4.1.2.3	<i>Determinação dos suportes</i>	30
4.1.2.4	<i>Determinação de aberturas</i>	33
4.2	Desenvolvimento do aplicativo	35
4.3	Validação dos resultados	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Valores determinados analiticamente	38
5.2	Valores determinados pelo software	38
5.3	Análise comparativa	44

5.4	Cálculo das aberturas	44
5.4.1	<i>Boca de Visita</i>	44
5.4.2	<i>Saída de vapor alta e saída de líquido baixa</i>	46
5.4.3	<i>Entrada principal</i>	46
5.4.4	<i>Poço de dreno</i>	46
5.4.4.1	<i>Espessura do poço</i>	46
5.4.4.1.1	Tensão Circunferencial	46
5.4.4.1.2	Tensão Longitudinal	46
5.4.4.2	<i>Espessura do tampo do poço</i>	47
5.5	Validação pelo método dos elementos finitos	47
5.5.1	<i>Modelo do Vaso</i>	47
5.5.2	<i>Malha</i>	48
5.5.3	<i>Condições de contorno</i>	49
5.5.4	<i>Análise pelo MEF</i>	49
6	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	APÊNDICES	59
	APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO VASO	60
A.1	Costado ou Casco	60
A.1.1	<i>Casco Cilíndrico</i>	60
A.1.1.1	<i>Tensão Circunferencial</i>	60
A.1.1.2	<i>Tensão Longitudinal</i>	60
A.2	Tampos	61
A.2.1	<i>Tampo Elipsoidal com $t_s/L \geq 0,002$</i>	61
A.3	Suportes	61
A.3.1	<i>Tensão longitudinal máxima devido à flexão</i>	62
A.3.2	<i>Tensão tangencial máxima de cisalhamento</i>	62
A.3.3	<i>Tensão circunferencial máxima combinada</i>	63
A.3.4	<i>Tensão adicional nos tampos</i>	63
	APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DOS CÁLCULOS DOS PARÂMETROS PELO APLICATIVO	64

1 INTRODUÇÃO

Um vaso de pressão pode ser definido como equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa (NR-13, 2020). O vaso de pressão é um equipamento amplamente utilizado em plantas industriais para diversas finalidades, sendo uma das mais frequentes o armazenamento de fluidos sob pressão, que pode ser superior ou inferior à pressão atmosférica.

A elaboração do projeto de um vaso de pressão requer a seleção das geometrias dos componentes que serão associados a ele. Esse processo vai desde selecionar o tipo de vaso, baseado em sua geometria, como também a escolha de materiais, definições das aberturas que estarão no vaso, a determinação das espessuras das paredes do vaso e a determinação dos apoios que suportam o vaso, levando em consideração os requisitos de segurança e as normas aplicáveis ao projeto.

A determinação de vasos de pressão é uma tarefa que pode ser um tanto quanto repetitiva, e uma das soluções mais comuns para tarefas que possam ser consideradas repetitivas, é a automação dos cálculos realizados, seja por meio de planilhas ou por meio de aplicativos.

O desenvolvimento de um aplicativo envolve a construção do código-fonte, com diversas funções para calcular elementos específicos do vaso, e o uso de ferramentas para construção da interface gráfica.

Além da automação dos cálculos e da construção do aplicativo, uma importante etapa no projeto de vasos de pressão é a validação do projeto do vaso por da análise de tensões a partir de simulações. A simulação permite avaliar o comportamento do vaso sob diferentes condições de operação, como a variação de pressão e temperatura, e identificar possíveis pontos críticos que possam comprometer a segurança do equipamento. Para isso, são utilizados softwares de análise como o ANSYS, que possibilita a modelagem e simulação do vaso em diferentes cenários, permitindo a identificação e correção de problemas antes mesmo da fabricação do equipamento.

Neste trabalho apresentaremos a determinação de um projeto de vaso através de um conjunto de etapas baseadas na linguagem *Python* e fundamentando as condições de projeto na norma ASME BPVC - Seção 8 divisão 1 (ASME, 2013b). Além disto, vamos apresentar uma simulação do modelo determinado usando o software de análise ANSYS, para validação da solução determinada.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver uma ferramenta útil para facilitar o cálculo de espessuras de vasos de pressão. O projeto de um vaso de pressão envolve muito trabalho por parte do engenheiro e ao criar uma ferramenta que calcule os valores de espessura, suporte e aberturas utilizando a norma ASME como referência, estaremos ajudando o engenheiro projetista a economizar tempo ao realizar o projeto.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Compreender e sumarizar as etapas para determinar as geometrias e espessuras dos vasos de pressão de acordo com a norma ASME.
- Desenvolver um projeto de vaso de pressão, segundo norma ASME
- Estabelecer as propriedades e recursos para o aplicativo.
- Analise comparativa com os resultados do aplicativo.
- Criar um modelo do vaso de pressão usando um aplicativo para análise.
- Validar o vaso por meio de simulação via MEF
- Apresentar um modelo de aplicativo para a determinação precisa da espessura de diversos componentes de um vaso de pressão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será apresentadas uma breve revisão da literatura científica com o objetivo de contextualizar o tema do trabalho e fornecer subsídios teóricos que embasem a pesquisa. Serão abordados os estudos e pesquisas relacionados ao assunto, permitindo uma compreensão mais ampla e aprofundada do tema em questão.

O projeto de vasos de pressão deve seguir normas e códigos estabelecidos, uma vez que um projeto feito de forma indevida pode comprometer a segurança de todos os funcionários que trabalham no local onde o vaso está instalado. Toudehdehghan e Hong (TOUDEHDEHGHAN; HONG, 2019) discorrem sobre a história dos vasos de pressão, as classificações existentes de vasos de pressão, suas aplicações, bem como as normas técnicas existentes que determinam os métodos utilizados para determinar os parâmetros dos vasos, em especial a norma ASME (ASME, 2013b). Eles também discorrem sobre as maneiras em que um vaso pode falhar e os principais parâmetros para o design de um vaso de pressão, bem como a importância de cada um deles.

A determinação de um vaso de pressão pode ser um processo complexo e demorado, devido à diversos fatores que influenciam no projeto. Segundo Silva (SILVA, 2015), em sua dissertação de mestrado discorre sobre todo o processo de determinação de parâmetros de um vaso de pressão, segundo a norma ASME, determinando dois projetos de vaso de pressão, um de baixa pressão e o outro de alta pressão, projetado segundo a Seção VIII Divisão 2 do código ASME (ASME, 2013b). Durante o processo ele determina as espessuras do costado e dos tampos, os reforços necessários para cada abertura no vaso, a determinação dos apoios do vaso segundo os critérios de Zick (ZICK, 1951) e, por fim realiza uma análise das tensões no vaso pelo método analítico comparando os resultados com os obtidos utilizando o MEF.

O artigo escrito por Zick (ZICK, 1951), aborda a teoria por trás das tensões geradas em grandes vasos de pressão cilíndricos horizontais que são suportados por duas selas. Ele apresenta uma análise detalhadas das tensões que surgem nesses vasos em decorrência das cargas e pressões internas. Além disso, ele também explora as considerações necessárias para projetar suportes de sela apropriados para esses vasos, de forma que a segurança e integridade estrutural estejam garantidos. Parmar *et al.* (PARMAR *et al.*, 2021), abordam todo o processo de design de suportes de sela para vasos de pressão horizontais cilíndricos e demonstram todo o processo analítico de avaliação desses suportes pelos critérios estipulados por Zick (ZICK, 1951).

Os autores Arunkumar *et al.* (ARUNKUMAR *et al.*,), demonstram todo o processo realizado para analisar um vaso pelo MEF, assim como os critérios utilizados para avaliar as tensões no vaso. Os autores realizam análises comparativas com diferentes tipos de tampos no vaso, diversas localizações de aberturas e com distâncias de sela diferentes, com a finalidade de achar um design óptimo para um determinado vaso de pressão.

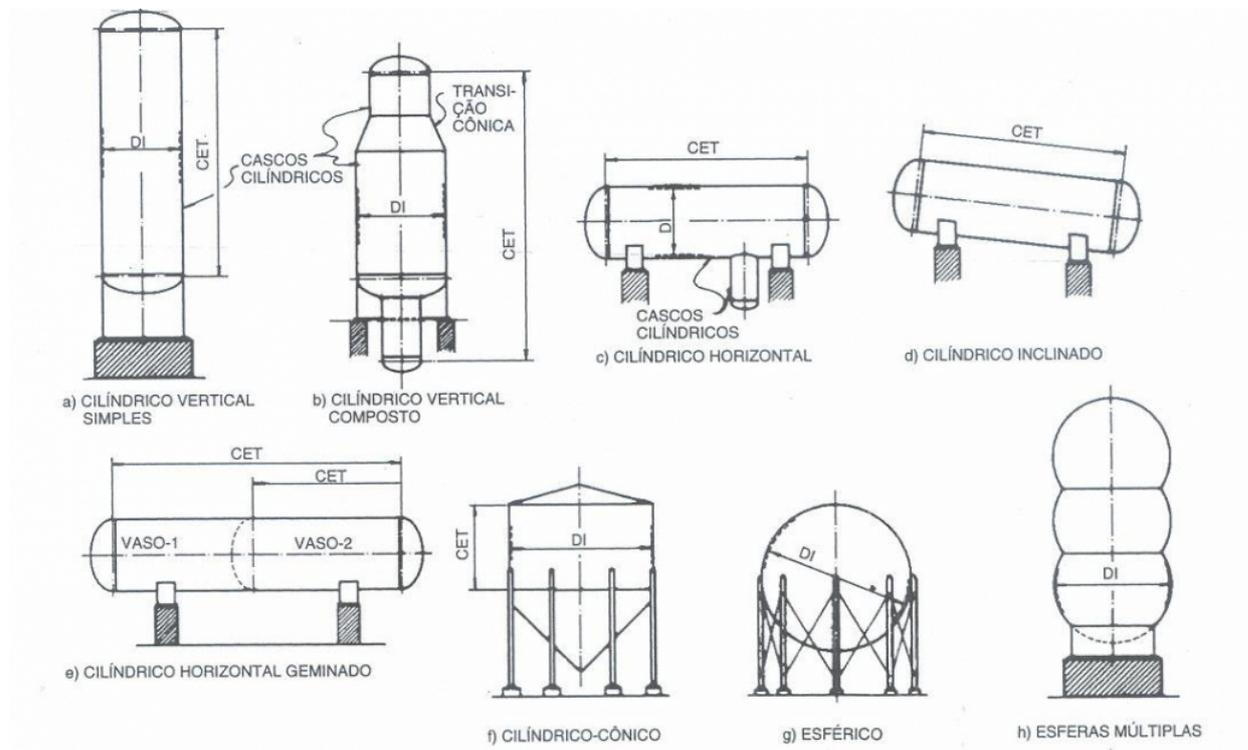
O desenvolvimento de um aplicativo é um processo complexo que requer um entendimento profundo do domínio do problema e das tecnologias envolvidas. Os autores Yuvaraj *et al.* (YUVARAJ *et al.*, 2020) apresentam uma descrição detalhada do processo de projetar e desenvolver uma aplicação para manter um banco de dados em um sistema de gerenciamento de inventário usando a plataforma Tkinter e SQLite. O artigo fornece informações valiosas sobre os desafios e considerações envolvidos no desenvolvimento de tal aplicação e serve como um guia útil para desenvolvedores que desejam criar aplicativos similares.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Vasos de Pressão

Vasos de Pressão são recipientes fechados que contêm qualquer tipo de fluido sob pressão, seja interna ou externa, os vasos podem assumir variadas formas geométricas de acordo com sua utilização, demonstrado na Figura 1, logo existem vasos cilíndricos, esféricos, cônicos, etc. A fabricação de vasos de pressão pode ser feita utilizando uma grande variedade de materiais, metálicos ou não metálicos. Entre estes materiais estão o aço carbono, alumínio, aço inoxidável, plásticos termorrígidos, entre outros. (TELLES, 1996).

Figura 1 – Tipos variados de vasos de pressão.



Fonte: (TELLES, 1996)

O dimensionamento de um vaso de pressão leva em conta diversos fatores, o engenheiro pode projetar o vaso sem seguir nenhuma norma, baseando-se apenas no conhecimento adquirido durante sua formação acadêmica. No entanto, somente isso não basta, o dimensionamento de vasos de pressão exige que o engenheiro siga as normas orientadas para este fim.

3.2 Normas

No livro Codex Madrid I, escrito por Leonardo da Vinci (VINCI, 1490-1499) em 1495, está a documentação mais antiga registrada de um projeto de vaso de pressão, mas o uso prático dos vasos para armazenar vapor pressurizado vindo de uma caldeira foi somente demonstrado no século XIX, século em que ocorreu a Revolução Industrial, que trouxe consigo um aumento significativo na demanda por energia e o desenvolvimento de novas tecnologias. As caldeiras a vapor foram amplamente utilizadas para gerar energia mecânica para acionar máquinas e motores. No entanto, após ocorrerem acidentes fatais devido à falta de conhecimento sobre o projeto, foi desenvolvido em 1915 um grupo de códigos de projeto que deu origem à primeira norma padronizada de vasos de pressão. Essa norma, conhecida por BPVC, foi incorporada na maior parte dos estados dos Estados Unidos.

3.2.1 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

A ABNT é um órgão cuja função é criar normas para diversos setores da sociedade. Ela é uma entidade privada e sem fins lucrativos cujo objetivo é padronizar cada processo reprodutível. A ABNT regula a construções de vasos de pressões na NBR 16035, onde na Parte 3 desta norma é normatizado a construção de vasos de pressão segundo o código ASME Seção VIII Divisão 1. (ABNT, 2022)

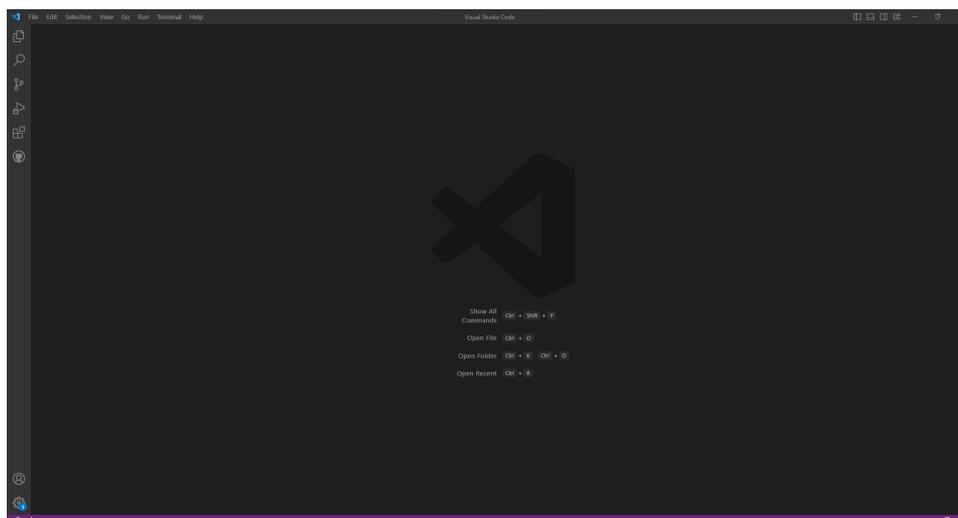
3.2.2 American Society of Mechanical Engineers (ASME)

A ASME é entidade privada e sem fins lucrativos formada por engenheiros, localizada nos Estados Unidos. De forma semelhante à ABNT ela cria normas, mas neste caso são normas específicas para equipamentos pressurizados, a norma utilizada neste trabalho será a norma ASME-BPVC, em específico a Divisão VIII desta norma, que trata de vasos de pressão.(ASME, 2013b)

3.3 Aplicativo

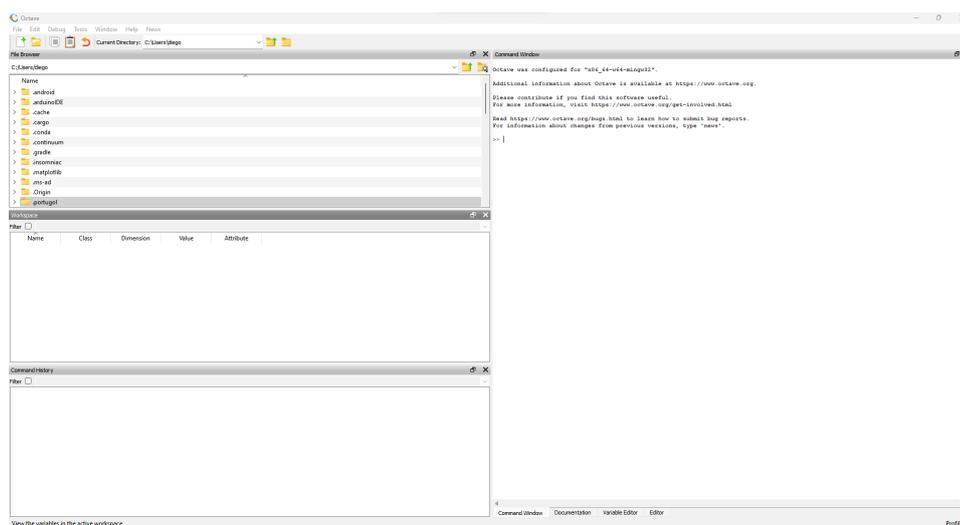
Um aplicativo é um programa de computador projetado para realizar tarefas específicas para o usuário, são projetados por meio de algoritmos e escritos numa linguagem de programação (STALLINGS, 2017). As Figuras 2 e 3 mostram exemplos de aplicativos.

Figura 2 – Tela principal do VSCode



Fonte: Captura da tela da aplicação no sistema operacional Windows 11

Figura 3 – Tela principal do Octave



Fonte: Captura da tela da aplicação no sistema operacional Windows 11

3.3.1 Linguagem de Programação

Linguagem de programação é uma linguagem formal utilizada para expressar algoritmos de forma que possam ser compreendidos e executados por computadores. Ela é composta por um conjunto de regras sintáticas e semânticas que definem sua estrutura e o significado dos seus elementos (SEBESTA, 2018). Um exemplo de linguagem de programação é a linguagem Python.

3.3.1.1 Python

Python é uma linguagem de programação de alto nível orientada a objetos, é uma linguagem de sintaxe simples, que permite uma fácil compreensão do código escrito

utilizando-a como linguagem. Ela possui uma grande variedade de bibliotecas que facilita o desenvolvimento de aplicativos.(DOWNEY, 2015)

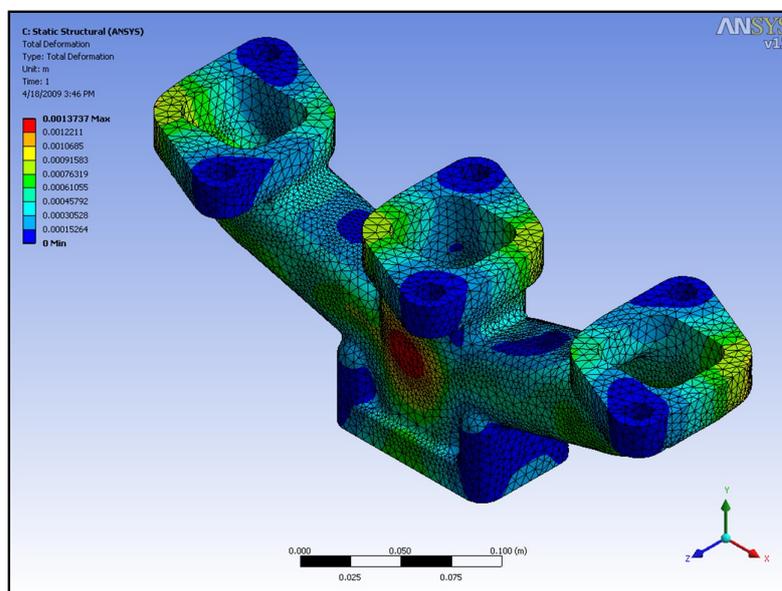
3.4 Análise computacional

A análise computacional é uma área da ciência que combina matemática, ciência da computação e tecnologia para desenvolver técnicas computacionais para resolver problemas complexos. A análise computacional envolve o uso de algoritmos e modelos matemáticos complexos para criar soluções computacionais eficientes.(HEATH, 2002)

3.4.1 Simulação pelo Método dos Elementos Finitos

A técnica de simulação por elementos finitos permite modelar o comportamento de estruturas complexas sob diferentes condições de carregamento, o que é fundamental para o projeto e análise de sistemas mecânicos. Segundo (REDDY, 2019), a discretização do domínio em elementos finitos permite uma análise numérica precisa e eficiente, levando a resultados confiáveis que podem ser validados por meio de ensaios experimentais. A Figura 4 apresenta um exemplo de uma simulação realizada pelo MEF.

Figura 4 – Simulação de produto realizada com base em análise de elementos finitos



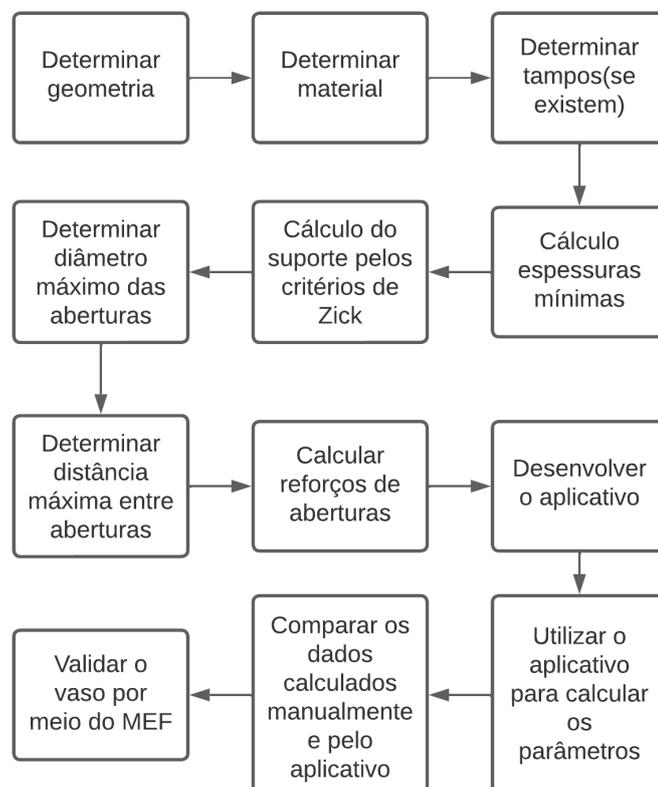
Fonte: (ESSS, 2016)

4 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo combinar as exigências normativas com as condições de programação, iniciando-se com a exposição da metodologia a ser adotada. A Figura 5 ilustra as etapas do método prescrito pela norma ASME para a determinação do vaso de pressão, além das etapas subsequentes de desenvolvimento de um aplicativo capaz de calcular parâmetros do vaso, realização de análise comparativa e validação por meio do Método dos Elementos Finitos.

A norma recomenda que se inicie com a determinação da geometria do vaso de pressão, depois realize a escolha o material em função das especificações de projeto. Em seguida calcule as tensões que o casco e os tampos estarão submetidos para que seja determinada a espessura deles, após esta etapa é necessário determinar o suporte do vaso e calcular sua viabilidade de acordo com os critérios de Zick, após a determinação dos suportes pode ser calculado os parâmetros para as aberturas no vaso, tendo cuidado para não entrar em conflito com o suporte.

Figura 5 – Fluxograma do processo.



Fonte: Elaborada pelo Autor

4.1 Determinação do Vaso

A determinação da geometria dos elementos do vaso é realizada em conformidade com a Norma ASME Seção VIII Divisão I. As formas mais comuns incluem modelos horizontais e cilíndricos, os quais podem variar de acordo com o tipo de aplicação. A Figura 1 mostra os tipos diversos de vaso que existem.

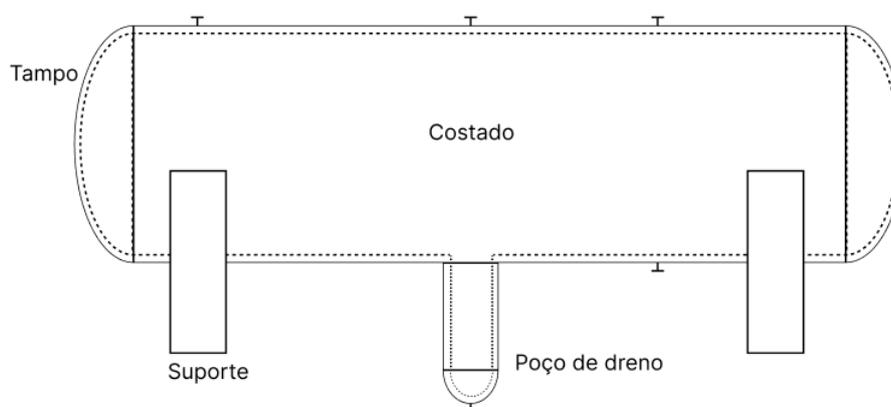
O vaso deste trabalho é um vaso separador com costado cilíndrico em posição horizontal, biapoiado com tampos ASME 2:1 elipsoidais, semi-cladeado com aço inox AISI 306L. As especificações de projeto estão definidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações de projeto para este trabalho.

Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Pressão de Projeto	P	10	MPa
Temperatura de projeto	T_d	150	°C
Díâmetro interno	D	2000	mm
Comprimento entre tangentes	L	6000	mm
Fluído de trabalho	-	<i>Hidrocarboneto + H₂O + H₂S</i>	-
Tempo de vida útil	-	15	anos
Material	-	Aço ASME SA515 Grau 60	-
Sobreespesura de corrosão	C_a	6	mm
Tensão Admissível	S_{adm}	118	Mpa

Assim exposto, pode-se definir que a geometria do vaso de pressão que projetou-se é a correspondente a Figura 6.

Figura 6 – Esquemático do vaso



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1.1 Determinação de material

A determinação de materiais do vaso é um processo importante para garantir a segurança e a confiabilidade do mesmo. A escolha desse material leva em conta diversos fatores como:

- Pressão de Operação
- Temperatura
- Ambiente de trabalho
- Presença de substâncias corrosivas

Os critérios e requisitos são estabelecidos pela norma ASME (ASME, 2013b) que contém diversas tabelas com propriedades de possíveis materiais em diferentes condições de operação. Aço carbono é o tipo de material comumente utilizado em vasos de pressão, neste trabalho o aço utilizado foi o aço ASME SA-515 Gr 60 devido a sua capacidade de operar em condições de altas pressões e temperaturas, além de possuir uma boa resistência a corrosão, os valores de tensão de escoamento deste vaso foi retirado da norma ASME (ASME, 2013a), como demonstrado nas Figuras 7, 8 e 9.

Figura 7 – Tabela 1A da norma ASME Seção II

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade
1	Carbon steel	Forgings	SA-765	I
2	Carbon steel	Plate	SA-515	60
3	Carbon steel	Plate	SA-516	60
4	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB60
5	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC60

Fonte: (ASME, 2013a)

Figura 8 – Tabela 1A da norma ASME Seção II

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa
1	415	205
2	415	220
3	415	220
4	415	220
5	415	220

Fonte: (ASME, 2013a)

Figura 9 – Tabela 1A da norma ASME Seção II

Line No.	Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding														
	40	65	100	125	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475
1	118	118	118	118	118	118	114	107	104	101	97.8	89.1	75.4	62.6	45.5
2	118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	88.9	75.3	62.7	45.5
3	118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	88.9	75.3	62.7	45.5
4	118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	...	...	...	...
5	118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	...	...	...	...

Fonte: (ASME, 2013a)

4.1.2 Determinação de elementos do vaso

A determinação geométrica dos elementos do vaso é feita de acordo com a norma ASME Seção VIII Divisão I. Que implica em seguir os seguintes passos.

4.1.2.1 Costado ou Casco

A determinação da espessura do costado deve seguir as seguintes fórmulas propostas pela norma ASME (ASME, 2013b).

4.1.2.1.1 Casco cilíndrico

- Tensão circunferencial:

Quando a espessura não exceder metade do raio interno, ou a pressão de projeto não exceder $0,38S_{adm}E$, aplica-se:

$$t = \frac{PR}{S_{adm}E - 0,6P}, \text{ ou, } P = \frac{S_{adm}Et}{R + 0,6t}. \tag{4.1}$$

- Tensão longitudinal:

Quando a espessura não exceder metade do raio interno, ou a pressão de projeto não exceder $1,25S_{adm}E$, aplica-se:

$$t = \frac{PR}{2S_{adm}E + 0,4P}, \text{ ou, } P = \frac{2S_{adm}Et}{R - 0,4t}. \quad (4.2)$$

Logo, a espessura mínima para o casco será o maior valor encontrado.

4.1.2.1.2 Casco esférico

Quando a espessura não exceder $0,356R$, ou a pressão de projeto não exceder $0,665S_{adm}E$, aplica-se:

$$t = \frac{PR}{2S_{adm}E - 0,2P}, \text{ ou, } P = \frac{2S_{adm}Et}{R + 0,2t} \quad (4.3)$$

4.1.2.2 Tampos

A determinação da espessura dos tampos deve seguir as seguintes fórmulas propostas pela norma ASME (ASME, 2013b).

4.1.2.2.1 Tampo elipsoidal com $t_s/L_c \geq 0,002$

A espessura requerida para este tipo de tampo para quando a metade do menor eixo é igual a um quarto do diâmetro interno do costado, aplica-se:

$$t = \frac{PD}{2S_{adm}E - 0,2P}, \text{ ou, } P = \frac{2S_{adm}Et}{D + 0,2t}. \quad (4.4)$$

Uma aproximação aceitável de um tampo elipsoidal 2:1 é quando toma-se o raio de junta de $0,17D$ e o raio de coroa $0,90D$.

4.1.2.2.2 Tampo Toro-esférico

$$t = \frac{0,885PL_c}{S_{adm}E - 0,1P} \quad (4.5)$$

4.1.2.2.3 Tampo Hemisférico

$$t = \frac{PL_c}{2S_{adm}E - 0,2P} \quad (4.6)$$

4.1.2.2.4 Tampo Cônico

$$t = \frac{PD}{2 \cos \alpha (S_{adm}E - 0.6P)} \tag{4.7}$$

4.1.2.2.5 Tampo Toro-cônico

$$D_i = D - 2r(1 - \cos \alpha) \tag{4.8}$$

$$t = \frac{PD_i}{2 \cos \alpha (S_{adm}E - 0.6P)} \tag{4.9}$$

$$L_c = \frac{D_i}{2 \cos \alpha} \tag{4.10}$$

4.1.2.3 Determinação dos suportes

Para determinar as propriedades do suporte de um vaso cilíndrico horizontal bi-apoiado, deve-se utilizar os critérios estabelecidos por Zick(ZICK, 1951).

Figura 10 – Tabela de valores de coeficientes para diferentes condições de suporte.

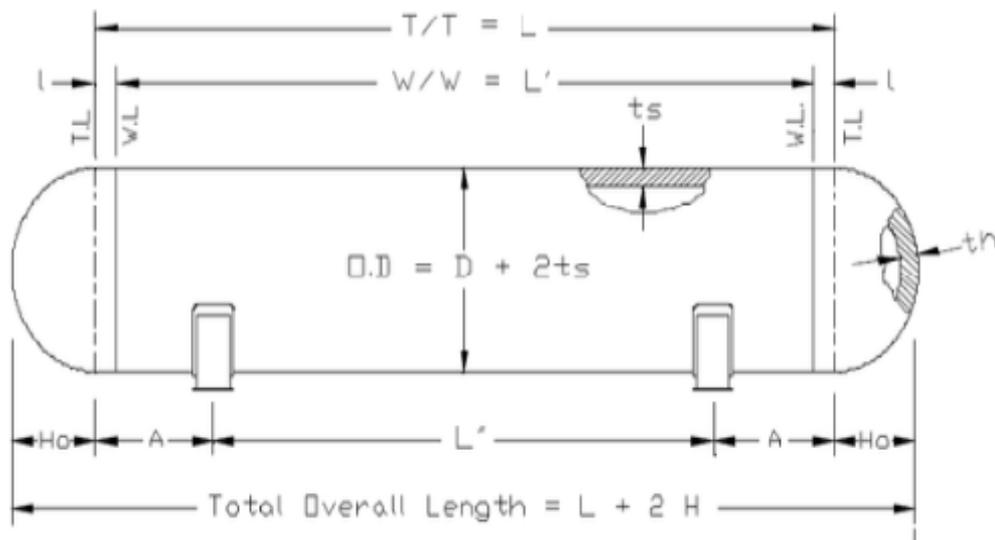
Table I—Values of Coefficients in Formulas for Various Support Conditions								
Saddle angle, θ	Maximum long. bending stress, Min. K_1 *	Tangent. shear, K_2 †	Circumf. stress top of saddle, K_3 †	Additional head stress, K_4	Ring compres. in shell, K_5	Ring stiffeners—Circumf. bending, K_6	Direct stress, K_7	Tension across saddle, K_8
Shell unstiffened								
120°	0.63 ($A/L = 0.09$)	1.171	0.0528	...	0.760	...	...	0.204
150°	0.55 ($A/L = 0.11$)	0.799	0.0316	...	0.673	...	...	0.260
Shell stiffened by head, $A \leq R/2$								
120°	1.0 ($A/L = 0$)	0.880	0.0132	0.401	0.760	...	...	0.204
150°	1.0 ($A/L = 0$)	0.485	0.0079	0.297	0.673	...	...	0.260
Shell stiffened by ring in plane of Saddle								
120°	0.23 ($A/L = 0.193$)	0.319	...	...	...	0.0528	0.340	0.204
150°	0.23 ($A/L = 0.193$)	0.319	...	...	...	0.0316	0.303	0.260
Shell stiffened by rings adjacent to saddle								
120°	0.23 ($A/L = 0.193$)	1.171	0.0132	...	0.760	0.0577	0.263	0.204
150°	0.23 ($A/L = 0.193$)	0.799	0.0079	...	0.673	0.0353	0.228	0.260

* See Fig. 5, which plots K_1 against A/L , for values of K_1 corresponding to values of A/L not listed in table.
 † See Fig. 7.

Fonte: (ZICK, 1951)

A tabela explicitada na Figura 10 mostra as diversas condições de suportes e os valores dos coeficientes, utilizados no cálculo, que são associados a cada caso. O caso explicitado neste trabalho é a do vaso de pressão com casco reforçado pelos tampos.

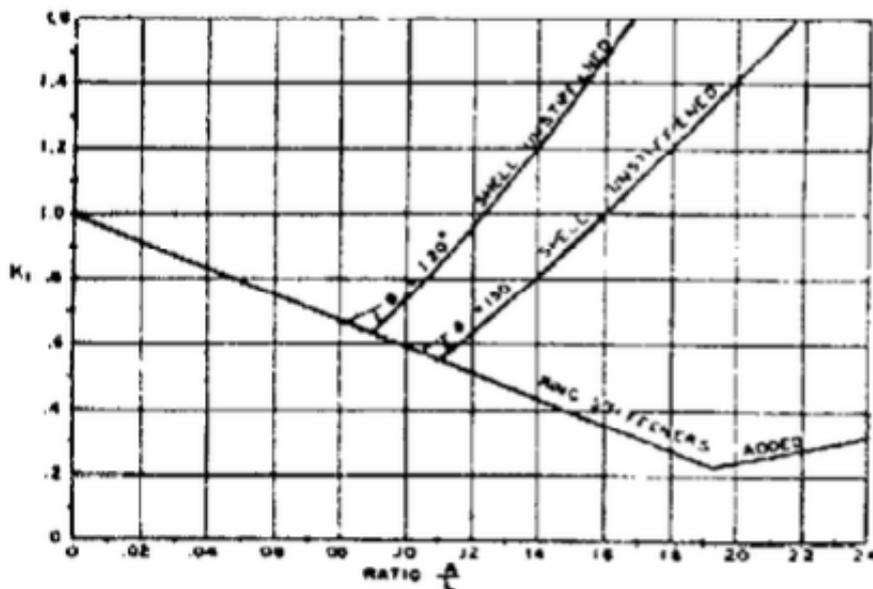
Figura 11 – Esboço de um vaso de pressão com suportes.



Fonte: (PARMAR *et al.*, 2021)

A Figura 11 mostra um esboço de vaso de pressão, explicitando que A é a distância do suporte até a linha tangente.

Figura 12 – Gráfico da constante K1.



Fonte: (ZICK, 1951)

Zick determina que a constante K_1 varia com a razão $\frac{A}{L}$, onde o valor máximo de K_1 é atingido quando a distância A é zero, como explicitado pela Figura 12. E a tensão

longitudinal máxima devido à flexão é dada por:

$$S_1 = \pm \frac{3K_1QL}{\pi r^2 t} \quad (4.11)$$

Onde S_1 não pode exceder ES_{adm} .

A tensão tangencial máxima de cisalhamento é definida pela fórmula:

$$S_2 = \frac{K_2Q}{rt} \quad (4.12)$$

Essa fórmula é utilizada para o costado e para os tampos. Esta tensão não pode ultrapassar 80% da tensão admissível do material.

A tensão circunferencial máxima combinada é determinada por:

Se $L \geq 8R$:

$$S_3 = -\frac{Q}{4t(b+10t)} - \frac{3K_3Q}{2t^2} \quad (4.13)$$

Caso contrário:

$$S_3 = -\frac{Q}{4t(b+10t)} - \frac{12K_3QR}{Lt^2} \quad (4.14)$$

Onde S_3 não pode ultrapassar 150% da tensão admissível do material.

A tensão máxima adicional no tampo é determinada por:

$$S_4 = \frac{K_4Q}{rt} \quad (4.15)$$

E a tensão causada pela pressão interna do vaso é:

$$S_5 = \frac{Pr}{Et} \quad (4.16)$$

Zick determina que a soma de S_4 e S_5 não pode ultrapassar 125% da tensão admissível do material.

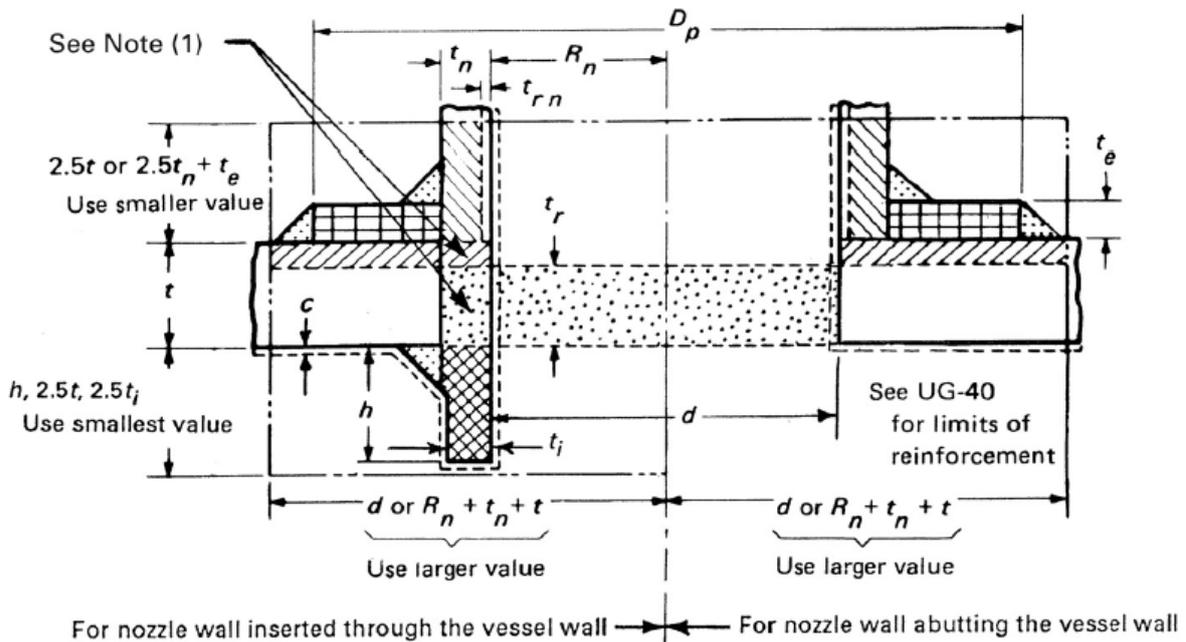
4.1.2.4 Determinação de aberturas

Segundo a norma ASME para todos os vasos cujo diâmetro interno sejam maiores que 1520 milímetros(ou 60 polegadas), o diâmetro máximo das aberturas devem ser iguais a 1/3 do diâmetro do vaso, desde que não exceda 1020 milímetros(ou 20 polegadas). No caso de vasos cilíndricos, as aberturas devem ser circulares, elípticas ou ovais.

Aberturas que satisfazem os seguintes requisitos, não precisam de reforço:

- Aberturas soldadas que não ultrapassem 89 mm de diâmetro em vasos com espessura mínima de 10 mm ou menos ou que não ultrapassem 60 mm de diâmetro em vasos com pelo menos 10 mm de espessura mínima.
- Aberturas rosqueadas em que o furo no vaso não seja maior que 60 mm de diâmetro.
- Duas aberturas que estejam de acordo com os 2 primeiros itens devem ter a distância entre seus centros de pelo menos a soma de seus diâmetros.
- Duas aberturas que estejam de acordo com os 2 primeiros itens, em um conjunto com 3 ou mais aberturas não reforçadas, devem ter a distância entre seus centros de pelo menos: $1 + 1.5\cos\theta(d_1 + d_2)$. Onde θ é o ângulo da linha que conecta os centros das aberturas e o eixo longitudinal do vaso.

Figura 13 – Esquemático de uma abertura reforçada



Fonte: (ASME, 2013b)

No momento que em se fura o vaso com a finalidade de realizar uma abertura, material é retirado do vaso, fragilizando o mesmo. A norma ASME (ASME, 2013b) estipula um método de compensação de área para que seja possível reforçar essa abertura de maneira adequada. A Figura 13 demonstra o esquema da seção de uma abertura reforçada.

Primeiramente é necessário calcular a área de material retirado:

$$A_r = dt_r F + 2t_n t_r F(1 - f_{r1}) \quad (4.17)$$

Após a determinação da área de material retirado, é necessário calcular a área A_1 , de acordo com as fórmulas:

$$A_1 = d(t - Ft_r) - 2t_n(t - Ft_r)(1 - f_{r1}) \quad (4.18)$$

$$A_1 = 2(t + t_n)(t - t_r) - 2t_n(t - Ft_r)(1 - f_{r1}) \quad (4.19)$$

O valor de A_1 , será o maior valor encontrado. O próximo passo é calcular a área disponível na abertura se projetando para fora:

$$A_2 = 5(t_n - t_{rn})f_{r2}t \quad (4.20)$$

$$A_2 = 5(t_n - t_{rn})f_{r2}t_n \quad (4.21)$$

A norma dita que o menor valor é considerado. Devemos agora calcular A_3 de acordo com a seguinte fórmula:

$$A_3 = 5tt_i f_{r2} \quad (4.22)$$

$$A_3 = 5t_i t_i f_{r2} \quad (4.23)$$

$$A_3 = 5ht_i f_{r2} \quad (4.24)$$

A norma dita que o menor valor deve ser considerado. Por fim, é determinado que se $A_1 + A_2 + A_3 \geq A_r$, não é necessário reforço na abertura. Caso seja necessário reforço, deve aplicar uma área de reforço A_5 onde:

$$A_5 = (D_p - d - 2t_n)t_e f_{r4} \geq A_r - A_1 - A_2 - A_3 \quad (4.25)$$

4.2 Desenvolvimento do aplicativo

Para este projeto está foi desenvolvido uma codificação em Python com o objetivo de auxiliar nos cálculos dos parâmetros de um vaso de pressão. O programa conta com uma interface gráfica de usuário, utilizando a biblioteca Tkinter, e com banco de dados para armazenamento de propriedades de materiais e de resultados dos projetos já calculados, utilizando a biblioteca sqlite3, conta também com uma função de gerar relatórios em PDF. Para resolver nosso problema foi necessário seguir os seguintes passos:

- Escrever interface gráfica para inserir dados, um exemplo de interface gráfica está demonstrado na Figura 2

- Criar banco de dados para salvar dados de materiais, fluidos e resultados de cálculos. Na Figura 14 está demonstrado um exemplo de tabela de banco de dados
- Escrever interface para inserir dados dos materiais
- Escrever interface para inserir dados dos fluidos
- Escrever interface para ver o histórico de resultados
- Capturar essas informações e fazer uma checagem se estas estão no formato correto
- Realizar os devidos cálculos com esses dados
- Retornar informações pertinentes ao usuário

Figura 14 – Exemplo de tabela de banco de dados

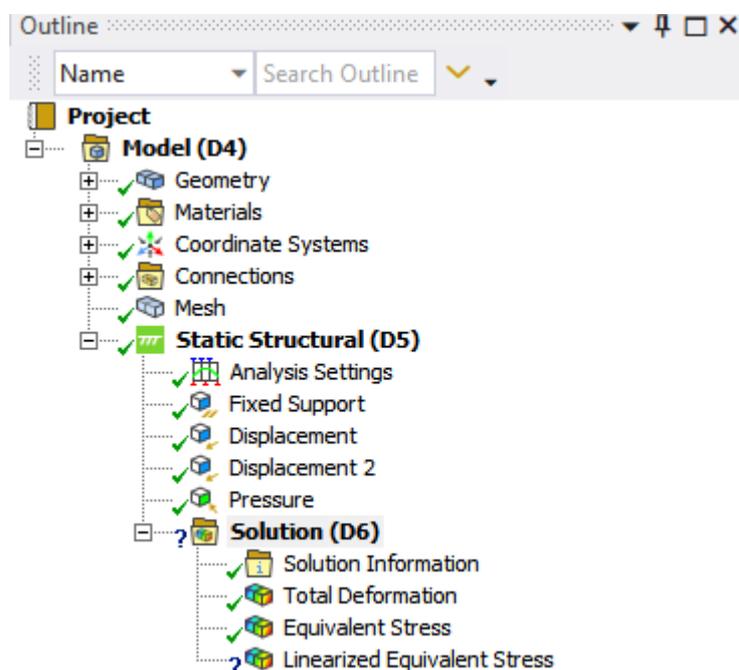
	DT_GERACAO	HH_GERACAO	ANO_ELEICAO	TIPO_ELEICAO	TIPO_ELEICAO	NR_TURNO	CD_ELEICAO	DS_ELEICAO	DT_ELEICAO	ABRANGENCIA
1	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
2	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
3	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
4	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
5	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
6	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
7	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
8	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
9	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
10	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
11	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
12	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
13	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
14	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
15	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
16	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
17	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
18	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
19	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
20	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
21	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL
22	19/04/2020	19:09:34	2018	2	ELEIÇÃO OR...	1	297	Eleições Gera...	07/10/2018	ESTADUAL

Fonte: (Escola de Dados, 2020)

4.3 Validação dos resultados

Para validar o aplicativo, foi selecionado um projeto de vaso de pressão de acordo com a norma ASME. Os resultados obtidos pelo aplicativo foram comparados com os dados calculados manualmente. Após realizar essa comparação, o próximo passo para realizar a validar o projeto consiste em realizar uma simulação do vaso pelo MEF utilizando o ANSYS.

Figura 15 – Aba esquerda do ANSYS Mechanical mostrando as condições de simulação, e tipos de resultados obtidos



Fonte: Elaborado pelo Autor

A simulação consistiu em criar o modelo CAD do vaso e gerar uma malha desse modelo, após gerar essa malha é definido a tensão admissível do material utilizado e as forças em que o vaso está submetido. A simulação retorna as tensões em que o vaso está submetido e as deformações que ocorrem nele devido às tensões. A Figura 15 mostra as condições de contorno e os tipos de resultados obtidos pela simulação.

A validação por meio de simulação consistiu em avaliar as tensões e deformações do vaso, e comparar com as limitações do material utilizado.

A metodologia utilizada nesse trabalho permitiu validar os resultados calculados pelo aplicativo. Logo foi possível determinar que o aplicativo consegue ser utilizado para otimizar o projeto de vasos de pressão calculados de acordo a norma ASME.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos através da aplicação da norma ASME (ASME, 2013b), incluindo os dados analíticos e os obtidos através do aplicativo desenvolvido. Faremos uma análise comparativa dos parâmetros calculados e, por fim, apresentaremos os resultados da simulação pelo MEF com a finalidade de validar o projeto.

5.1 Valores determinados analiticamente

Todos os valores calculados de forma analítica estão apresentados na Tabela 2. Não será fornecido nesta seção o passo a passo de como cada valor foi calculado, pois essas informações estão disponíveis no Apêndice A.

Tabela 2 – Valores determinados manualmente.

Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura do costado	t	95.286	mm
Espessura do tampo	t_s	91.470	mm
Tensão longitudinal máxima de flexão	S_1	13.184	MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento no casco	S_2	1.115	MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento no tampo	S_2	1.162	MPa
Tensão circunferencial máxima combinada	S_3	-0.861	MPa
Tensão adicional no tampo	S_4	0.712	MPa
Tensão causada pela pressão interna	S_5	52.474	MPa

5.2 Valores determinados pelo software

Nesta seção estão apresentados os valores dos parâmetros calculados pelo aplicativo. O código-fonte dos cálculos efetuados está disponível no Apêndice B.

Os cálculos dos valores por meio do aplicativo se deu inicialmente por preencher o banco de dados de materiais. A Figura 16 demonstra a tela de banco de dados de materiais onde é possível adicionar um nome para este material, sua tensão admissível e sua densidade. Nesta tela também é possível remover um material do banco de dados ao preencher o campo de ID e clicar no botão de remover material.

Como neste trabalho estamos utilizando o Aço ASME SA-515 Grau 60 com uma temperatura de trabalho de 150°C, este foi o material que foi inserido no banco de dados.

Figura 16 – Janela do banco de dados de materiais

Nome	Tensão Admissível(MPa)	Densidade(kg/m3)	ID
SA-515 Grade 60 -150C	118.0	7800.0	2

Fonte: Elaborado pelo Autor

O próximo passo é preencher o banco de dados de fluidos na janela da Figura 17 semelhante à Figura 16, mas com valores específicos para os fluidos usados que serão utilizados. O tipo de fluido é utilizado para determinar o cálculo da sobre espessura de corrosão, se esta não for determinada, como mostra a Figura 18.

Como neste trabalho estamos utilizando água como fluido de trabalho, este foi o fluido inserido no banco de dados.

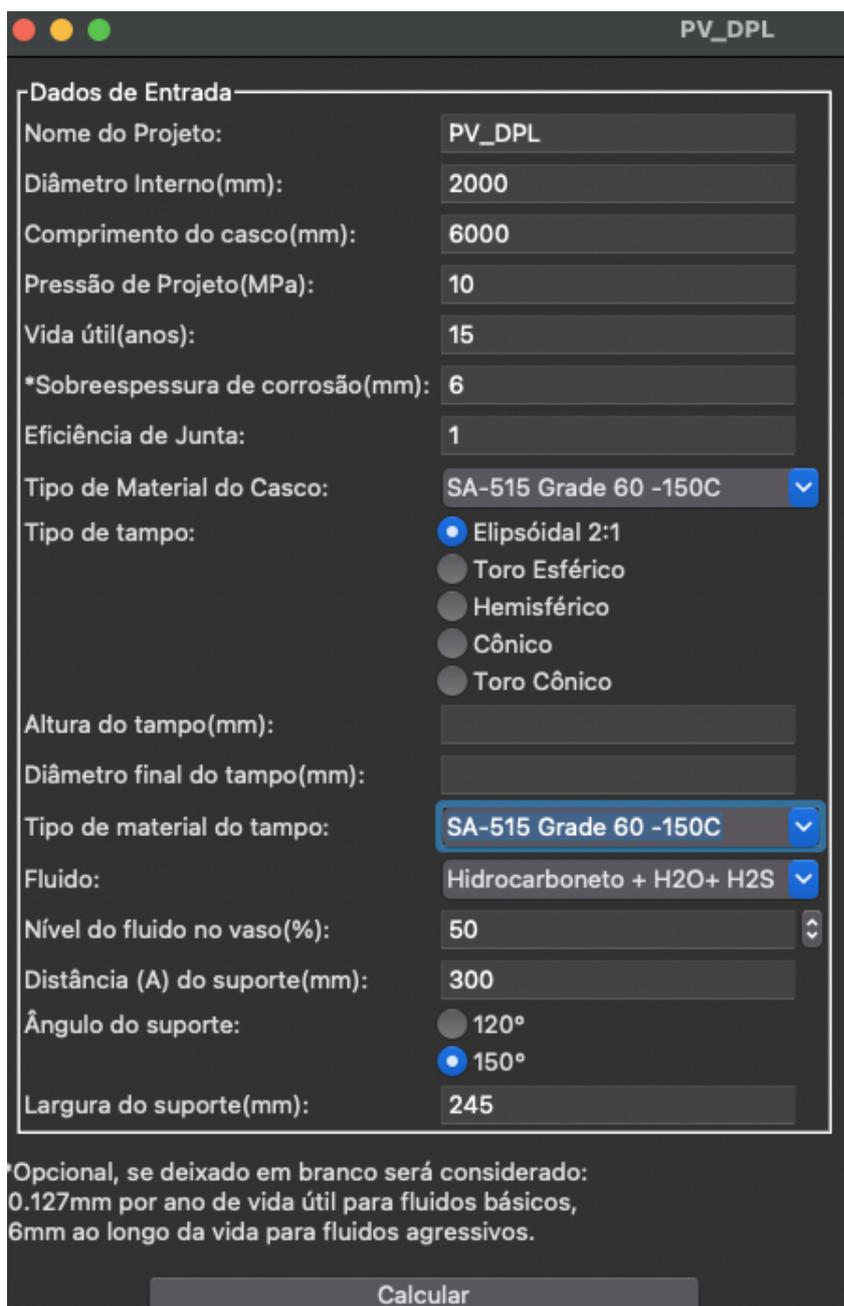
Figura 17 – Janela do banco de dados de fluidos

Nome	Tipo de fluido	Densidade(kg/m3)	ID
Hidrocarboneto + H2O+ H2S	Básico	997.0	2

Fonte: Elaborado pelo Autor

Como o material que será utilizado no vaso e o fluido de trabalho foram definidos no banco de dados, pode-se preencher a tela principal do aplicativo com os dados do vaso que foram determinados na metodologia. A Figura 18 demonstra a tela do aplicativo com todos os dados necessários para o cálculo do vaso. Os campos de Altura do Tampo e Diâmetro Final do tampo ficam desabilitados e são habilitados no caso do usuário selecionar o tipo de tampo Cônico ou Toro-Cônico.

Figura 18 – Aplicativo com os campos preenchidos



The screenshot shows a software application window titled "PV_DPL". The interface is dark-themed and contains a form with the following fields and values:

Field	Value
Nome do Projeto:	PV_DPL
Diâmetro Interno(mm):	2000
Comprimento do casco(mm):	6000
Pressão de Projeto(MPa):	10
Vida útil(anos):	15
*Sobreespesura de corrosão(mm):	6
Eficiência de Junta:	1
Tipo de Material do Casco:	SA-515 Grade 60 -150C
Tipo de tampo:	<input checked="" type="radio"/> Elipsoidal 2:1 <input type="radio"/> Toro Esférico <input type="radio"/> Hemisférico <input type="radio"/> Cônico <input type="radio"/> Toro Cônico
Altura do tampo(mm):	
Diâmetro final do tampo(mm):	
Tipo de material do tampo:	SA-515 Grade 60 -150C
Fluido:	Hidrocarboneto + H2O+ H2S
Nível do fluido no vaso(%):	50
Distância (A) do suporte(mm):	300
Ângulo do suporte:	<input type="radio"/> 120° <input checked="" type="radio"/> 150°
Largura do suporte(mm):	245

Below the form, there is a note: "Opcional, se deixado em branco será considerado: 0.127mm por ano de vida útil para fluidos básicos, 6mm ao longo da vida para fluidos agressivos." At the bottom of the window is a "Calcular" button.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao clicar em calcular o aplicativo realiza o cálculo das espessuras de acordo com a norma ASME(ASME, 2013b) e realiza a análise de Zick(ZICK, 1951) para os dados fornecidos do suporte, levantando uma janela de erro ao encontrar qualquer falha em se adequar aos critérios.

A Figura 19 mostra a área de resultados, com os valores finais das espessuras mínimas para o casco e para o tampo e um botão de gerar um relatório em PDF para o

usuário, neste relatório são impressos os dados de entrada, os valores calculados das espessuras e a folha de cálculo, onde ficam todas os valores e fórmulas utilizadas para cálculos da tensões utilizadas no critério de Zick.

Figura 19 – Aplicativo com as espessuras calculadas

The screenshot displays the PV_DPL application interface. On the left, a panel titled "Dados de Entrada" contains various input fields and controls. On the right, a panel titled "Resultados" displays the calculated values. At the bottom, there are buttons for "Calcular" and "Gerar PDF".

Dados de Entrada

Nome do Projeto:	PV_DPL
Diâmetro Interno(mm):	2000
Comprimento do casco(mm):	6000
Pressão de Projeto(MPa):	10
Vida útil(anos):	15
*Sobreespessura de corrosão(mm):	6
Eficiência de Junta:	1
Tipo de Material do Casco:	SA-515 Grade 60 -150C
Tipo de tampo:	<input checked="" type="radio"/> Elipsoidal 2:1 <input type="radio"/> Toro Esférico <input type="radio"/> Hemisférico <input type="radio"/> Cônico <input type="radio"/> Toro Cônico
Altura do tampo(mm):	
Diâmetro final do tampo(mm):	
Tipo de material do tampo:	SA-515 Grade 60 -150C
Fluido:	Hidrocarboneto + H2O+ H2S
Nível do fluido no vaso(%):	50
Distância (A) do suporte(mm):	300
Ângulo do suporte:	<input type="radio"/> 120° <input checked="" type="radio"/> 150°
Largura do suporte(mm):	245

Opcional, se deixado em branco será considerado:
0.127mm por ano de vida útil para fluidos básicos,
6mm ao longo da vida para fluidos agressivos.

Resultados

Espessura do casco:	95.286 mm
Espessura do tampo:	91.470 mm

Calcular

Gerar PDF

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 20 – Seção de dados de entrada do relatório do vaso

Dados de Entrada			
Característica	Valor	Unidade	Observação
Diâmetro Interno	2000	mm	-
Comprimento do casco	6000	mm	-
Pressão de Projeto	10	MPa	-
Vida útil do vaso	15	Anos	-
Sobreespesura de corrosão	6.0	mm	Especificada pelo usuário
Eficiência de Junta	1	-	-
Material do casco	SA-515 Grade 60 -150C	-	-
Tipo de tampo	Elipsóidal 2:1	-	-
Altura do tampo	500.0	mm	-
Material do tampo	SA-515 Grade 60 -150C	-	-
Fluido	Hidrocarboneto + H2O+ H2S	-	-
Nível do Fluido	50%	-	-
Distância (A) do suporte	300	mm	-
Ângulo do suporte	150	Graus	-
Largura do suporte	245	mm	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 21 – Seção de dados calculados do relatório do vaso

Dados Calculados			
Característica	Valor	Unidade	Observação
Espessura mínima do casco	95.286	mm	-
Espessura mínima do tampo	91.470	mm	-

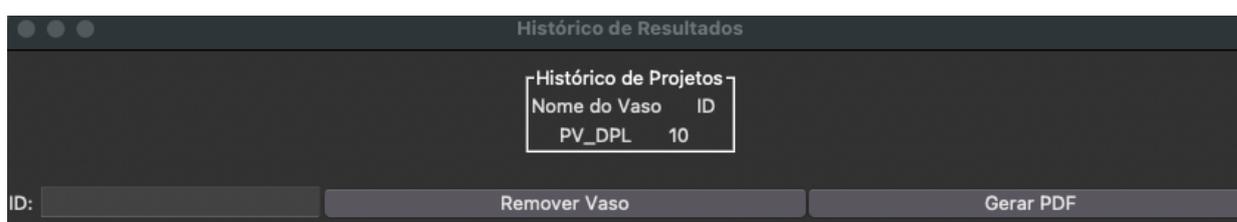
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 22 – Seção de folha de cálculo do relatório do vaso

Folha de cálculo		
Dado Calculado	Fórmula	Resultado
Espessura do Costado pela tensão circunferencial	$(P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P)$	89.286 mm
Espessura do Costado pela tensão longitudinal	$(P \cdot R) / (2 \cdot S \cdot E + 0.4 \cdot P)$	41.667 mm
Espessura do tampo	$(P \cdot D) / (2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P)$	85.470 mm
Tensão longitudinal máxima devido à flexão	$3 \cdot K1 \cdot Q \cdot L / (\pi \cdot r^2 \cdot t)$	13.184 MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no casco	$K2 \cdot Q / (r \cdot t)$	1.116 MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no tampo	$K2 \cdot Q / (r \cdot t)$	1.163 MPa
Tensão circunferencial máxima combinada	$-(Q / (4 \cdot t \cdot (B + 10 \cdot t))) - ((12 \cdot K3 \cdot Q \cdot R) / (L \cdot t^2))$	-0.862 MPa
Tensão adicional no tampo	$K4 \cdot Q / (r \cdot t)$	0.712 MPa
Tensão devido a pressão interna	$P \cdot r / (2 \cdot E \cdot t)$	52.474 MPa
Espessura do Costado pela tensão circunferencial	$(P \cdot R) / (S \cdot E - 0.6 \cdot P)$	89.286 mm
Espessura do Costado pela tensão longitudinal	$(P \cdot R) / (2 \cdot S \cdot E + 0.4 \cdot P)$	41.667 mm
Espessura do tampo	$(P \cdot D) / (2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P)$	85.470 mm
Tensão longitudinal máxima devido à flexão	$3 \cdot K1 \cdot Q \cdot L / (\pi \cdot r^2 \cdot t)$	13.184 MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no casco	$K2 \cdot Q / (r \cdot t)$	1.116 MPa
Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no tampo	$K2 \cdot Q / (r \cdot t)$	1.163 MPa
Tensão circunferencial máxima combinada	$-(Q / (4 \cdot t \cdot (B + 10 \cdot t))) - ((12 \cdot K3 \cdot Q \cdot R) / (L \cdot t^2))$	-0.862 MPa
Tensão adicional no tampo	$K4 \cdot Q / (r \cdot t)$	0.712 MPa
Tensão devido a pressão interna	$P \cdot r / (2 \cdot E \cdot t)$	52.474 MPa

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23 – Janela de banco de dados de resultados



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 20 mostra todos os dados utilizados na entrada e as Figuras 21 e 22

mostram todos os valores calculados. O aplicativo registra todos os dados calculados num banco de dados de resultados, como mostra a Figura 23, e nesta janela o usuário pode ver toda a lista de vasos projetados, como também inserir o ID do vaso e reimprimir o relatório do vaso, com exceção da folha de cálculo. Ao inserir o ID, o usuário pode remover o vaso do banco de dados.

5.3 Análise comparativa

A partir dos dados coletados na seção anterior podemos realizar a análise comparativa entre os valores calculados manualmente e os calculados pelo aplicativo.

Tabela 3 – Análise comparativa dos resultados.

Característica	Valor Manual	Valor Aplicativo	Diferença	Unidade
t	95.286	95.286	0%	mm
t_s	91.470	91.470	0%	mm
S_1	13.184	13.184	0%	MPa
S_2	1.115	1.116	0.09%	MPa
S_2	1.162	1.163	0.086%	MPa
S_3	-0.861	-0.862	0.116%	MPa
S_4	0.712	0.712	0%	MPa
S_5	52.474	52.474	0%	MPa

Como foi demonstrado na tabela acima, alguns valores possuem uma leve variação, decorrida do arredondamento feito pelo aplicativo. Portanto pode-se concluir que o aplicativo consegue realizar os cálculos para espessuras mínimas e análise de Zick para o suporte de um vaso cilíndrico horizontal sob pressão interna e com o casco reforçado pelos tampos.

5.4 Cálculo das aberturas

As aberturas e seus reforços foram definidos manualmente, já que a função de determiná-los não foi implementada no programa.

Na Tabela 4 estão especificadas as aberturas presente no vaso.

5.4.1 Boca de Visita

A boca de visita tem sua espessura determina pela equação 4.1, a mesma equação que determina a espessura do costado. Logo teremos uma espessura de 38.1 mm, considerando a sobre-espessura de corrosão e a compatibilidade da espessura para as encontradas no mercado.

Tabela 4 – Aberturas no vaso.

Abertura	Quantidade	Diâmetro
Entrada principal	01	20"ID(508 mm)
Boca de Visita	01	24"ID(610 mm)
Saída de vapor alta	01	10"ID(250.9 mm)
Saída de líquido baixa	01	10"ID(250.9 mm)
Poço de dreno	01	800 mm OD

O flange da boca de visita é determinado a partir da classe de pressão na qual a peça estará exposta. Para este caso o flange terá uma classe de 1500#, onde o símbolo '#' equivale a unidade psi, logo uma classe de 1500# equivale a 10.342 MPa, valor superior à pressão de projeto do vaso.

Primeiramente é necessário checar se abertura necessita de reforço. Primeiramente determinamos a área que requer compensação:

$$A_r = dt_r F + 2t_n t_r F(1 - f_{r1}) = 31762.159 \text{ mm}^2$$

O próximo passo é calcular a área disponível na abertura se projetando para fora:

$$A_2 = 5(t_n - t_{rn})f_{r2}t = 5177.773 \text{ mm}^2$$

ou

$$A_2 = 5(t_n - t_{rn})f_{r2}t_n = 2070.327 \text{ mm}^2$$

A norma dita que o menor valor é considerado. Logo A_2 terá um valor de 2070.327 mm^2 .

A norma estipula que se $A_2 \geq A_r$, não será necessário reforço. No caso deste trabalho, se faz necessário um reforço para o bocal de visita.

Logo, precisamos calcular a área A_5 , que é a área do reforço, considerando uma espessura de :

$$A_5 = (D_p - d - 2t_n)t_e f_{r4}$$

onde $A_5 = A_r - A_2 = 29691.832mm^2$.

Para uma espessura de reforço de 40mm, teremos um reforço vertical de 100mm e um reforço horizontal de 272mm.

5.4.2 Saída de vapor alta e saída de líquido baixa

Usando os mesmos critérios utilizados anteriormente, podemos calcular os dados das saídas de vapor e de líquido do vaso. Teremos uma espessura de parede e uma espessura de reforço de 25.4 mm, com um comprimento de reforço vertical e horizontal de 100 mm.

5.4.3 Entrada principal

Usando os mesmos critérios utilizados anteriormente, podemos calcular os dados das saídas de vapor e de líquido do vaso. Teremos uma espessura de parede de 31.8 mm e uma espessura de reforço de 40 mm, com um comprimento horizontal de 180 mm e comprimento vertical de 100 mm.

5.4.4 Poço de dreno

5.4.4.1 Espessura do poço

5.4.4.1.1 Tensão Circunferencial

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} = 35.714mm$$

5.4.4.1.2 Tensão Longitudinal

$$t = \frac{PR}{2SE + 0,4P} = 16.667mm$$

Logo, considerando a sobreespessura de corrosão, a espessura do poço será de 41.714 mm.

5.4.4.2 Espessura do tampo do poço

Considerando que o tampo será hemisférico:

$$t = \frac{PL}{2SE - 0,2P} = 17.094mm$$

Logo, considerando a sobreespessura de corrosão, a espessura do tampo do poço será de 23.094mm.

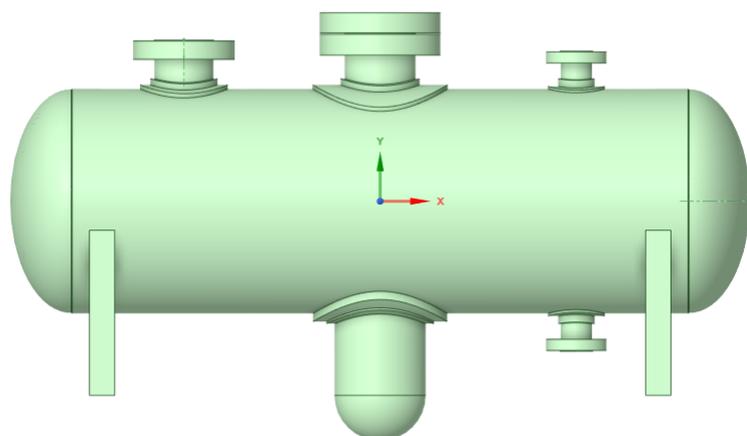
Considerando os critérios utilizados anteriormente, com fins de facilitar os cálculos, o poço e seu tampo terão a mesma espessura de 42 mm, visto que os valores calculados são mínimos. Para o suporte teremos uma espessura de 80mm, com comprimento vertical de 100 mm e comprimento horizontal de 130 mm.

5.5 Validação pelo método dos elementos finitos

5.5.1 Modelo do Vaso

O modelo do vaso foi projetado utilizando o ANSYS, como mostra as Figuras 24 e 25 nota-se que todas as 5 aberturas estão devidamente projetadas, assim como seus flanges. Como o objeto de estudo desse trabalho é a viabilidade do aplicativo, a sela foi feita de forma bastante simples, visto que a análise de Zick serve somente para analisar as tensões de contato com a sela e as tensões de flexão e cisalhamento do vaso, tratando-o como uma viga bi-apoiada.

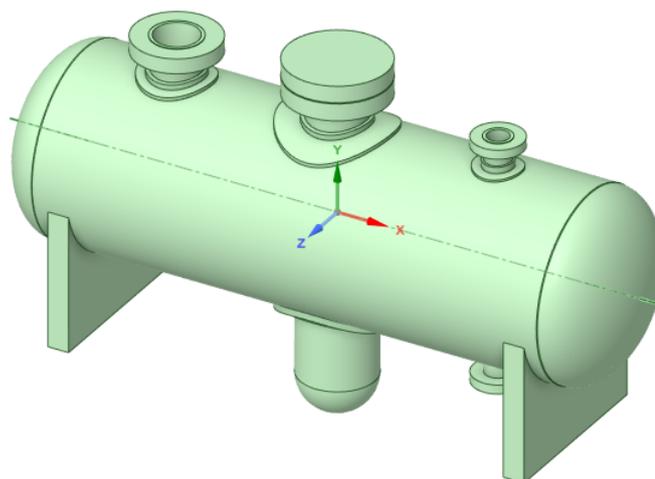
Figura 24 – Vista frontal do vaso



Fonte: Elaborado pelo Autor

Todos as aberturas, e seus devidos flanges tiveram valores comerciais utilizados. (TELLES; BARROS, 2011)

Figura 25 – Vista isométrica do vaso

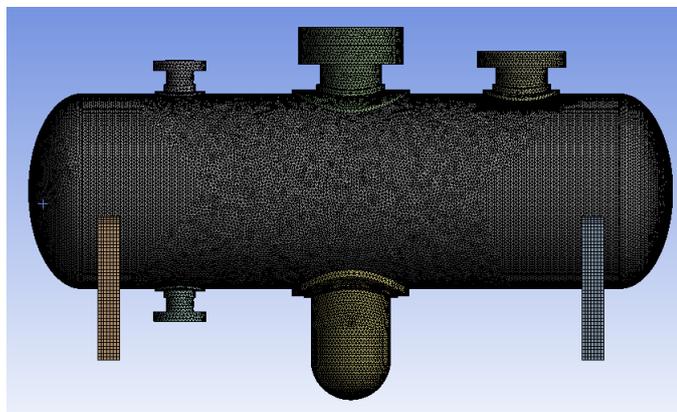


Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5.2 Malha

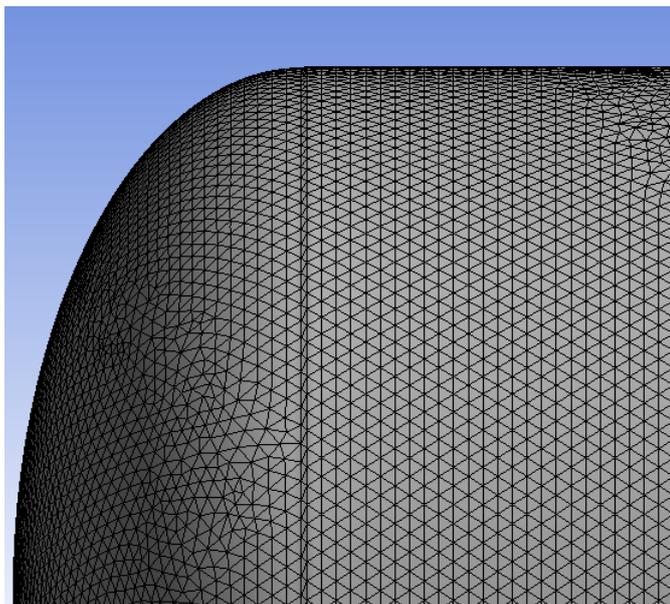
Aplicou-se ao vaso uma malha não-estruturada ao vaso com o objetivo de garantir uma aproximação fiel dos resultados, como podemos ver na Figura 26. Na Figura 27 é possível ver o detalhe da transição da malha do costado para o tampo, esta transição está bastante uniforme por conta do tamanho pequeno do elemento de malha.

Figura 26 – Vista fronta da malha do vaso



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 27 – Transição entre costado e tampo



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5.3 Condições de contorno

As condições de contorno aplicadas neste vaso se referem à restrições de movimento e pressão aplicada na região interna do vaso de forma normal. Nos suportes, um foi determinado como engastado e o outro livre para se mover no eixo X. Foram também restringidos o movimento da entrada principal e das saídas, deixando-os livre para se movimentar apenas nos eixos X e Z, visto que essas aberturas fazem parte de uma tubulação onde serão conectados os tubos pelo flange, restringindo o movimento no eixo Y (SILVA, 2015).

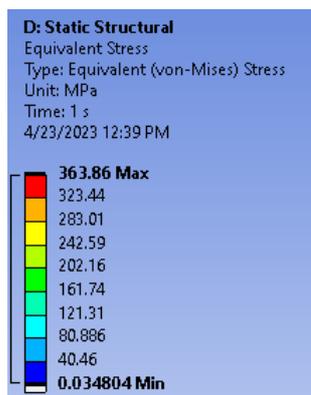
Tabela 5 – Condições de contorno.

Condição	Restrição
Suporte esquerdo	Engastado
Suporte direito	Deslocamento no eixo X
Entrada principal	Deslocamento nos eixos X e Y
Saídas alta e baixa	Deslocamento nos eixos X e Y

5.5.4 Análise pelo MEF

Ao aplicar a malha e a condição de contorno no ANSYS, podemos agora gerar uma solução para o nosso vaso, onde realizamos a análise utilizando o critério de Von Mises. As tensões máximas e mínimas atuantes no vaso estão explícitas na Figura 28 que codifica por cor intervalos de tensões para facilitar a visualização das tensões no vaso.

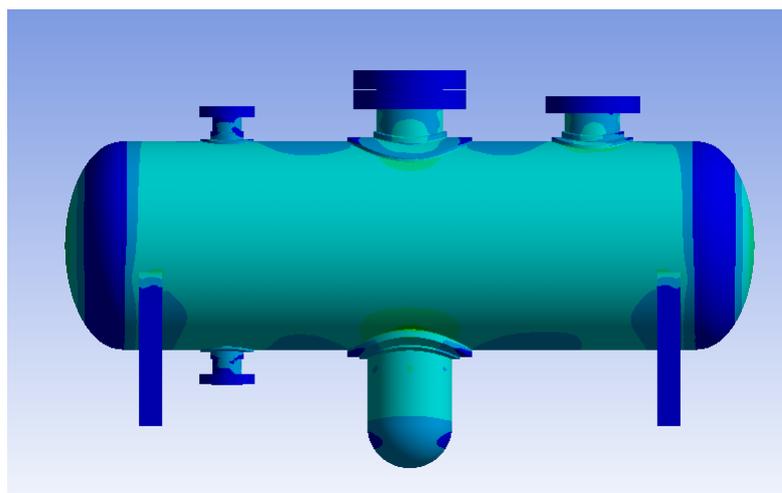
Figura 28 – Valores de tensões máximas e mínimas encontrados no vaso



Fonte: Elaborado pelo Autor

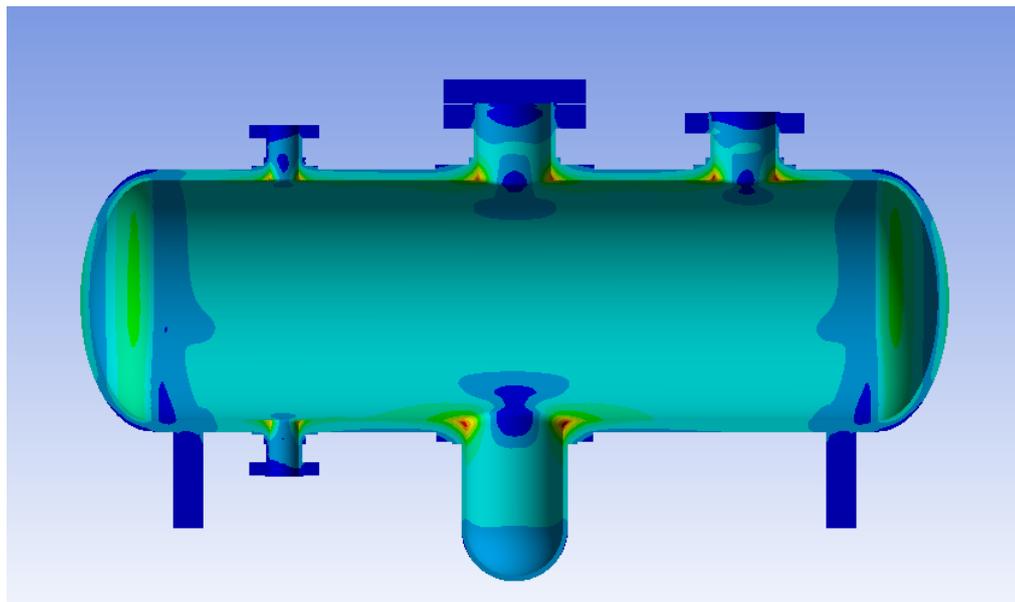
A Figura 29 mostra que nas regiões centrais do costado e do tampo as tensões estão abaixo da tensão admissível do material.

Figura 29 – Tensões no vaso



Fonte: Elaborado pelo Autor

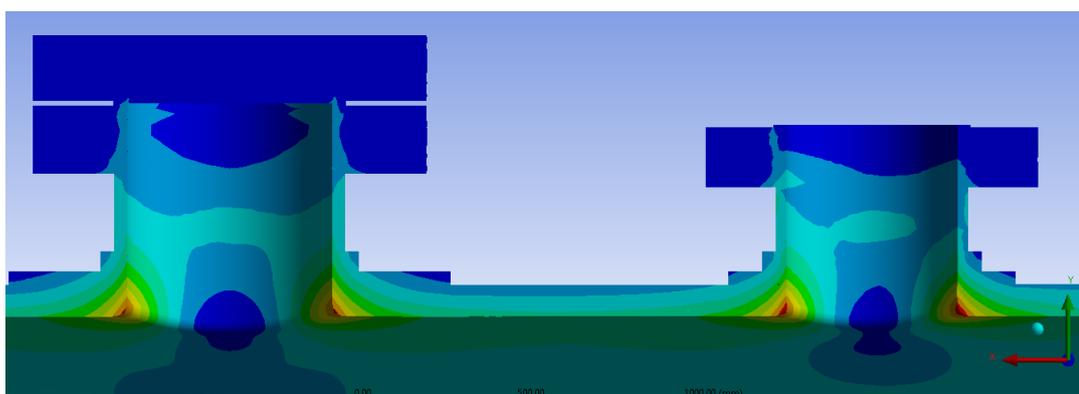
Figura 30 – Tensões nos concentradores de tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor

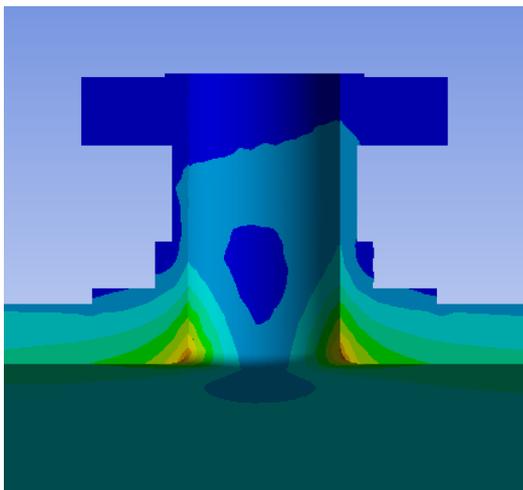
Na Figura 30 podem ser vistas todas as tensões de pico nos concentradores de tensão do vaso. As Figuras 31, 32, 33 e 34 mostram com mais detalhes esses concentradores. As tensões nesses concentradores de tensão foram as mais altas registradas no vaso, essas regiões seguem métodos de análise diferente do restante do vaso e não são de valor para este estudo visto que o objetivo principal é validar as tensões no suporte do apoio e determinar se a espessura do vaso é válida.

Figura 31 – Concentradores de tensão na boca de visita e entrada principal



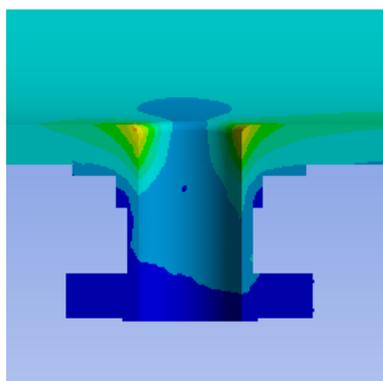
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 32 – Concentrador de tensão na saída alta



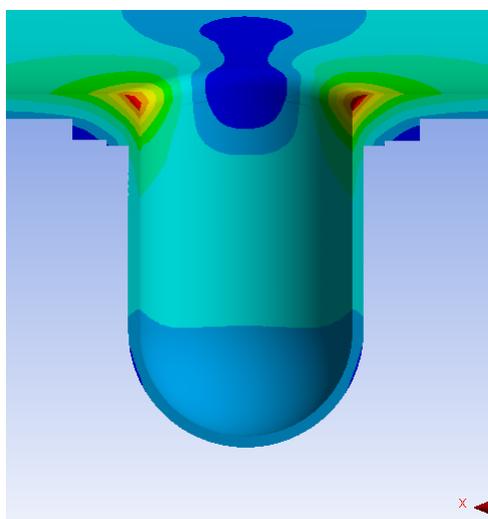
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 – Concentrador de tensão na saída baixa



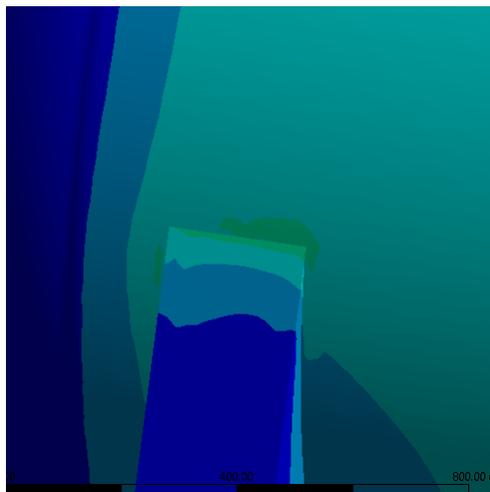
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 34 – Concentrador de tensão no poço de dreno



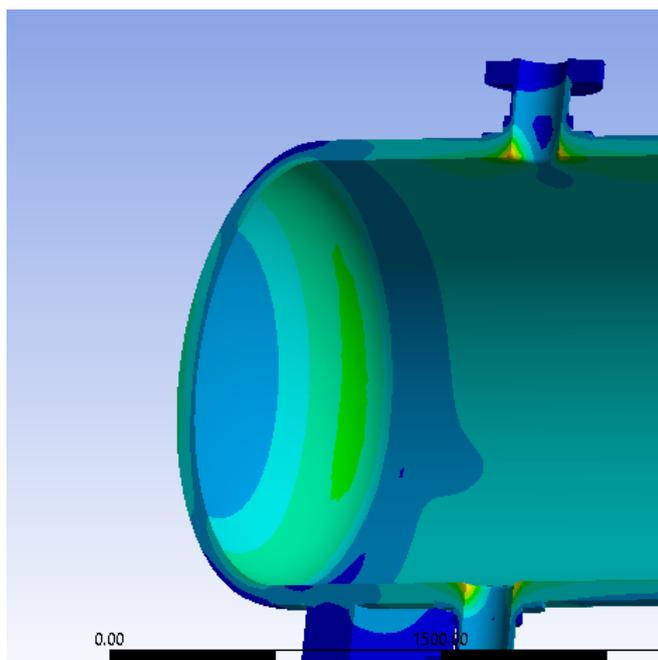
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 35 – Tensões no apoio de suporte



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 36 – Tensões na região de conexão do tampo com o costado



Fonte: Elaborado pelo Autor

As tensões no apoio do suporte e na região de conexão do tampo com o costado estão explícitas nas Figuras 35 e 36. Na Figura 35 pode-se perceber uma área em que ocorre uma tensão mais elevada, a qual ultrapassa a tensão admissível do material.

Já na Figura 36 percebe-se a região de transição interna do costado para o tampo, nessa região percebe-se um aumento da tensão aplicada, mas não o suficiente para ultrapassar a tensão de escoamento do material.

Com base nas simulações estruturais realizadas, pode-se afirmar que o vaso de pressão em questão apresentou um comportamento estrutural satisfatório. A análise revelou que as tensões atuantes nas áreas críticas, como no apoio do suporte e na região de conexão do tampo com o costado, não ultrapassaram a tensão de escoamento do material, mesmo nas condições de carga máxima previstas. Além disso, a geometria do suporte foi simplificada, o que torna os resultados ainda mais promissores, visto que, em condições reais, a tensão aplicada nesta área seria ainda menor. Portanto, pode-se concluir que o vaso de pressão apresenta uma boa margem de segurança estrutural e não apresentou falhas durante as simulações realizadas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da norma ASME Seção VIII Div I, e consequentemente o desenvolvimento de um software para determinação das espessuras dos tampos e do casco de vasos cilíndricos horizontais sob pressão interna, assim como a realização da análise de Zick para um determinado suporte, não entrando em detalhes do design do mesmo.

Primeiramente foi definido o modelo de vaso a ser trabalhado, e tomando como base os critérios que desejamos avaliar foi desenvolvido o modelo de vaso utilizado. Tomando como base a norma, foram realizados os cálculos manuais de todas as espessuras, além da análise pelos critérios de Zick, e os valores determinados por este cálculo foram comparados com os valores calculados pelo programa. Durante essa análise comparativa todos valores calculados pelo programa tiveram uma excelente aproximação com os valores calculados de forma manual.

Como o programa não possui a função de determinar aberturas, pois adicionaria uma complexidade no âmbito computacional que não é o objetivo do curso, estas foram determinadas manualmente, assim como seus reforços. Usando o ANSYS Spaceclaim, pode-se criar um modelo CAD do vaso determinado por este trabalho e iniciar uma análise estática estrutural no ANSYS Workbench, definindo sua malha e condições de contorno. As tensões determinadas por esta análise foram comparadas com a tensão admissível, e tensão de escoamento do material de forma a validar as espessuras do vaso e checar por sinais de flexão no vaso devido a distância dos suportes, assim como analisar as tensões nos locais de apoio.

Em termos gerais, o programa desenvolvido demonstrou ser capaz de ajudar no processo de determinação de um vaso de pressão. Entretanto, é importante salientar que sua base se encontra na norma ASME BPVC 2013, adquirida pela Universidade Federal de Pernambuco, o que o torna um produto estritamente acadêmico. Embora existam alternativas pagas no mercado, que oferecem mais funcionalidades, o presente programa tem como finalidade servir como uma ferramenta de apoio aos estudantes, visando ajudar no processo de aprendizado.

Como trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- Propõe-se a alteração da interface gráfica do programa, que atualmente apre-

senta uma interface simples desenvolvida com a ferramenta integrada na linguagem Python, chamada tkinter. A migração para uma interface web poderia ser considerada como uma opção, com o objetivo de manter os dados calculados armazenados online e fornecer uma interface mais amigável com ilustrações que facilitem o entendimento do aplicativo. Essa atualização resultaria em uma interface mais moderna e aprimorada para os usuários, além de permitir uma melhor experiência de uso do programa

- Adicionar a funcionalidade de cálculos de aberturas no programa, assim como o cálculo de seus reforços pelo método de compensação de área.
- Adicionar a funcionalidade de design de suportes, para posterior análise de Zick.
- Adicionar banco de dados de tubulações e chapas comerciais para que o ajuste das espessuras possa ser feito de forma mais fácil pelo usuário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, A. B. de N. T. NBR 16035 - Caldeiras e vasos de pressão - Requisitos para a construção. 2022.
- ARUNKUMAR, S.; MOORTHY, P. E.; KARTHIK, N. Design optimization of horizontal pressure vessel. Materials Today: Proceedings.
- ASME, A. S. of M. E. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Part D: Properties (Metric). 2013. ASME International.
- ASME, A. S. of M. E. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels. 2013. ASME International.
- DOWNEY, A. B. Think Python. 2a. ed. Needham, Massachusetts: [s.n.], 2015. v. 1.
- Escola de Dados. 2020. Acesso em: 27/04/2023 às 13:20. Disponível em: <<https://escoladedados.org/tutoriais/entrevistando-grandes-bases-de-dados-com-sql/>>.
- ESSS. 2016. Acesso em: 26/04/2023 às 23:10. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>.
- HEATH, M. T. Scientific Computing: An Introductory Survey. 2nd. ed. [S.l.]: McGraw Hill Professional, 2002.
- NR-13. 2020. Acesso em: 8/11/2021 às 14:00. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf/view>>.
- PARMAR, M.; SHAH, D.; SONAR, M. Design of Pressure Vessel saddle and Zick analysis. International Research Journal of Engineering and Technology, v. 08, n. 02, p. 2026–2033, 2021.
- REDDY, J. N. An Introduction to the Finite Element Method. 4th. ed. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2019.
- SEBESTA, R. W. Concepts of Programming Languages. 12th. ed. [S.l.]: Pearson, 2018.
- SILVA, A. B. da. PROJETO DE VASO DE PRESSÃO SEGUNDO NORMA ASME E ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- STALLINGS, W. Arquitetura e organização de computadores. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2017.
- TELLES, P. C. da S.; BARROS, D. G. P. Tabelas e Gráficos para Projetos de Tubulações. [S.l.: s.n.], 2011.
- TELLES, P. C. S. Vasos de Pressão. 2a. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1996. v. 1.
- TOUDEHDEHGHAN, A.; HONG, T. W. A critical review and analysis of pressure vessel structures. IOP Publishing, 2019.

VINCI, L. da. Codex Madrid I. [S.l.: s.n.], 1490–1499.

YUVARAJ, K.; OORAPPAN, G. M.; MEGAVARTHINI, K. K.; PRAVIN, M. C.; ADHARSH, R.; KUMARAN, M. A. Design and development of an application for database maintenance in inventory management system using tkinter and sqlite platform. IOP Publishing, 2020.

ZICK, L. P. Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports. [S.l.]: THE WELDING JOURNAL RESEARCH SUPPLEMENT, 1951.

Apêndices

APÊNDICE A – DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO VASO

A.1 Costado ou Casco

Conforme definido na seção de revisão bibliográfica, agora discutiremos os elementos geométricos que podem ser utilizados para definir este vaso.

A.1.1 Casco Cilíndrico

A.1.1.1 Tensão Circunferencial

Quando a espessura não exceder metade do Raio interno, ou a Pressão de projeto não exceder $0,38SE$, aplica-se:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}, \text{ ou, } P = \frac{SEt}{R + 0,6t}. \quad (\text{A.1})$$

Considerando que o vaso será 100% radiografado, teremos uma eficiência de junta igual a 1.

$$t = \frac{10 * 1000}{118 * 1 - 0.6 * 10} = 89.286$$

A.1.1.2 Tensão Longitudinal

Quando a espessura não exceder metade do Raio interno, ou a Pressão de projeto não exceder $1,25SE$, aplica-se:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0,4P}, \text{ ou, } P = \frac{2SEt}{R - 0,4t}. \quad (\text{A.2})$$

$$t = \frac{10 * 1000}{2 * 118 * 1 - 0.4 * 10} = 43.103$$

Logo, a espessura mínima para o casco será o maior valor encontrado, neste caso será a espessura mínima referente à tensão circunferencial(junta longitudinal) que foi de 89.286 milímetros, adicionando a sobre espessura de corrosão:

$$t = 89.286 + 6 = 95.286$$

Logo, teremos uma espessura mínima de casco de 95.286 milímetros.

A.2 Tampos

A.2.1 Tampo Elipsoidal com $t_s/L \geq 0,002$

A espessura requerida para este tipo de tampo para quando a metade do menor eixo é igual a um quarto do diâmetro interno do costado, aplica-se:

$$t = \frac{PD}{2SE - 0,2P} \quad (\text{A.3})$$

Uma aproximação aceitável de um tampo elipsoidal 2:1 é quando toma-se o raio de junta de $0,17D$ e o raio de coroa $0,90D$. Calculando para uma eficiência de junta de 100% teremos:

$$t = \frac{10 * 2000}{2 * 118 * 1 - 0.2 * 10} = 85.470$$

Adicionando a sobre espessura de corrosão:

$$t = 85.470 + 6 = 91.470$$

Logo, teremos uma espessura mínima de 91.470 milímetros para os tampos do vaso.

A.3 Suportes

Para o cálculo de suportes está sendo considerado um suporte com ângulo de 150° , altura de 800mm, largura de 245mm(raiz de 60R) e uma distância entre suportes de 5400mm. Para validar este suporte é necessário calcular as tensões propostas por Zick e checar se estas estão dentro dos limites propostos por ele.

Primeiramente é necessário calcular o peso do vaso com seu fluido, logo começaremos calculando o peso do fluido no vaso:

$$V_{int} = \pi R^2 L + \frac{\pi D^3}{12} = 20.933m^3$$

$$V_{fluido} = \frac{V_{int}}{2} = 10.467m^3$$

$$W_{fluido} = V_{fluido} * Densidade * Gravidade = 102.373kN$$

Agora vamos calcular o peso do material do vaso:

$$V = \pi L(2tR + t^2) + \frac{\pi}{12}[(D + 2t_h)^3 - D^3] = 4.390m^3$$

$$W_v = V * Densidade * Gravidade = 335.915kN$$

Agora teremos o peso total:

$$W = 102.373 + 335.915 = 438.288kN$$

Para os fins de cálculos de suporte iremos considerar o peso total igual a 2Q, logo:

$$Q = \frac{W}{2} = 219.144kN$$

Onde Q é o peso suportado por cada suporte.

A.3.1 Tensão longitudinal máxima devido à flexão

$$K_1 = 1$$

$$S_1 = \frac{3K_1QL}{\pi R^2 t} = 13.184MPa$$

Esta tensão não pode exceder o valor de ES , como o vaso será 100% radiografado, S_1 não pode exceder S_{adm} , cujo valor é $118MPa$, fica claro que S_1 não excede este valor.

A.3.2 Tensão tangencial máxima de cisalhamento

$$K_2 = 0.485$$

No casco:

$$S_2 = \frac{K_2Q}{Rt} = 1.115MPa$$

No tampo:

$$S_2 = \frac{K_2Q}{Rt} = 1.162MPa$$

Estas tensões não podem exceder 80% de S_{adm} , logo:

$$0.8S_{adm} = 94.4MPa$$

Fica exposto que os valores de tensão tangencial de cisalhamento no tampo e no casco são satisfatórios

A.3.3 Tensão circunferencial máxima combinada

$$K_3 = 0.0079$$

Como $L < 8R$, aplica-se:

$$S_3 = -\frac{Q}{4t(b+10t)} - \frac{12K_3QR}{Lt^2} = -0.861MPa$$

Nota-se que esta tensão é compressiva e o valor absoluto dela não pode exceder 150% de S_{adm} :

$$1.5S_{adm} = 177MPa$$

Logo, fica exposto que a tensão circunferencial máxima combinada está adequada segundo os critérios de Zick.

A.3.4 Tensão adicional nos tampos

$$K_4 = 0.297$$

A tensão causada pela pressão interna do vaso é definida por:

$$S = \frac{PR}{2Et} = 52.474MPa$$

A tensão adicional no tampo é definida por:

$$S_4 = \frac{K_4Q}{Rt_h} = 0.712MPa$$

Logo a tensão total é de:

$$S_t = 0.685 + 36.663 = 53.186MPa$$

Esta tensão não pode exceder 125% da tensão admissível do material, logo:

$$1.25S_{adm} = 147.5$$

Fica claro que o valor da tensão total não ultrapassa o valor limite para este caso, logo a tensão adicional no tampo é adequada segundo os critérios de Zick.

APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DOS CÁLCULOS DOS PARÂMETROS PELO APLICATIVO

Figura 37 – Código de determinação da sobreespesura de corrosão

```

if Cor.get():
    corr = float(Cor.get())
    data_in[5] = (["Sobreespesura de corrosão", f"{corr}", "mm", "Especificada pelo usuário"])
else:
    if get_fluid_type(fluid) == True:
        corr = 6
    else:
        corr = 0.127*UL
        data_calc.append(["Sobreespesura de corrosão para líquido não agressivo ", "0.127 * (Vida Útil)",f"{corr:.3f} mm"])
        data_in[5] = (["Sobreespesura de corrosão", f"{corr}", "mm", "Usuário não especificou, dado calculado"])

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 38 – Código de determinação da espessura mínima do Casco

```

def circunferencial_stress(P,S,E,R):
    if (P > 0.385*S*E):
        raise ValueError("Pressão de projeto excede 0.38 * Tensão admissível * Eficiência de Junta")
    circun_stress = (P*R)/(S*E - 0.6*P)
    if circun_stress > R/2:
        raise ValueError("Espessura excede metade do raio interno")
    return circun_stress

def longitudinal_stress(P,S,E,R):
    if (P > 1.25*S*E):
        raise ValueError("Pressão de projeto excede 1.25 * Tensão admissível * Eficiência de Junta")
    long_stress = (P*R)/(2*S*E + 0.4*P)
    if long_stress > R/2:
        raise ValueError("Espessura excede metade do raio interno")
    return long_stress

shell_t = max(circun_stress,long_stress) + corr # Pegando o maximo e adicionando a sobreespesura de corrosão

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 39 – Código de determinação da espessura mínima dos tampos

```
## Tampo elipsoidal 2:1
def elipsoidal_head(P,D,S,E):
    elip_t = (P*D)/(2*S*E-0.2*P)
    return elip_t

##Tampo toro esférico; Raio da coroa igual a D do costado
def torospherical_head(P,L,S,E):
    toro_t = (0.885*P*L)/(S*E - 0.1*P)
    return toro_t

##Tampo hemisférico; Raio da coroa = R do casco
def hemispheric_head(P,L,S,E):
    hemi_t = (P*L)/(2*S*E - 0.2*P)
    return hemi_t

##Tampo cônico
def conical_head(H,D,P,S,E):
    R = D/2
    radian_alpha = math.atan(R/H)
    cos_alpha = math.cos(radian_alpha)
    alpha = (radian_alpha*180)/math.pi
    if alpha > 30:
        raise ValueError("Ângulo de cone superior a 30 graus")
    con_t = (P*D)/(2*cos_alpha(S*E - 0.6*P))
    return con_t

#Tampo toroconico
def toroconical_head(Di, D, H, P, S, E):
    Ri = Di/2
    R = D/2
    alpha = math.atan(H/(R-Ri))
    deg_alpha = (alpha*180)/math.pi
    if deg_alpha > 30:
        raise ValueError("Ângulo de cone superior a 30 graus")
    L = Di/(2*math.cos(alpha))
    toro_t = (P*L)/(S*E - 0.6*P)
    return toro_t

head_t += corr
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 40 – Código de determinação do peso Q suportado por um apoio

```

def head_weight(h_type,D, Di, head_t,fluid_den, fluid_level, mat_den, H):
    D = D/1000
    Di = Di/1000
    fluid_level = fluid_level/100
    R = D/2
    head_t =head_t/1000
    H = H/1000

    if h_type == 1:
        inside_head_v = (math.pi * pow(D,3))/12 #m3
        outside_head_v = (math.pi * pow(D+2*head_t,3))/12 #m3
    elif h_type == 2:
        inside_head_v = 0.1694 * pow(D,3) #m3
        outside_head_v = 0.1694 * pow(D+2*head_t,3) #m3
    elif h_type == 3:
        inside_head_v = (4*math.pi * pow(R,3))/3 #m3
        outside_head_v = (4*math.pi * pow(R+head_t,3))/3 #m3
    elif h_type == 4:
        inside_head_v = 2*(math.pi *R*R*H)/3 #m3
        outside_head_v = 2*(math.pi *pow(R+head_t,2)*(H+head_t))/3 #m3
    elif h_type == 5:
        Ri = Di/2
        inside_head_v = 2*(math.pi*H/3)*(math.pow(R,2)+ R*Ri + math.pow(Ri,2)) #m3
        outside_head_v = 2*(math.pi*(H+head_t)/3)*(math.pow(R+head_t,2) + (R+head_t)*(Ri+head_t) + math.pow(Ri+head_t,2)) #m3
    fluid_w = fluid_den * inside_head_v * fluid_level * 9.81 #N
    mat_w = (outside_head_v - inside_head_v) * mat_den * 9.81 #N
    head_w = fluid_w + mat_w #N
    return head_w #N

def shell_weight(R, L, shell_t,mat_den,fluid_den,fluid_level):
    R = R/1000
    shell_t = shell_t/1000
    L = L/1000
    fluid_level = fluid_level/100
    inside_base_area = math.pi * math.pow(R,2) #m2
    inside_v = inside_base_area * L #m3
    out_r = R + shell_t #m
    outside_base_area = math.pi * math.pow(out_r,2) #m2
    outside_v = outside_base_area * L #m3
    shell_v = outside_v - inside_v #m3
    mat_w = shell_v * mat_den * 9.81 # N
    fluid_w = inside_v*fluid_den*9.81*fluid_level #N
    shell_w = mat_w + fluid_w # N
    return shell_w #N

total_w = shell_weight(R, L, shell_t, shell_mat_den, fluid_den, fluid_level) + head_weight(h_type,D, Di, head_t,fluid_den,fluid_level,head_mat_den,H) #N
Q = total_w/2 #N

```

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 41 – Código da análise de Zick

```

def head_weight(h_type,D, Di, head_t,fluid_den, fluid_level, mat_den, H):
    D = D/1000
    Di = Di/1000
    fluid_level = fluid_level/100
    R = D/2
    head_t =head_t/1000
    H = H/1000

    if h_type if A > R/2:
        messagebox.showinfo(
            "Erro", "A distância entre suportes excede os limites da norma")
        return

    if Sa == 120:
        K1 = 1
        K2=0.880
        K3=0.0132
        K4=0.401
    else:
        K1 = 1
        K2=0.485
        K3=0.0079
        K4=0.297

    ##Tensao cisalhante
    S1 = (3*K1*Q*(L/1000))/(math.pi*pow((R/1000),2)*shell_t/1000)
    S1 = S1/1000000
    data_calc.append(["Tensão longitudinal máxima devido à flexão", "3*K1*Q*(pi * r^2*t)",f"{S1:.3f} MPa"])

    if S1 > SxE:
        messagebox.showinfo(
            "Erro", "A tensão longitudinal máxima excede o valor de Eficiência de Solda * Tensão Admissível")
        return

    #Tensao cisalhante no costado para A <= R/2
    S2 = (Q * K2)/((shell_t/1000) * (R/1000))
    S2 = S2/1000000
    data_calc.append(["Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no casco", "K2*Q/(r*t)",f"{S2:.3f} MPa"])
    #Tensao cisalhante no tampo para A <= R/2
    S2h = (Q * K2)/((head_t/1000) * (R/1000))
    S2h = S2h/1000000 #Convertendo N/mm2 para MPa
    data_calc.append(["Tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no tampo", "K2*Q/(r*t)",f"{S2h:.3f} MPa"])

    if S2/(S*0.8) > 1:
        messagebox.showinfo(
            "Erro", "A tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no casco excede os limites estabelecidos por Zick")
        return
    if S2h/(Sh*0.8) > 1:
        messagebox.showinfo(
            "Erro", "A tensão tangencial máxima de cisalhamento devido à flexão no tampo excede os limites estabelecidos por Zick")
        return

    if L >= 8*R:
        S3=-(Q/(4*(shell_t/1000)*((B/1000)+10*(shell_t/1000)))-((3*K3*Q)/(2*pow(shell_t/1000,2)))
        S3 = S3/1000000
        data_calc.append(["Tensão circunferencial máxima combinada", "-(Q/(4*t*(B+10*t)))-((3*K3*Q)/((2 * t^2))",f"{S3:.3f} MPa"])
    else:
        S3=-(Q/(4*(shell_t/1000)*((B/1000)+10*(shell_t/1000)))-((12*K3*Q*(R/1000))/((L/1000)*pow(shell_t/1000,2)))
        S3 = S3/1000000
        data_calc.append(["Tensão circunferencial máxima combinada", "-(Q/(4*t*(B+10*t)))-((12*K3*Q*R)/((L * t^2))",f"{S3:.3f} MPa"])

    if S3 >= 1.5*S:
        messagebox.showinfo("Erro","Tensão circunferencial máxima combinada excede os limites estabelecidos por Zick")
        return

    #Tensao adicional no tampo
    S4 = (Q * K4)/((head_t/1000) * (R/1000))
    S4 = (P*R)/(2*E*shell_t)
    S4 = S4/1000000
    if (S4 + S4dd)/(1.25*Sh) > 1:
        messagebox.showinfo(
            "Erro", "A tensão adicional no tampo excede os limites estabelecidos por Zick")
        return

```

Fonte: Elaborado pelo Autor