

Mateus Penido Pereira

Validação de vasos de pressão pelas normas ASME VIII, Divisão 1 e AD 2000

MATEUS PENIDO PEREIRA

Validação de vasos de pressão pelas normas ASME VIII, Divisão 1 e AD 2000

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Marcelo Martins Sampaio


P436v	<p>Pereira, Mateus Penido Validação de vasos de pressão pelas normas ASME VIII, Divisão 1 e AD 2000 / Mateus Penido Pereira– Guaratinguetá, 2023. 48 f : il. Bibliografia: f. 47-48</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Martins Sampaio</p> <p>1. Vasos de pressão. 2. Análise de elementos finitos. 3. Normas técnicas (Engenharia). I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.643.2</p>
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595


MATEUS PENIDO PEREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Orientador/UNESP-FEG


Profa. Me. Sofia Glyniadakis
UNESP-FEG


Prof. Me. Geraldo César Rosário de Oliveira
UNESP-FEG

Janeiro de 2023

DADOS CURRICULARES

MATEUS PENIDO PEREIRA

NASCIMENTO 21.07.1997 – São Paulo / SP

FILIAÇÃO Marcelo Monteiro Sad Pereira
Ana Rosa Penido Pereira

2016/2023 Graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia e Ciências da Unesp, Campus de Guaratinguetá.

Dedico este trabalho a minha família, que muito me apoiou e incentivou à realizá-lo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me dado o dom da vida para superar as adversidades encontradas ao longo da mesma;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Martins Sampaio* por ter se disponibilizado a realizar correções, orientações e incentivos no decorrer deste Trabalho de Conclusão de Curso;

aos meus pais *Marcelo e Ana Rosa*, irmã *Mariana* e namorada *Mariana*, por sempre incentivarem meus estudos e a evoluir como ser humano;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento;

à UNESP, por ter me proporcionado a experiência de ser um estudante de engenharia mecânica e utilizar os conhecimentos adquiridos em benefício da sociedade.

“Se o conhecimento pode criar problemas,
não é através da ignorância que podemos
solucioná-los.”

Isaac Asimov

RESUMO

Neste trabalho, utilizando as normas ASME VIII Div.1 e AD2000, foi feita a validação de dois tipos de vasos horizontais cilíndricos: um sem e outro com quatro bocais (A, B, C, D). Para tal são considerados dois parâmetros em comum entre ambas as normas: a espessura mínima requerida em milímetros (da casca cilíndrica, do tampo elíptico e dos bocais A, B, C e D), bem como a tensão máxima de membrana (na presença e ausência dos bocais). As diferenças percentuais entre ambas as normas, levando em consideração a tensão de membrana do vaso sem bocais, não foi significativa. No entanto, em relação ao vaso com bocais, as diferenças percentuais entre os bocais B e D (18,26% e 13,64%, respectivamente) é considerável. Por fim, para o caso da espessura mínima requerida, as diferenças percentuais para cada um dos componentes (casca, tampo, bocal A, bocal B, bocal C e bocal D) apresentam alta disparidade (99,2%, 79,7%, 180,5%, 159,2%, 180,5%, 189,5%, respectivamente). Com base nessas diferenças percentuais, são tecidos comentários e conclusões à respeito da aplicabilidade de ambas as normas em contextos reais de validação de vasos de pressão.

PALAVRAS-CHAVE: Vasos de pressão. ASME. AD 2000. Espessura mínima requerida. Tensão de membrana. DIMy. Método dos Elementos Finitos. Ansys.

ABSTRACT

In this work, using the ASME VIII Div.1 and AD2000 standards, the validation of two types of cylindrical horizontal vessels are carried out: one without and the other with four nozzles (A, B, C, D). For this, two parameters in common between both standards were considered: the minimum wall thickness required in mm (of the cylindrical shell, the elliptical top and the nozzles A, B, C and D), as well as the maximum membrane stress (in the presence and absence of the nozzles). The percentage differences between both standards, taking into account the membrane tension of the vessel without nozzles, was not significant. However, regarding the vessel with nozzles, the percentage differences between nozzles B and D (18.26% and 13.64%, respectively) is considerable. Finally, for the case of the minimum thickness required, the percentage differences for each of the components (shell, elliptical head, nozzle A, nozzle B, nozzle C and nozzle D) show high disparity (99.2%, 79.7%, 180.5%, 159.2%, 180.5%, 189.5%, respectively). Based on these percentage differences, comments and conclusions are made regarding the applicability of both standards in real contexts of pressure vessel validation.

KEYWORDS: Pressure vessels. ASME. AD 2000. Minimum required thickness. Membrane stress. DIMy. Finite Elements Method. Ansys.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de vaso de pressão.....	17
Figura 2 - Vaso de pressão de parede fina	18
Figura 3 - Exemplo de vaso de pressão com bocais.	20
Figura 4 - Tipos de vasos de pressão	20
Figura 5- Ilustração de um tampo elíptico	25
Figura 6 – Seção longitudinal de um bocal cilíndrico	26
Figura 7 – Elementos finitos uni, bi e tridimensionais.	32
Figura 8 – Esquerda: placa sólida (solução teórica disponível)	32
Figura 9 - Tela inicial do software Ansys e seus sistemas de análise.	33
Figura 10 – Tela inicial do software DIMy e seus códigos de projeto.	34
Figura 11 - Vaso horizontal com tampo elíptico (sem bocais).	35
Figura 12 - Vaso horizontal com tampo elíptico (com bocais).....	35
Figura 13 - Propriedades mecânicas do aço estrutural.....	37
Figura 14 - Vista em corte do vaso cilíndrico com bocais e tampo elíptico.....	38
Figura 15 - Tensões de membrana na presença de bocais (ASME Div.1)	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados geométricos da casca e do tampo.....	38
Tabela 2 - Dados geométricos dos bocais	38
Tabela 3 - Propriedades da casca cilíndrica, segundo ASME VIII Divisão 1	39
Tabela 4 - Propriedades da casca cilíndrica, segundo AD2000.....	39
Tabela 5 - Propriedades dos bocais, segundo ASME VIII Divisão 1	40
Tabela 6 - Propriedades dos bocais, segundo AD 2000	40
Tabela 7 - Propriedades do tampo, segundo ASME Divisão 1.....	41
Tabela 8 - Propriedades do tampo, segundo AD 2000.....	41
Tabela 9 - Cálculo das espessuras requeridas mínimas segundo a ASME Div.1	42
Tabela 10 - Cálculo das espessuras requeridas mínimas segundo a AD 2000	42
Tabela 11 - Diferenças percentuais entre as espessuras mínimas.	42
Tabela 12 - Cálculo das tensões máximas segundo a ASME VIII Div. 1	43
Tabela 13 – Cálculo das tensões máximas segundo a AD 2000.....	43
Tabela 14 - Valores experimentais de tensão máxima de membrana (ASME VIII Div.1).....	44
Tabela 15 - Valores analíticos de tensão de membrana (AD 2000).....	44
Tabela 16 - Diferenças percentuais de tensões de membrana das normas ASME VIII Div.1 e AD 2000	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AD 2000	<i>AD 2000 Merkblätter</i>
EN 13445	<i>Unfired Pressure Vessels</i>
PD 5500	<i>Specification for unfired, fusion welded pressure vessels</i>
CODAP	<i>Code de construction des Apareils a Pression</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
Ansys	Software computacional para análise via Métodos dos Elementos Finitos
WRC 107	<i>Welding Research Council Bulletin 107</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{circ}	Tensão circunferencial
σ_{long}	Tensão longitudinal
$\sigma_{\text{cascaASME}}$	Tensão máxima (crítica) da casca cilíndrica, segundo a norma ASME
$\sigma_{\text{tampoASME}}$	Tensão máxima (crítica) do tampo elíptico, segundo a norma ASME
R	Raio interno sem margem de corrosão
t	Espessura da parede do vaso
L	Comprimento do vaso
p	Pressão interna de projeto
L_h	Raio esférico do tampo elíptico, segundo a norma ASME
M	Fator geométrico do tampo elíptico, segundo norma ASME
t_h	Espessura adotada do tampo elíptico, segundo norma ASME
$\sigma_{\text{cascaAD2000}}$	Tensão máxima (crítica) da casca cilíndrica sem bocais, segundo norma AD 2000
D_a	Diâmetro externo da casca cilíndrica, segundo norma AD 2000
s_e	Espessura adotada da casca cilíndrica, segundo norma AD 2000
$\sigma_{\text{BocalAD2000}}$	Tensão máxima (crítica) na presença de um bocal, segundo norma AD 2000
A_p	Área pressurizada longitudinal do interior da casca cilíndrica e do bocal, segundo norma AD 2000
l_s	Altura mínima requerida do acoplamento, segundo norma AD 2000
A_σ	Soma das áreas longitudinais $A_{\sigma 1}$, $A_{\sigma 2}$, $A_{\sigma 3}$
b	Largura mínima requerida do anel de reforço, segundo norma AD 2000
D_i	Diâmetro interno da casca cilíndrica cilíndrica, segundo norma AD 2000
d_i	Diâmetro interno do casco bocal, segundo norma AD 2000
s_a	Espessura da parede da casca cilíndrica, segundo norma AD 2000
s_s	Espessura da parede do bocal, segundo norma AD 2000
K	Tensão de escoamento, segundo norma AD 2000
S	Fator de segurança, segundo norma AD 2000
c_1	Tolerância à corrosão, segundo norma AD 2000
c_2	Tolerância à manufatura, segundo norma AD 2000
$\sigma_{\text{tampoAD2000}}$	Tensão máxima (crítica) do tampo elíptico sem bocais, segundo norma AD 2000
β	Fator geométrico do tampo, segundo norma AD 2000
R_t	Raio esférico do tampo elíptico, segundo norma AD 2000
t_{CASCA}	Espessura mínima requerida da casca cilíndrica, segundo norma ASME

R_{ic}	Raio interno do cilíndrico com margem de corrosão, segundo norma ASME
S_a	Tensão admissível do material da casca, em função da temperatura de projeto, segundo norma ASME
E	Eficiência da junta soldada, segundo norma ASME
c	Tolerância à corrosão, segundo norma ASME
a	Tolerância à manufatura, segundo norma ASME
SCASCA	Espessura mínima requerida da casca cilíndrica, segundo norma AD 2000
STAMPO	Espessura mínima requerida do tampo elíptico, segundo norma AD 2000
D_{ic}	Diâmetro interno do cilíndrico com margem de corrosão, segundo norma ASME
v	Eficiência de junta, segundo a norma AD 2000
$\sigma_{BocalASME}$	Tensão máxima (crítica) na presença de um bocal, segundo norma ASME

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.3	JUSTIFICATIVAS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	TEORIA DAS CASCAS EM VASOS DE PRESSÃO DE PAREDE FINA	18
2.2	INFLUÊNCIA DOS BOCAIS EM PROJETOS DE VASOS DE PRESSÃO	19
2.3	TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO	20
2.4	CÓDIGO ASME.....	21
2.4.1	ASME VIII divisão 1 – regras para construção de vasos de pressão	22
2.4.2	ASME VIII, divisão 2 – regras para construção de vasos de pressão (regras alternativas)	22
2.4.3	ASME VIII, divisão 3 – regras para construção de vasos de pressão – regras alternativas para vasos de alta pressão	23
2.5	AD-MERKBLÄTTER (AD 2000)	23
2.6	CÁLCULO DE TENSÕES VIA ASME VIII DIVISÃO 1	24
2.6.1	Casca cilíndrica (sem bocais)	24
2.6.2	Tampo elíptico (sem bocais)	24
2.7	CÁLCULO DE TENSÕES VIA AD 2000.....	25
2.7.1	Casca cilíndrica (sem bocais)	25
2.7.2	Casca cilíndrica (com bocais)	26
2.7.3	Tampo elíptico (sem bocais)	27
2.7.4	Tampo elíptico (com bocais)	28
2.8	CÁLCULO DA ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA VIA ASME VII, DIV.1. 28	
2.8.1	Casca cilíndrica	28
2.8.2	Tampo elíptico	29

2.9	CÁLCULO DA ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA VIA AD 2000	29
2.9.1	Casca cilíndrica	29
2.9.2	Tampo elíptico	30
2.10	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	30
2.11	ANSYS WORKBENCH.....	33
2.12	DIMY	34
3	METODOLOGIA	35
3.1	DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO	35
3.2	PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DOS VASOS.....	36
3.2.1	Ansys	36
3.2.2	Propriedades geométricas do vaso	37
3.2.3	Parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel	39
3.2.3.1	Casca cilíndrica (ASME VIII Div.1)	39
3.2.3.2	Casca cilíndrica (AD 2000).....	39
3.2.3.3	Bocais (ASME VIII Div.1).....	40
3.2.3.4	Bocais (AD 2000)	40
3.2.3.5	Tampo elíptico (ASME VIII Div.1)	41
3.2.3.6	Tampo elíptico (AD 2000)	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	ESPESSURAS MÍNIMAS REQUERIDAS	42
4.2	TENSÕES MÁXIMAS DE MEMBRANA (VASO SEM BOCAIS).....	43
4.3	TENSÕES MÁXIMAS DE MEMBRANA (VASO COM BOCAIS).....	43
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo Telles (2007), vasos de pressão são quaisquer tipos de recipientes, com determinadas dimensões, formato ou finalidade, que são adequados para conter um fluido pressurizado. Dentre alguns exemplos, é possível citar desde uma simples panela de pressão de cozinha, até equipamentos mais sofisticados, como reatores. Os equipamentos ficam submetidos a um regime severo de operação, sem paradas diárias para manutenção e inspeção. Os inúmeros equipamentos formam uma cadeia contínua, por meio dos quais circulam fluidos de processo. Sendo assim, a falha ou paralisação de um único equipamento acarreta geralmente na paralisação de toda a instalação. Há muitas vezes condições de grande risco, por causa do manuseio de fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos ou em elevadas pressões ou temperaturas, podendo resultar em um desastre de grandes proporções.

Segundo Falcão (2008), vasos de pressão são equipamentos muito utilizados nas indústrias de processo, tais como refinarias de petróleo, petroquímicas, indústrias químicas e farmacêuticas. Estes equipamentos devem ser projetados e fabricados para evitar suas principais causas de falha, como:

- Deformação elástica excessiva, incluindo instabilidade elástica;
- Deformação plástica excessiva, incluindo instabilidade plástica;
- Altas tensões localizadas;
- Fluência a alta temperatura;
- Fratura frágil a baixa temperatura;
- Fadiga;
- Corrosão.

Ainda segundo Falcão (2008), tendo em vista diversos acidentes ocorridos no século XX com vasos de pressões, foram criados grupos de trabalho que passaram a criar critérios para projetos de fabricação e inspeção desse tipo de equipamento. Dentre códigos mais utilizados atualmente, pode-se citar os americanos *ASME Section VIII, Division 1 e Division 2*, o inglês PD 5500 (BS 5000), a norma europeia EN-13445, o alemão *AD-Merkblätter*, e o francês *CODAP – Code de construction des Appareils a Pression, Division 1 et Division 2*. Segundo a Figura 1, é ilustrado um exemplo de vaso de pressão.

Figura 1 - Exemplo de vaso de pressão.



Fonte: Projetechno: engenharia e consultoria (2022).

1.2 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho:

- Comparar os valores analíticos de tensões máximas de membrana obtidos pelas normas ASME VIII Div.1, AD 2000 de dois vasos de pressão (um com e outro sem bocais) de geometria pré-definida.
- Comparar os valores analíticos de espessura mínima da casca cilíndrica, tampo elíptico e dos bocais obtidos pelas normas ASME VIII Div.1, AD 2000 de dois vaso de pressão de geometria pré-definida (um com e outro sem bocais).
- Averiguar se os valores obtidos para ambas as normas vão de encontro com o que é descrito na literatura, para ilustrar em quais casos é mais conveniente usar uma norma ou outra.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Avaliar, mediante estudo de caso, as diferenças práticas entre a norma ASME VIII Div.1 e AD 2000, levando em consideração os parâmetros em comum como a espessura mínima da parede requerida e a máxima tensão de membrana.

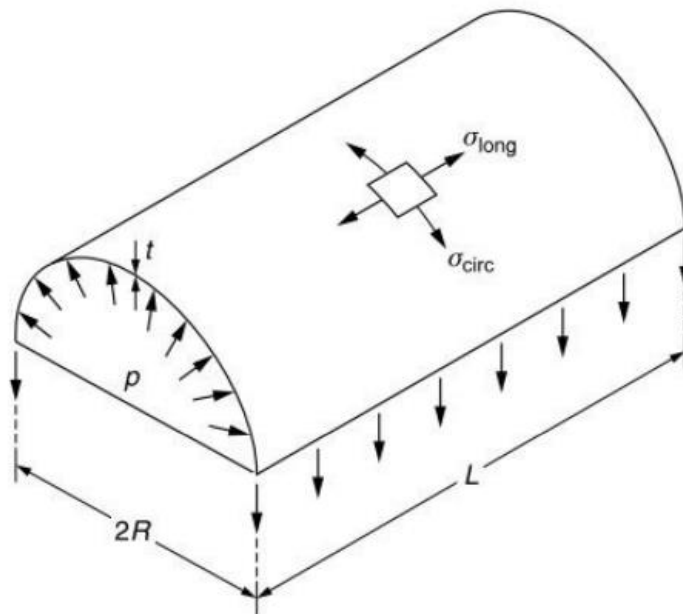
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo 2 é feita uma breve descrição sobre a teoria das cascas e a influência de bocais na integridade estrutural de vasos de pressão e tipos de vasos de pressão. Também foram apresentados os critérios teóricos e expressões matemáticas que descrevem os códigos de projeto ASME VIII Div.1 e AD 2000.

2.1 TEORIA DAS CASCAS EM VASOS DE PRESSÃO DE PAREDE FINA

Segundo Chattopadhyay (2005), vasos de paredes finas são cascas que tenham a relação R/t superior a 10, na qual R é o raio de curvatura e t é a espessura da parede, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Vaso de pressão de parede fina



Fonte: Chattopadhyay, adaptada (2005).

A casca cilíndrica da Figura 2 possui raio R , espessura t e comprimento L , submetido à uma pressão interna p . Considerando as extremidades fechadas, tensões são geradas no sentido longitudinal (σ_{long}), e circunferencial (σ_{circ}). Do equilíbrio ocorre a igualdade entre as forças que atuam na parede do cilindro e as devidas à pressão.

Pelo equilíbrio da seção de corte, é definida a expressão 2.1:

$$pL(2R) = 2tL(\sigma_{\text{circ}}) \quad (2.1)$$

Resultando na expressão 2.2:

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{pR}{t} \quad (2.2)$$

Pelo equilíbrio da seção transversal (perpendicular ao eixo da casca), é definida a expressão 2.3:

$$p\pi R^2 = (2\pi Rt)\sigma_{\text{long}} \quad (2.3)$$

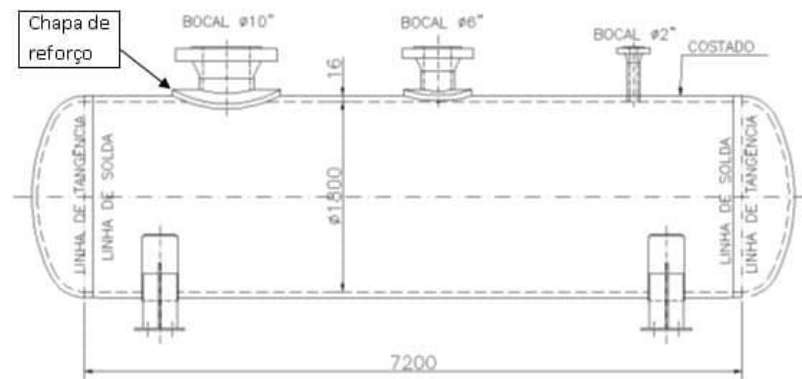
Resultando e na expressão 2.4:

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{pR}{2t} \quad (2.4)$$

2.2 INFLUÊNCIA DOS BOCAIS EM PROJETOS DE VASOS DE PRESSÃO

Segundo Krüger (2014), à respeito da integridade estrutural dos vasos de pressão, acidentes por ruptura desse tipo de equipamento podem ocorrer devido a falhas em bocais. Os bocais são aberturas feitas na parede do casco do equipamento a fim de criar uma interface do interior do equipamento com outros equipamentos ou com o ambiente externo. Procedimentos como a entrada e a saída de produto, o acesso ao interior do equipamento para limpeza ou inspeção, e a interligação com instrumentos ou válvulas, são feitos por meio de bocais. Os bocais geram descontinuidade geométrica na parede do vaso e conseqüentemente, uma concentração de tensões é criada ao redor da abertura. Essa ligação do bocal com a parede do vaso pode falhar em decorrência das tensões elevadas aplicadas ao material. Vale ressaltar que, além da pressão interna, os bocais também podem estar sujeitos a esforços externos provenientes de dilatação da tubulação a qual está conectado ou do peso de algum equipamento fixado ao bocal. Um exemplo de um vaso de pressão horizontal com bocais é ilustrado pela Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de vaso de pressão com bocais.

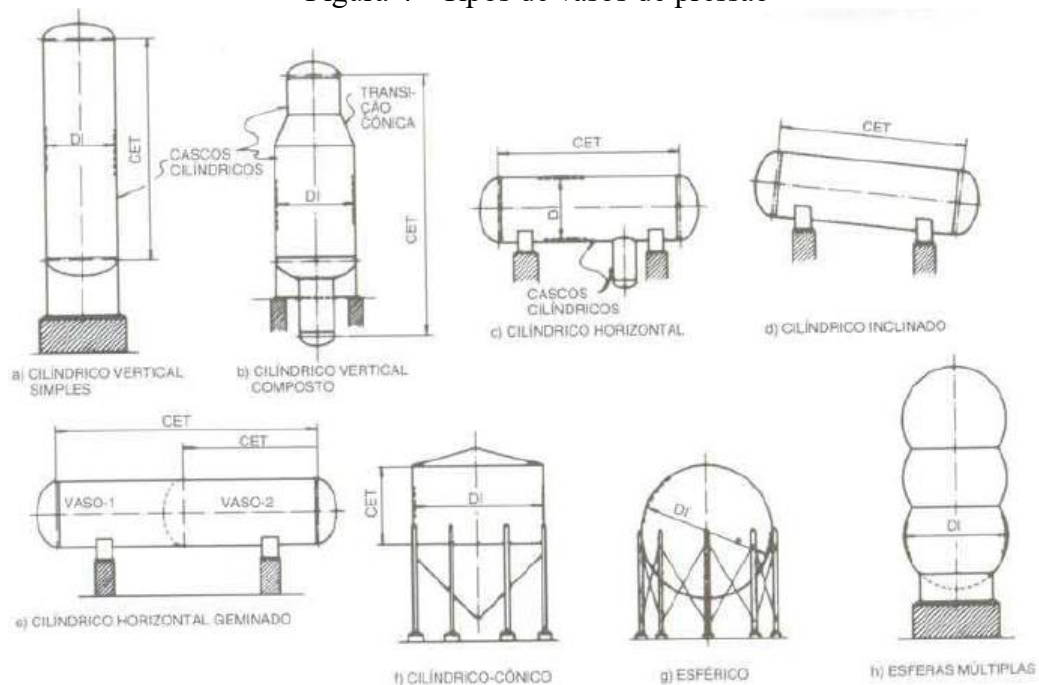


Fonte: Tercal: serviços técnicos e inspeções (2022).

2.3 TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO

De acordo com as aplicações, existem diferentes tipos de vasos de pressão, tais como vasos horizontais, verticais, vasos cônicos, inclinados, esféricos, entre outros, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Tipos de vasos de pressão



Fonte: Telles (2007).

Neste trabalho de graduação foi analisado um vaso horizontal, apoiado simetricamente em duas selas, apresentado na seção 3 (metodologia). Segundo Telles (2007), vasos horizontais

são utilizados principalmente para trocadores de calor e boa parte dos vasos de acumulação. Os vasos verticais, por sua vez, são empregados quando a ação gravitacional contribui para o escoamento do fluido, como em torres de fracionamento e reatores de catálise. Em geral, são mais caros em relação aos vasos horizontais, em função de seus grandes comprimentos, mas ocupam menor área de terreno.

2.4 CÓDIGO ASME

Segundo Falcão (2008), levando em conta diversos acidentes graves, ocorridos nos Estados Unidos no início do século XX, grupos de estudo passaram a definir critérios seguros de projeto, fabricação e inspeção de vasos de pressão, dando origem aos códigos de projeto. O primeiro código americano, para vasos, foi feito pelo ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), em 1925, com o título “*Rules for Construction of Pressure Vessels, Section VIII, 1925 Edition*”.

Atualmente o código ASME é dividido de acordo com as seguintes seções:

- Seção I – Código para Construção de Caldeiras;
- Seção II – Especificação de Materiais;
- Seção III – Regras para construção de Componentes Nucleares;
- Seção IV – Regras para construção de Caldeiras; *heating boiler* (caldeira de calefação);
- Seção V – Ensaio Não-Destrutivo;
- Seção VI – Regras recomendadas para manutenção e operação de caldeiras;
- Seção VII – Regras recomendadas para manutenção e operação de caldeiras;
- Seção VIII – Regras para construção de vasos de pressão;
- Seção IX – Qualificações de Soldagem e Brasagem;
- Seção X – Código de Vasos de Pressão e Caldeiras – Fibras – Vasos de Pressão com Reforçamentos Plásticos;
- Seção XI – Regras para Inspeção de Plantas e Componentes Nucleares;
- Seção XII – Regras para construção de Tranques Transportáveis.

A sessão utilizada como referência neste trabalho é a Seção VIII – Regras para construção de vasos de pressão. As características das três divisões da ASME VIII são destacadas à seguir.

2.4.1 ASME VIII divisão 1 – regras para construção de vasos de pressão

Segundo Telles (2007), essa é a norma mais de maior abrangência no Brasil e, em grande parte, no mundo. Ela estabelece regras capazes de dimensionar apenas os componentes principais de vasos de pressão (casco, bocais, reduções, tampos, flanges e reforços), submetidos à pressão interna ou externa.

Segundo Falcão (2008), este código limitasse à pressões interna, externa máxima de 103 kPa ou máxima de 20685 kPa e mínima de 103 kPa. Considera como critério de projeto a teoria da “máxima tensão de normal”. O código unicamente trata de dimensionamento para pressões nos componentes principais, não apresentando métodos para computação e avaliação. Para casos que envolvem fadiga, deve-se escolher entre a divisão 2 ou 3 (FALCÃO, 2008).

Por meio desta norma não é possível determinar a máxima tensão normal (também conhecida como tensão de membrana) na presença de bocais, sendo nesse caso necessário recorrer a métodos numéricos. O Método dos Elementos Finitos (MEF) será explicado em detalhes na seção 2.10, enquanto o cálculo analítico da máxima tensão de membrana na ausência de bocais, na seção 2.6

2.4.2 ASME VIII, divisão 2 – regras para construção de vasos de pressão (regras alternativas)

A divisão 2 do código ASME, foi criada em 1969 como alternativa à divisão 1, adotando critérios e detalhes de projeto, fabricação, exames e testes mais rigorosos e tensões admissíveis superiores, além de não limitar a pressão do projeto (FALCÃO, 2008).

Segundo Telles (2007), esse código leva em consideração um critério de projeto mais preciso. É adotada a teoria da “máxima tensão de cisalhamento”, conhecida do critério de Tresca. Essa norma é obrigatória para os vasos sujeitos à tensões (análise de fadiga), vasos de construção especiais e vasos para serviços muito severos, tal como fluidos tóxicos. Essa norma admite tensões maiores se comparado à divisão 1, o que resulta em menores espessuras e peso reduzido para o vaso. No entanto, a fim de garantir um mesmo grau de segurança ou maior, são feitas uma diversas exigências extras de projeto, cálculos, materiais, fabricação e inspeção, elevando o custo do projeto.

2.4.3 ASME VIII, divisão 3 – regras para construção de vasos de pressão – regras alternativas para vasos de alta pressão

Segundo Falcão (2008), a divisão 3 do código ASME surgiu recentemente, sendo empregada na maioria dos casos em equipamentos que operem em altas pressões, normalmente acima de 68995 kPa. No entanto, pode ser utilizada para pressões inferiores e não limitam a aplicabilidade, em função da pressão, das divisões 1 e 2. Apesar de ser parecida com a Divisão 2 nos critérios de projetos, sendo a teoria da máxima tensão de cisalhamento, a classificação e análise de tensões e avaliação de fadiga é mais rígida comparada à esta divisão.

2.5 AD-MERKBLÄTTER (AD 2000)

Atualmente o código alemão *AD-MERKBLÄTTER* é dividido de acordo com as seguintes seções:

- Seção A – Equipamento, instalação e marcação;
- Seção B – Projeto (“Design”);
- Seção G – Princípios básicos;
- Seção HP – Manufatura e teste;
- Seção N – Materiais não metálicos;
- Seção S – Casos especiais;
- Seção W – Materiais.

Assim como a ASME VIII Div.1, a norma alemã adota o critério da máxima tensão de membrana (máxima tensão normal), utilizado na seção B. Para vasos de pressões submetidos à fadiga, a sessão S é mandatória.

Segundo Falcão (2008), de maneira geral um equipamento calculado pela *AD-Merkblätter*, apresenta espessuras requeridas menores em comparação às demais normas. No Brasil, em alguns casos especiais de vasos com altas pressões, tais como esferas de armazenamento de gás liquefeito, esta norma é utilizada visando uma redução de espessura, evitando em alguns casos o tratamento térmico de alívio de tensões. No entanto, apesar das altas tensões admissíveis, deve-se ficar atento com a qualidade do material e a escolha do fabricante/montador para pré-requisitos da norma sejam atendidos de forma criteriosa. Diferente da norma americana, a AD 2000 permite o cálculo da máxima tensão de membrana

em vasos de pressão, considerando a presença de bocais. As metodologias de cálculo de tensões com e sem bocais de acordo com a AD 2000 serão apresentadas na seção e 2.7.

2.6 CÁLCULO DE TENSÕES VIA ASME VIII DIVISÃO 1

2.6.1 Casca cilíndrica (sem bocais)

Considerando a casca cilíndrica da figura 2, levando em conta teoria das cascas da seção 2.1, a ASME VIII Div.1 define a tensão circunferencial de acordo com a expressão 2.5:

$$\sigma_{\text{circ}} = \frac{pR}{t} + 0,6 p \quad (2.5)$$

Já a tensão longitudinal é adaptada de acordo com a expressão 2.6:

$$\sigma_{\text{long}} = \frac{pR}{2t} - 0,4 p \quad (2.6)$$

Como $\sigma_{\text{circ}} > \sigma_{\text{long}}$, é considerada a tensão circunferencial (σ_{circ}) como a tensão superficial crítica (máxima), que nesse trabalho será nomeada como “ $\sigma_{\text{cascaASME}}$ ”.

2.6.2 Tampo elíptico (sem bocais)

Considerando o tampo elíptico da figura 5, a máxima tensão de membrana em MPa ($\sigma_{\text{tampoASME}}$) é dada pela expressão 2.7.

$$\sigma_{\text{tampoASME}} = \frac{pLhM}{th} + 0,2 p \quad (2.7)$$

Onde:

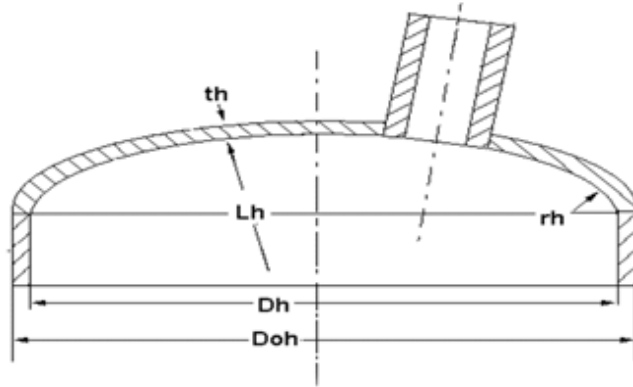
Lh – raio esférico (0,8 x Diâmetro externo), em mm;

M – fator geométrico do tampo;

th – espessura de projeto adotada (real), em mm;

p – Pressão de projeto, em MPa.

Figura 5- Ilustração de um tampo elíptico



Fonte: Software DIMy (2009).

2.7 CÁLCULO DE TENSÕES VIA AD 2000

2.7.1 Casca cilíndrica (sem bocais)

Para o cálculo da espessura mínima requerida de cascos cilíndricos submetidos à pressão interna é utilizada a teoria da máxima tensão de membrana para cilindros, conforme explicado na seção 2.5.

De acordo com o código AD-MERKBLÄTTER, a máxima tensão de membrana é representada pela expressão 2.8:

$$\sigma_{\text{cascaAD2000}} = \frac{p(D_a + s_e)}{2s_e} \quad (2.8)$$

Onde:

$\sigma_{\text{cascaAD2000}}$ – Máxima tensão de membrana no casco, em MPa;

p - Pressão de projeto, em MPa;

D_a – Diâmetro externo do casco, em mm;

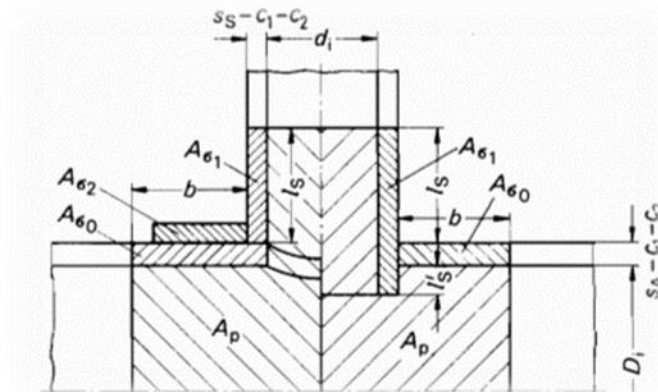
s_e – espessura adotada, em mm.

2.7.2 Casca cilíndrica (com bocais)

Diferente da norma americana ASME VIII Div.1, a norma alemã AD 2000 permite o cálculo analítico da tensão máxima de membrana, considerando a presença de bocais.

A seção longitudinal de um bocal cilíndrico é ilustrada pela Figura 6.

Figura 6 – Seção longitudinal de um bocal cilíndrico



Fonte: AD 2000 (2003).

A expressão (2.9) representa o cálculo da tensão de membrana máxima:

$$\sigma_{\text{bocalAD2000}} = p \left(\frac{A_p}{A_{\sigma}} + 0,5 \right) \leq K/S \quad (2.9)$$

Onde:

A_p – área pressurizada longitudinal do interior da casca cilíndrica e do acoplamento, em mm^2 (expressão 2.10);

l_s – altura mínima requerida do acoplamento, em mm (expressão 2.11);

A_{σ} – Soma das área longitudinais (expressão 2.13) da parede da casca cilíndrica ($A_{\sigma 0}$ – expressão 2.14), do acoplamento ($A_{\sigma 1}$ – expressão 2.15) e do reforço ($A_{\sigma 2}$ – expressão 2.16), em mm^2 ;

b – largura mínima requerida do anel de reforço, em mm;

D_i – Diâmetro interno da casca cilíndrica, em mm;

d_i – Diâmetro interno do bocal, em mm;

s_a – Espessura da parede da casca cilíndrica, em mm;

s_s - Espessura da parede do bocal cilíndrico, em mm;

K – Tensão de escoamento, em MPa;

- S – Fator de segurança;
 c1 - tolerância à corrosão;
 c2 - tolerância à manufatura;
 D_{ref} – Diâmetro externo do reforço;
 d_{ref} – Diâmetro interno do reforço.

$$A_p = \frac{D_i}{2} \left[b + (s_a - c_1 - c_2) + \frac{d_i}{2} \right] + \left(l_s \frac{d_i}{2} \right) \quad (2.10)$$

$$l_s = 1.25 \sqrt{[(d)_i + s_s - c_1 - c_2](s_s - c_1 - c_2)} \quad (2.11)$$

$$b = \sqrt{[(D)_i + s_a - c_1 - c_2](s_s - c_1 - c_2)} \quad (2.12)$$

$$A_\sigma = A_{\sigma 0} + A_{\sigma 1} + A_{\sigma 2} \quad (2.13)$$

$$A_{\sigma 0} = [b + (s_a - c_1 - c_2)] (s_a - c_1 - c_2) \quad (2.14)$$

$$A_{\sigma 1} = l_s (s_s - c_1 - c_2) \quad (2.15)$$

$$A_{\sigma 2} = [(D_{ref} - d_{ref})/2] t_{ref} \quad (2.16)$$

A expressão 2.9 baseia-se no princípio de que entre a área sob pressão (A_p) e área longitudinal total submetida à carga (A_0).

2.7.3 Tampo elíptico (sem bocais)

Segundo a AD 2000, a máxima tensão de membrana em função da pressão interna é dada pela expressão (2.17):

$$\sigma_{\text{tampoAD2000}} = \frac{p D a \beta}{40 s_e} \quad (2.17)$$

Onde:

- σ_{tampo} – Máxima tensão de membrana no tampo, em MPa;
 p - Pressão de projeto, em MPa;
 β – Fator de geométrico do tampo;
 D_a – Diâmetro externo do casco, em mm;
 s_e – espessura adotada, em mm.

2.7.4 Tampo elíptico (com bocais)

Para o caso do tampo elíptico, as formulas (2.9) e (2.11) também se aplicam, porém a área “ A_p ” é representada pela fórmula (2.18), e “ b ” pela equação (2.19)

$$A_p = \frac{\pi R_t^2}{b + \frac{D_a}{2}} + \frac{d_i l_s}{2} \quad (2.18)$$

$$b = \sqrt{[(R)_t + s_a - c_1 - c_2](s_s - c_1 - c_2)} \quad (2.19)$$

Onde:

R_t – Raio do tampo elíptico (0,8 x diâmetro externo), em mm.

2.8 CÁLCULO DA ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA VIA ASME VII, DIV.1

2.8.1 Casca cilíndrica

Agora considerado a tensão circunferencial (σ_{circ}) devido à pressão interna, da fórmula (2.5), como sendo a tensão máxima admissível (S), a espessura mínima requerida da casca cilíndrica é representada pela expressão (2.20):

$$t_{rCASCA} = \frac{pR_{ic}}{S_a E - 0,6p} + c + a \quad (2.20)$$

Onde:

t_r = espessura mínima requerida da casca cilíndrica, em mm;

p = pressão interna de projeto, em MPa;

R_{ic} = raio interno do cilindro com margem de corrosão, em mm;

S_a = tensão admissível do material da casca, em função da temperatura de projeto, em MPa;

E = eficiência das juntas soldadas;

c = tolerância de corrosão, em mm;

a = tolerância de manufatura, em mm.

2.8.2 Tampo elíptico

Agora considerado a máxima tensão de membrana no tampo (σ_{tampo}) devido à pressão interna, da fórmula (2.5), como sendo a tensão máxima admissível (S), a espessura mínima requerida do tampo elíptico é representada pela expressão (2.21):

$$t_{\text{TAMPO}} = \frac{pL_h M}{S_h E_h + 0,2p} + c + a \quad (2.21)$$

Onde:

- t_r - espessura mínima requerida do tampo, em mm;
- p - pressão interna de projeto, em MPa;
- L_h - raio esférico (0,8 x Diâmetro externo), em mm;
- S_h - tensão admissível do tampo em função da temperatura de projeto, em MPa;
- E_h - eficiência das juntas soldadas do tampo;
- c - tolerância de corrosão, em mm;
- a - tolerância de manufatura, em mm;
- M - fator geométrico do tampo elíptico.

2.9 CÁLCULO DA ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA VIA AD 2000

2.9.1 Casca cilíndrica

Para o cálculo da espessura mínima requerida de cascas cilíndricas submetidas à pressão interna é utilizada a teoria da máxima tensão de membrana para cilindros, previamente apresentada nesse trabalho.

De acordo com o código AD 2000, item B1.5, a espessura mínima requerida para cascas cilíndricas é calculada pela expressão (2.22):

$$s_{\text{CASCA}} = \frac{D_a p}{20 \frac{K}{S} v + p} + c_1 + c_2 \quad (2.22)$$

Onde:

- s_{CASCA} - espessura mínima requerida, em mm;
- p - pressão interna de projeto, MPa;

- D_a - diâmetro externo do tampo, em mm;
- S - Fator de segurança na temperatura de design, em mm;
- K - Tensão de escoamento na temperatura de design, em mm;
- v - eficiência de junta;
- c_1 - tolerância à corrosão, em mm;
- c_2 - tolerância à manufatura, em mm.

2.9.2 Tampo elíptico

De acordo com o código AD 2000, item B1.5, a espessura mínima requerida para cascas cilíndricas é calculada pela seguinte expressão 2.23:

$$STAMPO = \frac{D_a p \beta}{40 \frac{K}{S} v + p} + c_1 + c_2 \quad (2.23)$$

Onde:

- $STAMPO$ - espessura mínima requerida do tampo, em mm;
- p - pressão interna de projeto, em MPa;
- D_a - diâmetro externo do tampo, em mm;
- S - Fator de segurança na temperatura de design;
- K - Tensão de escoamento na temperatura de design, em mm;
- v - eficiência de junta;
- c_1 - tolerância à corrosão, em mm;
- c_2 - tolerância à manufatura, em mm;
- β - fator de forma do tampo elíptico.

2.10 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

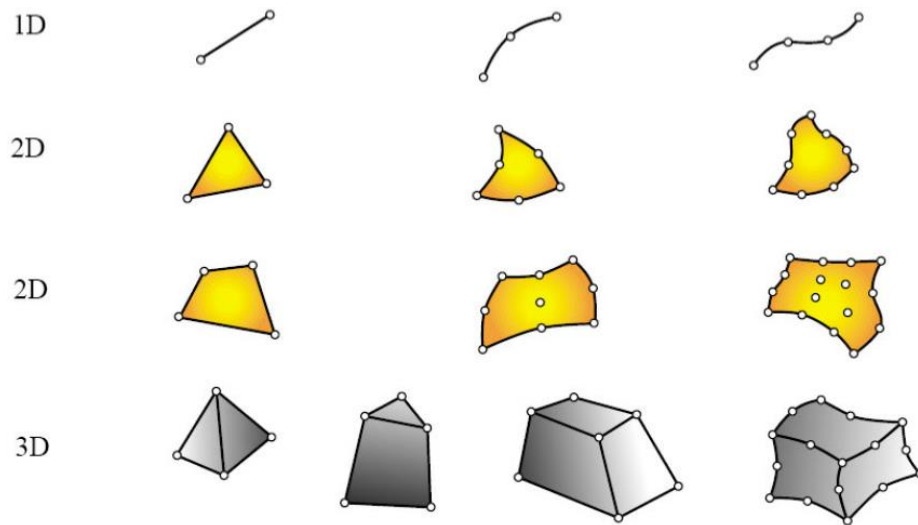
Segundo Azevedo (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) busca determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria pré-estabelecida sujeito a forças externas. Quando há a necessidade de projetar uma estrutura, é comum recorrer a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com para se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

Segundo Ribeiro (2004), a maior dos problemas de engenharia são avaliados por meio dos princípios gerais da Mecânica do Contínuo. Este ramo da mecânica considera a matéria como sendo um meio contínuo, sem vazios interiores, desprezando sua estrutura molecular. Assim, na Mecânica do Contínuo os princípios da física são formulados através de equações diferenciais. Os efeitos da estrutura interna molecular dos materiais são considerados de forma macroscópica utilizando das equações constitutivas do material.

Segundo Azevedo (2003), para que fosse executada a resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que descrevem um certo fenômeno físico, considerando condições de contorno adequadas, era comum recorrer a séries de Fourier. Devido à sua complexidade, estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples. Para superar algumas destas limitações, era comum substituir derivadas exatas por derivadas aproximadas, calculadas com base em grelhas de pontos. Desta aplicação surge o método das diferenças finitas, que, antes do surgimento dos computadores, apresentava o inconveniente de requerer a resolução de grandes sistemas de equações lineares. Com o grande desenvolvimento do MEF na década de 60 e a popularização do acesso aos computadores, passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a tipos de carregamento variados.

A premissa básica do método de elementos finitos é dividir para conquistar. O corpo é dividido em um número finito de partes, chamadas de elementos. O comportamento individual do elemento quando submetido a certas condições é conhecido e, com base nesse conhecimento, o comportamento do corpo inteiro é determinado. Os elementos possuem pontos para interligação com seus vizinhos, que são conhecidos como “nós”. Cada elemento possui normalmente um nó em cada vértice, mas também existem elementos com nós adicionais, chamados elementos de alta ordem, mais complexos e que permitem representações polinomiais quadráticas que resultam em maior precisão. Diversos tipos de elementos foram desenvolvidos com formas geométricas variadas em função do tipo e da quantidade de dimensões do problema. (KRÜGER, 2014). A Figura 7 ilustra a geometria de certos tipos de elementos finitos.

Figura 7 – Elementos finitos uni, bi e tridimensionais.

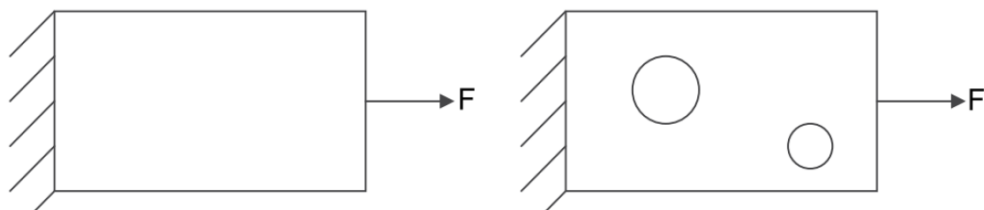


Fonte: Azevedo (2003).

Segundo Fish (2007), apesar das diversas aplicações do MEF, tais como análise de temperatura em sistemas eletrônicos, fluxo de ar em torno de um avião, campos magnéticos em motores, e concentrações de substâncias em sistemas químicos, a aplicação difundida atualmente é em análise estrutural, para determinar como um corpo reage quando submetido a esforços. A análise de tensões em vasos de pressão se enquadra nesse tipo de análise.

Segundo Agarwal (2013), em análise estrutural, o MEF pode ser utilizado por exemplo para determinar a localização e a magnitude da tensão crítica e a deformação em uma estrutura. Conforme exemplificado na Figura 8, o MEF pode ser utilizado em estruturas sem solução teórica disponível e geometrias variadas. Caso contrário não haveria outra saída senão o uso de técnicas experimentais que gastam muito tempo e recursos financeiros.

Figura 8 – Esquerda: placa sólida (solução teórica disponível)
Direita: placa com furos (solução teórica indisponível)



Fonte: Agarwal, adaptada (2013).

Segundo Liu & Quek (2003), o problema estrutural se trata de escrever equações governantes que descrevem o material e como ele se comporta para posteriormente solucionar

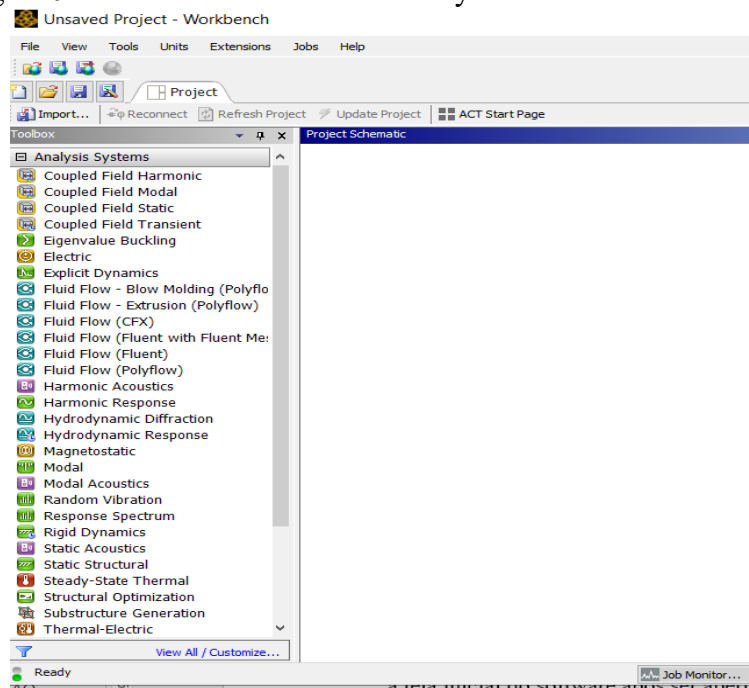
tais equações, considerando uma peça submetida à certas condições de contorno. Porém, cada solução é única para um determinado caso, ou seja, não há uma simples resposta em forma de equação.

2.11 ANSYS WORKBENCH

Segundo Queiroz (2008), o Pacote Workbench possibilita realizar diversos tipos de simulação. Contempla tecnologias, tais como CFD, MEF (método dos elementos finitos) e ferramentas de otimização de Design. O pacote é organizado por meio de guias e etapas a fim de que a interface seja mais familiar ao usuário. Ao iniciar um projeto, o guia fornece-lhe o acesso às ferramentas necessárias para processar a geometria, criar as condições de contorno (cargas, restrições, materiais), resolver o problema específico e criar resultados razoáveis de visualização (imagens e animações) e relatórios sobre os resultados. De acordo com a empresa, o sistema foi construído para proporcionar ao usuário fácil orientação no âmbito da sua interface, com acesso rápido às tarefas, onde cada etapa realizada é salva em extensões distintas, sendo possível à guia mostrar as várias etapas feitas, as tarefas que você empregou e como poderia proceder em etapas futuras.

A tela inicial do software é ilustrada pela Figura 9.

Figura 9 - Tela inicial do software Ansys e seus sistemas de análise.



Fonte: Software Ansys (2022).

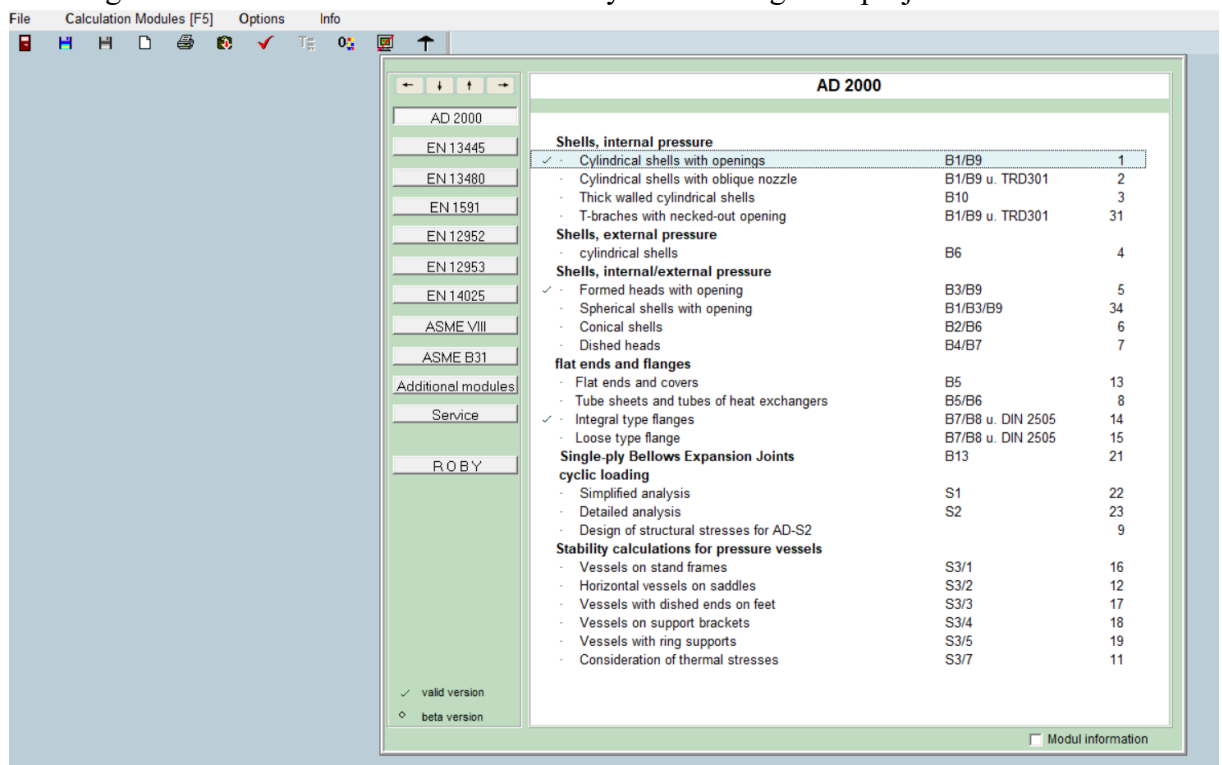
2.12 DIMY

Para auxiliar no cálculo dos parâmetros apresentados nas seções “Resultados e Discussões”, referentes às normas ASME VIII Div.1 e AD-Merkblätter foi utilizada a versão de demonstração do software denominado DIMy, da empresa TÜV NORD. Esta que é uma empresa de engenharia, e entre seus serviços está a utilização desse software que possibilita o design e aprovação de vasos de pressão.

Esse software também contempla a análise de vasos de pressão de outras normas internacionais, como a inglesa EN 13445, a WRC 107 (dimensionamento em função da pressão externa), entre outros.

A tela inicial do software é ilustrada pela Figura 10.

Figura 10 – Tela inicial do software DIMy e seus códigos de projeto.



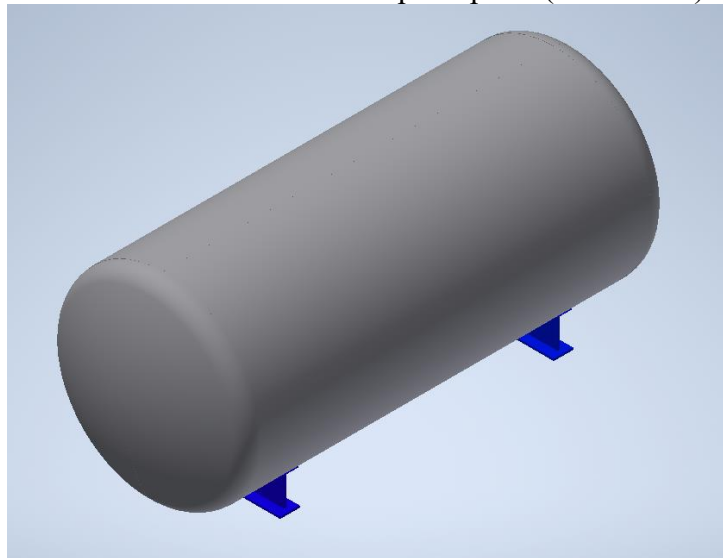
Fonte – Software DIMy (2009).

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

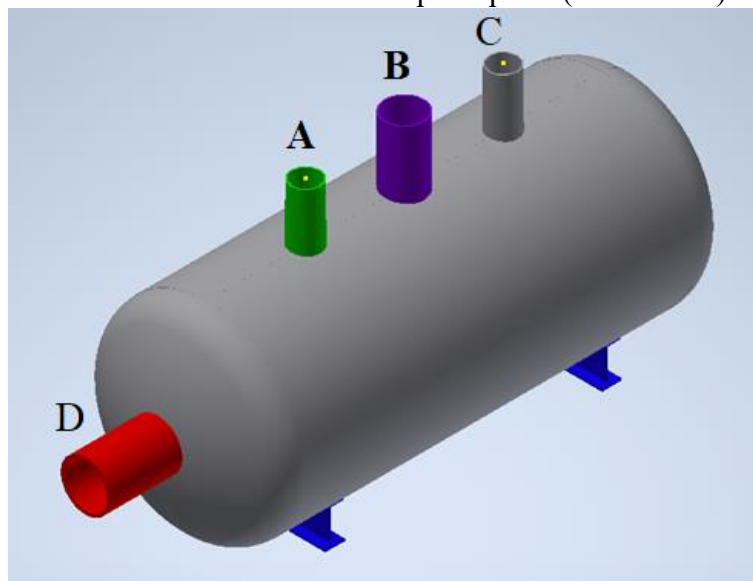
A metodologia deste trabalho foi fundamentada na análise de tensões de membrana e espessuras mínimas requeridas em dois estudos de caso: um vaso horizontal bi apoiado sem bocais, representado pela Figura 11 e outro com bocais, mas sem anel de reforço, representado pela Figura 12, submetidos a uma pressão interna de 11 bar (1,1 MPa) e temperatura de operação igual a 50°C.

Figura 11 - Vaso horizontal com tampo elíptico (sem bocais).



Fonte: Software Autodesk Inventor (2023).

Figura 12 - Vaso horizontal com tampo elíptico (com bocais)



Fonte: Software Autodesk Inventor (2023).

O software de dimensionamento de dispositivos de pressão “DIMy” junto com o Excel são utilizados para auxiliar no cálculo dos seguintes parâmetros analíticos referentes a ambas as normas, sendo eles:

- A máxima tensão ao redor dos bocais A, B, C, D ($\sigma_{\text{BocalAD2000}}$), exclusivamente pela norma AD 2000;
- Espessura mínima da parede requerida da casca cilíndrica, do tampo elíptico e dos bocais A, B, C e D para ambas as normas (t_r e s).

Quanto à máxima tensão de membrana na ausência de bocais ($\sigma_{\text{cascaASME}}$, $\sigma_{\text{tampoASME}}$, $\sigma_{\text{CascaAD2000}}$, $\sigma_{\text{TampoAD2000}}$), foram calculados exclusivamente via Excel para ambas as normas.

O software de elementos finitos “Ansys” é utilizado apenas para obter a máxima tensão de membrana ao redor dos bocais A, B, C, D, segundo a ASME VIII Div.1 ($\sigma_{\text{BocalASME}}$),

Por fim foi feita uma comparação entre os resultados obtidos e discutido se eles são condizentes com o que é descrito na literatura.

Vale ressaltar que para cálculos dos parâmetros analíticos foram considerados materiais da casca, tampo e bocais equivalentes entre as normas AD 2000 e ASME VIII Div.1. Eles serão descritos nas seções 3.2.3.1 à 3.2.3.6.

3.2 PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DOS VASOS

3.2.1 Ansys

No Ansys, a fim de obter a máxima tensão de membrana segundo a ASME VIII Div. 1, foram consideradas as seguintes propriedades do aço estrutural, para uma temperatura de projeto de 50°C como mostra a Figura 13:

- Tensão última à tração: 410 MPa;
- Tensão de escoamento: 220 MPa;
- Módulo de Young: 200 GPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,3;
- Massa específica: 7850 kg/m³.

Figura 13 - Propriedades mecânicas do aço estrutural.

Properties of Outline Row 3: Aço vaso de pressão				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus a...		
6	Young's Modulus	200	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+08	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+07	Pa	
10	Tensile Yield Strength	220	MPa	
11	Tensile Ultimate Strength	415	MPa	

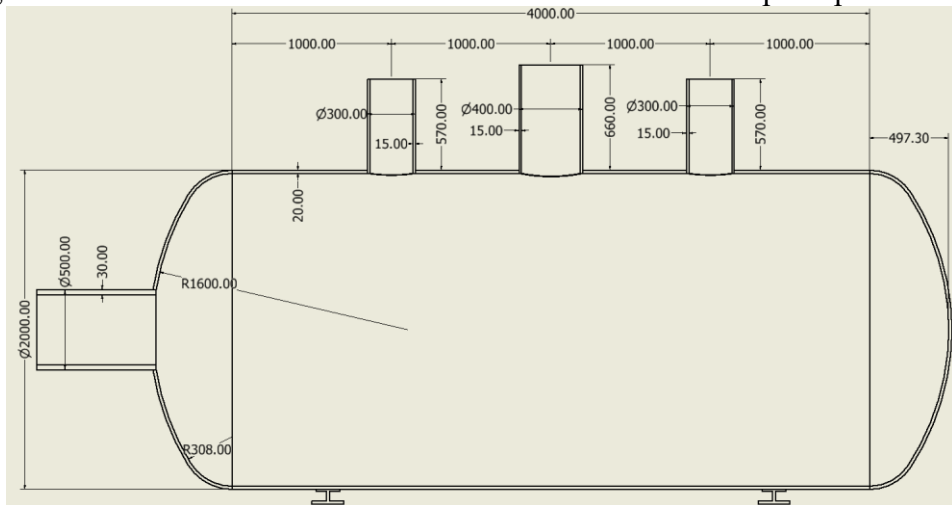
Fonte: Software Ansys (2022).

O Ansys é utilizado para obtenção da tensão máxima atingida na presença de bocais de acordo com a norma ASME VIII Div.1, uma vez que a norma não disponibiliza métodos analíticos para o cálculo da mesma, ao contrário da norma AD 2000. Tais análises foram realizadas considerando hipóteses de isotropia, homogeneidade e linearidade do material utilizando o software comercial ANSYS WORKBENCH 2022. Por isotrópico, admite-se que o material possui os mesmos valores das propriedades mecânicas em todas as direções. Por homogêneo, entende-se que o material não apresenta nenhuma descontinuidade ou falha interna e finalmente, por comportamento linear, foi admitido que durante toda a análise, os níveis de tensões não ultrapassaram o limite de escoamento do material.

3.2.2 Propriedades geométricas do vaso

Os dados geométricos da casca e do tampo elíptico são apresentados na tabela 1, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Vista em corte do vaso cilíndrico com bocais e tampo elíptico.



Fonte: Software Autodesk Inventor (2023).

Tabela 1 - Dados geométricos da casca e do tampo.

Diâmetro externo	2000 mm
Comprimento	4000 mm
Espessura adotada (casca e tampa)	20 mm
Tampo elíptico: Raio maior	1600 mm (0,8*2000)
Raio menor	308 mm (0,154*2000)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados geométricos dos bocais A, B, C e D são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Dados geométricos dos bocais

Descrição	A	B	C	D
Diâmetro externo (mm)	300	400	300	500
Comprimento (mm)	570	660	570	750
Espessura adotada (mm)	20	20	20	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel

3.2.3.1 Casca cilíndrica (ASME VIII Div.1)

Os dados referentes ao material da casca, segundo a norma ASME VIII Div.1, são apresentados na tabela 3 e foram inseridos como parâmetros de entrada no software “DIMy” e na planilha de cálculos em Excel.

Tabela 3 - Propriedades da casca cilíndrica, segundo ASME VIII Divisão 1

Tolerância à corrosão (arbitrado)	$c = 3,2 \text{ mm}$
Tolerância de fabricação (calculado)	$a = 2,5 \text{ mm} (0,125 * e)$
Espessura nominal (arbitrado)	$e = 20 \text{ mm}$
Diâmetro externo nominal (arbitrado)	2000 mm
Diâmetro interno corrosão (calculado)	$D_{ic} = 1966,4 \text{ mm} (2000 - 2*e + 2*c)$
Raio interno corrosão (calculado)	$R_{ic} = 983,2 (D_{ic} / 2)$
Eficiência de junta (arbitrado)	$E = 1$
Tensão admissível à 50°C (arbitrado)	$S_a = 117,9 \text{ MPa}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço carbono SA-516, classe 60, K02100.

3.2.3.2 Casca cilíndrica (AD 2000)

Os dados referentes ao material da casca, segundo a norma AD2000, são apresentados na tabela 4 e foram inseridos como parâmetros de entrada no software “DIMy” e na planilha de cálculos em Excel.

Tabela 4 - Propriedades da casca cilíndrica, segundo AD2000

Tolerância à corrosão	$c2 = 0,5 \text{ mm}$
Tolerância de fabricação	$c1 = 1 \text{ mm}$
Diâmetro externo	$D_a = 2000 \text{ mm}$
Eficiência de junta	$v = 1$
Tensão de admissível à 50°C	$K/S = 180 \text{ MPa}$
Fator de segurança	$S = 1,5$
Tensão de escoamento à 50°C	$K = 270 \text{ MPa}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço 15 Mo 3 (1.5415) – DIN 17155.

3.2.3.3 Bocais (ASME VIII Div.1)

Os dados referentes ao material dos acoplamentos A, B, C e D, segundo a norma ASME VIII Divisão 1, são apresentados na tabela 5, sendo utilizados como parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel.

Tabela 5 - Propriedades dos bocais, segundo ASME VIII Divisão 1

Descrição	A	B	C	D
Tolerância à corrosão “c” (mm)	3,2	3,2	3,2	3,2
Tolerância de fabricação “a” (mm)	1,88	1,88	1,88	2,5
Raio interno corrosão “R _{ic} ” em mm	138,2	188,2	138,2	223,2
Eficiência de junta “E” (mm)	1	1	1	1
Tensão admissível à 50°C “S _a ” (mm)	102,9	102,9	102,9	102,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço 35.8 (1.0305) para os bocais A, B, C e D.

3.2.3.4 Bocais (AD 2000)

Os dados referentes ao material dos acoplamentos A, B, C e D, segundo a norma AD 2000, são apresentados na tabela 6, sendo utilizados como parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel.

Tabela 6 - Propriedades dos bocais, segundo AD 2000

Descrição	A	B	C	D
Tolerância à corrosão “c2” (mm)	1	1	1	1
Tolerância de fabricação “c1” (mm)	0,5	0,32	0,38	0,32
Diâmetro interno corrosão “D _a ” (mm)	300	400	300	500
Eficiência de junta “v” (mm)	1	1	1	1
Tensão admissível à 50°C “K/S” (MPa)	156,7	156,7	156,7	150
Fator de segurança (S)	1,5	1,5	1,5	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço 35.8 (1.0305) – DIN 17155 para os bocais A, B, C e D.

3.2.3.5 Tampo elíptico (ASME VIII Div.1)

Os dados referentes ao material do tampo, segundo a norma ASME VIII Divisão 1, são apresentados na tabela 7, sendo utilizados como parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel.

Tolerância à corrosão	$c = 3,2 \text{ mm}$
Tolerância de fabricação	$a = 2,5 \text{ mm} (0,125 * e)$
Raio esférico	$L_h = 1600 \text{ mm} (2000*0,8)$
Eficiência de junta	$E = 1$
Tensão admissível à 50°C	$S_h = 117,9 \text{ MPa}$
Fator de forma	$M = 1,31$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço SA-516, classe 60, K02100.

3.2.3.6 Tampo elíptico (AD 2000)

Os dados referentes ao material do tampo, segundo a norma AD 2000, são apresentados na tabela 8, sendo utilizados como parâmetros de entrada no software “DIMy” e Excel.

Tolerância à corrosão	$c_2 = 0,5 \text{ mm}$
Tolerância de fabricação	$c_1 = 1 \text{ mm}$
Diâmetro externo	$D_a = 2000 \text{ mm}$
Eficiência de junta	$v = 1$
Tensão de escoamento à 150°C	$K = 270 \text{ MPa}$
Fator de segurança	$S = 1,5$
Fator de forma	$\beta = 2,33$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado o aço 15 Mo 3 (1.5415) - DIN 17155.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESPESSURAS MÍNIMAS REQUERIDAS

Utilizando as equações 2.20, 2.21, 2.22 e 2.23, os valores obtidos de espessura mínima da parede da casca cilíndrica, do tampo e dos bocais A, B, C e D de acordo com a ASME Divisão 1 e AD 2000 são apresentados nas tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 9 - Cálculo das espessuras requeridas mínimas segundo a ASME Div.1

$$t_{rCasca} = \frac{pR_{ic}}{S_a E - 0,6p} + c + a \quad \left| \quad t_{rTampo} = \frac{pL_h M}{S_h E_h + 0,2p} + c + a \right.$$

Descrição	Símbolo	Valor (mm)
Espes. Mín Casca	t_{rCasca}	14,92
Espes. Mín Tampo	t_{rTampo}	15,5
Espes. Mín Bocal A	trA	6,56
Espes. Mín Bocal. B	trB	7,10
Espes. Mín Bocal C	trC	6,56
Espes. Mín Bocal D	trD	9,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Cálculo das espessuras requeridas mínimas segundo a AD 2000

$$s_{SCASCA} = \frac{D_a p}{20 \frac{K}{S} v + p} + c_1 + c_2 \quad \left| \quad s_{STAMPO} = \frac{D_a p \beta}{40 \frac{K}{S} v + p} + c_1 + c_2 \right.$$

Descrição	Símbolo	Valor (mm)
Espes. Mín Casca	s_{Casca}	7,49
Espes. Mín Tampo	s_{Tampo}	8,62
Espes. Mín Bocal A	sA	2,34
Espes. Mín Bocal B	sB	2,74
Espes. Mín Bocal C	sC	2,34
Espes. Mín Bocal D	sD	3,23

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença percentual entre os parâmetros é mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Diferenças percentuais entre as espessuras mínimas.

$$(tr/s - 1) \times 100\%$$

Espes. Mín. Casca	99,2%
Espes. Mín. Tampo	79,7%
Espes. Mín. Bocal. A	180,5%
Espes. Mín. Bocal. B	159,2%
Espes. Mín Bocal. C	180,5%
Espes. Mín Bocal. D	189,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise da Tabela 11 é possível afirmar que a norma americana ASME VIII Div.1 é realmente mais conservadora se comparada a norma alemã AD 2000, conforme descrito na seção 2.5, em termos de espessura mínima para cada um componentes listados (casca, tampo, bocal A, bocal B, bocal C, bocal D).

4.2 TENSÕES MÁXIMAS DE MEMBRANA (VASO SEM BOCAIS).

Utilizando as expressões 2.5, 2.7, 2.8 e 2.17, os valores obtidos de tensão máxima de membrana, na ausência de bocais, da parede da casca cilíndrica e do tampo de acordo com a ASME Div. 1 e AD 2000 são apresentados nas tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12 - Cálculo das tensões máximas segundo a ASME VIII Div. 1

$$\sigma_{\text{cascaASME}} = \frac{pR_{ic}}{t} + 0,6 p \quad \left| \quad \sigma_{\text{tampoASME}} = \frac{pLhM}{th} + 0,2 p\right.$$

Descrição	Símbolo	Valor (MPa)
Máxima tensão membrana (casca)	$\sigma_{\text{cascaASME}}$	55,66
Máxima tensão membrana (tampo)	$\sigma_{\text{tampoASME}}$	57,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Cálculo das tensões máximas segundo a AD 2000

$$\sigma_{\text{cascaAD2000}} = \frac{p(D_a + s_e)}{2s_e} \quad \left| \quad \sigma_{\text{tampoAD2000}} = \frac{pDa\beta}{40s_e}\right.$$

Descrição	Símbolo	Valor (MPa)
Máxima tensão membrana (casca)	$\sigma_{\text{cascaAD2000}}$	55,55
Máxima tensão membrana (tampo)	$\sigma_{\text{tampoAD2000}}$	60,76

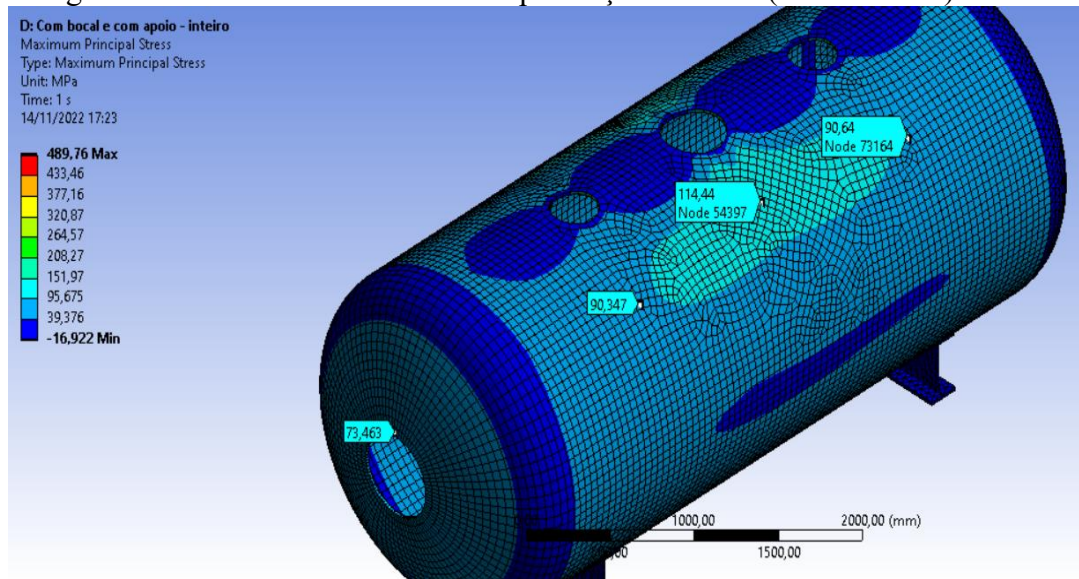
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os valores de tensão máxima de membrana das tabelas 12 e 13 para as normas ASME VIII Div.1 e AD 2000 não há diferença percentual significativa.

4.3 TENSÕES MÁXIMAS DE MEMBRANA (VASO COM BOCAIS)

Os valores obtidos de tensão máxima de membrana, na presença de bocais, via MEF (norma ASME VIII Div.1), conforme figura 15, são mostrados na tabela 14.

Figura 15 - Tensões de membrana na presença de bocais (ASME Div.1)



Fonte: Software Ansys (2022).

Tabela 14 - Valores experimentais de tensão máxima de membrana (ASME VIII Div.1)

$\sigma_{\text{BocalASME}}$		
Descrição	Símbolo	Valor (MPa)
Máxima tensão membrana ao redor de "A" (casca)	$\sigma_{\text{BocalASMEA}}$	90,35
Máxima tensão membrana ao redor de "B" (casca)	$\sigma_{\text{BocalASMEB}}$	114,44
Máxima tensão membrana ao redor de "C" (casca)	$\sigma_{\text{BocalASMEC}}$	90,64
Máxima tensão membrana ao redor de "D" (tampo)	$\sigma_{\text{BocalASMED}}$	73,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 15 mostra os valores obtidos analiticamente pela equação 2.9 para a norma AD2000.

Tabela 15 - Valores analíticos de tensão de membrana (AD 2000)

$\sigma_{\text{BocalAD2000}} = p \left(\frac{Ap}{A\sigma} + 0,5 \right)$		
Descrição	Símbolo	Valor (MPa)
Máxima tensão membrana ao redor de "A" (casca)	$\sigma_{\text{BocalAD2000A}}$	85,6
Máxima tensão membrana ao redor de "B" (casca)	$\sigma_{\text{BocalAD2000B}}$	96,7
Máxima tensão membrana ao redor de "C" (casca)	$\sigma_{\text{BocalAD2000C}}$	85,7
Máxima tensão membrana ao redor de "D" (tampo)	$\sigma_{\text{BocalAD2000D}}$	64,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a tabela 16 mostra as diferenças percentuais entre os valores de tensão da tabela 14 e 15.

Tabela 16 - Diferenças percentuais de tensões de membrana das normas ASME VIII Div.1 e AD 2000

$(\sigma_{\text{BocalASME}} / \sigma_{\text{BocalAD2000}} - 1) \times 100\%$	
σ_{BocalA}	5,28%
σ_{BocalB}	18,26%
σ_{BocalC}	5,73%
σ_{BocalD}	13,64%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de menos significativa se comparado aos valores de espessura mínima da casca (tabela 11), a análise da tabela 16 também permite confirmar que a norma ASME VIII Div.1 é mais conservadora se comparada à norma AD 2000, conforme descrito na seção 2.5, tendo em vista que as tensões de membrana da norma americana são maiores se comparadas à norma alemã. Na prática isso significa escolher um material mais resistente a fim de garantir que a integridade estrutural do vaso não seja comprometida durante condições operacionais.

A pequena diferença percentual ocorre pois as tensões de membrana obtidas pelo MEF (ASME VIII Div.1) consideram o efeito das tensões residuais provindas da vizinhança, resultando em uma sobreposição de tensões. Tal sobreposição fica evidente ao observar a figura 17, mencionada anteriormente, em que o bocal B apresentou a maior diferença percentual (18,26%), devido justamente à sobreposição de tensões provenientes da vizinhança (bocais A e C). Já a norma alemã AD 2000 considera apenas o efeito individual de cada bocal no aumento da tensão de membrana local.

Com relação ao bocal D, apesar de ser um único bocal localizado no tampo elíptico, ainda assim houve uma diferença percentual significativa entre a tensão obtida pelo MEF (ASME VIII Div.1) e a obtida analiticamente pela norma AD 2000 (13,64%). Isso pode ser explicado pelo fato de que a tensão obtida pelo MEF ter sido tomada no elemento de malha mais próximo à abertura, onde a concentração de tensões é mais acentuada, no qual, ao contrário do que descreve a teoria das cascas, esforços cortantes e tensões de flexão passam a ser levadas em consideração, e não apenas tensões normais.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivos comparar as normas de vasos de pressão ASME VIII Div.1 e AD 2000. Primeiramente foi feita uma comparação em termos de espessura mínima do casco cilíndrico, tampo elíptico e bocais e posteriormente em termos de tensões de máximas de membrana, na ausência e presença de bocais.

Realizadas as simulações no Ansys e cálculos analíticos, foi possível observar diferenças percentuais discretas entre ambas as normas referente às tensões de membrana do vaso com bocais. Para o caso do bocal B, localizado na casca cilíndrica, essa diferença foi mais acentuada (18,26%) devido à sobreposição de tensões normais causadas pelos bocais A e C, segundo a norma americana ASME VIII Div.1. Já a norma alemã AD 2000 considera o efeito isolado de cada bocal. Com relação ao bocal D, localizado no tampo elíptico, a diferença percentual de 13,64% justifica-se devido ao efeito não apenas das tensões normais, mas também dos esforços cortantes e tensões flexão.

À respeito das espessuras mínimas requeridas, as diferenças percentuais foram bastante consideráveis, tanto para a casca cilíndrica (99,2%), para os bocais A (180,5%), B (159,2%), C (180,5%) e D (189,5%) como para o tampo elíptico (79,7%). Com isso ficou evidente que a norma americana é mais conservadora em relação à alemã. A escolha da norma para validar vasos de pressão irá depender da sua aplicação.

Para casos de vasos submetidos à altas pressões, tais como esferas de armazenamento de gás liquefeito, é recomendado utilizar a norma alemã AD 2000 para redução de espessura, descartando a necessidade em se aplicar um tratamento térmico para alívio de tensões. Mesmo com altas tensões admissíveis, deve-se ficar atento com a qualidade do material e a escolha do fabricante/montador para atender pré-requisitos da norma de maneira criteriosa.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, R. B. **Introduction to finite element analysis**. ME 273 Lecture notes. San José, Califórnia: San José State University, 2013.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto Portugal, 2003. Disponível em: http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/livro_mef_aa_1ed/doc/livro_mef_aa.pdf. Acesso em: 12 fev. 2022.

FALCÃO, C. **Projeto mecânico**: vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos. Texto registrado sob o número 284827 no Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura, 2008.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **First course in finite elements**. West Sussex, USA: Wiley & Sons, 2007.

KRÜGER, R. L. **Análise de tensões em bocais de vasos de pressão cilíndricos**: comparação entre o método do boletim WRC 297 e o método de elementos finitos. 2014. Dissertação (Programa de pós-graduação stricto sensu em modelagem computacional e tecnologia industrial) – Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec, Salvador, 2014.

LIU, G. R.; QUEK, S. S. **The finite element method**: a practical course. London, England: Butterworth-Heinemann, 2003.

PROJETECNO: engenharia e consultoria. **Vasos de pressão**: o que são? [Betim, MG], 2022. Disponível em: <https://projetecno.eng.br/vasos-de-pressao-o-que-sao/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

QUEIROZ, N. F. de. **Tutorial Ansys Workbench 11.0**. [Lagoa Nova, RN]: Centro de Tecnologia/Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFRN, 2008. *E-book*.

RIBEIRO, F. L. B. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004. *E-book*.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

TERCAL: serviços técnicos e inspeções. **Vaso pressão**: o que é? [Jacareí, SP], 2022. Disponível em: <https://tercal.com.br/vasodepressao/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AD 2000 CODE. **Technical Rules for Pressure Vessels**. Cologne, Germany: Carl Heymanns Verlag KG, 2003.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE VIII, DIVISION 1. **Rules for Construction of Pressure Vessels**. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2010.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE VIII, DIVISION 2. **Alternative Rules: Rules for Construction of Pressure Vessels**. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2010.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE VIII, DIVISION 3. **Alternative Rules for High Pressure Vessels: Rules for Construction of Pressure Vessels**. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2010.