



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Centro de Tecnologia

LUCIANO DAS NEVES PEREIRA PINTO

Manual da ASME Sec. VIII Div. 2 - Aplicação em Filtro de Óleo Naval

João Pessoa

2022

LUCIANO DAS NEVES PEREIRA PINTO

Manual da ASME Sec. VIII Div. 2 - Aplicação em Filtro de Óleo Naval

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico em Engenharia Mecânica, na Área de Dinâmica e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DEFENDIDO PELO ALUNO LUCIANO DAS NEVES PEREIRA PINTO, E ORIENTADO PELO PROF. DR. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES.

João Pessoa

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P659m Pinto, Luciano Das Neves Pereira.
Manual da ASME Sec. VIII Div. 2 - Aplicação em
Filtro de Óleo Naval / Luciano Das Neves Pereira Pinto.
- João Pessoa, 2022.
141 f. : il.

Orientação: Marcelo Rodrigues Cavalcanti.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. ASME Seção VIII. 2. Divisão 2. 3. MEF. 4.
Manual. 5. Vasos de Pressão. 6. Filtro de Óleo Naval.
I. Cavalcanti, Marcelo Rodrigues. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Manual da ASME Sec. VIII Div. 2 - Aplicação em
Filtro de Óleo Naval**

Autor: Luciano das Neves Pereira Pinto

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou este Trabalho de Conclusão de Curso:

Prof. Dr. Marcelo Cavalcante Rodrigues
Departamento de Engenharia Mecânica do CT/UFPB

Prof. Juliano Vilar Sampaio
Departamento/Unidade/Instituto

Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina
Departamento de Engenharia Mecânica do CT/UFPB

OBS.: A implantação da nota no sistema seguirá o disposto na PORTARIA NORMATIVA Nº 02/2018 / CCGEM.

João Pessoa, 08 de SETEMBRO de 2022

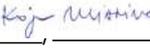


AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

NOME LUCIANO DAS NEVES PEREIRA PINTO Matrícula 11502071

TÍTULO: MANUAL DA ASME SEC. VIII DIV. 2 – APLICAÇÃO EM
FILTRO DE ÓLEO NAVAL

AVALIAÇÃO

		NOTAS		
Prof. Marcelo Cavalcanti Rodrigues		/ 10,0	/ 10,0	/ 10,0
Nome	Rubrica	Monografia	Apresentação	Média
Prof. Juliano Vilar Sampaio	/ 	/ 10,0	/ 10,0	/ 10,0
Nome	Rubrica	Monografia	Apresentação	Média
Prof. Koje Daniel Vasconcelos Mishina	/ 	/ 10,0	/ 10,0	/ 10,0
Nome	Rubrica	Monografia	Apresentação	Média

Média Final: 10,0

Situação: (x) aprovado / () reprovado

RECOMENDAÇÕES:

João Pessoa, 08 de setembro de 2022.

OBS: A implantação da nota no sistema seguirá o disposto na PORTARIA NORMATIVA Nº 02/2018 / CCGEM

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha mãe e a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram nessa longa empreitada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço todo apoio prestado pelo meu orientador e pelo técnico do LabII - UFPB (Gilsivan) durante os longos meses de elaboração desse trabalho de conclusão de curso. Agradeço também aos meus amigos Israel Farias, Douglas Lira, Felipe Maraschin, Lucas Cavalcante, dentre outros que me ajudaram bastante durante a graduação e durante a elaboração desse manual. Faço um agradecimento especial a minha mãe, Luci, que me deu todo suporte necessários ao longo da minha graduação e da vida.

RESUMO

Os Vasos de Pressão são equipamentos que estão presente em vários setores da sociedade, desde os ambientes domésticos, até os industriais. Normas como as ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, existem para certificar a segurança e a confiabilidade de equipamentos cujo projeto tenha seguido suas diretrizes. A Div.2 permite a aplicação de métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos no desenvolvimento e projetos de Vasos de Pressão. O objeto de estudo do referido trabalho, é o filtro de óleo para aplicação naval, e exige a utilização da Div.2 e permite uma análise baseada na avaliação de requisitos com uso de software de modelagem CAD (SOLIDWORKS) e CAE (ANSYS). O trabalho propõem apresentar os passos teóricos e práticos para a análise de um Filtro de Óleo Naval, em formato de manual, de tal forma que facilite a utilização da norma e seja possível replicar ou adaptar a resolução de problemas similares. O vaso foi avaliado para condições de carregamento variadas e sobre a luz dos quatro requisitos imposto pela norma. Após a avaliação o Filtro de Óleo Naval foi aprovado para operar até $1,60 [MPa]$ pois a aplicação da norma garante que o equipamento está protegido contra colapso plástico, falha local, flambagem e cargas cíclicas.

Palavras-chave: ASME Secção VIII. Divisão 2. MEF. Manual. Vasos de Pressão. Filtro de Óleo Naval.

ABSTRACT

Pressure Vessels are equipment that are present in various sectors of society, from domestic to industrial environments. Standards such as ASME BPVC Section VIII - Division 2, exist to certify the safety and reliability of equipment whose design has followed its guidelines. Div.2 allows the application of numerical methods such as the Finite Element Method in the development and design of pressure vessels. The object of study of this work, is the oil filter for naval application, and requires the use of Div.2 and allows an analysis based on the evaluation of requirements using CAD (SOLIDWORKS) and CAE (ANSYS) modeling software. The paper proposes to present the theoretical and practical steps for the analysis of a Naval Oil Filter, in a manual format, in such a way that it facilitates the use of the standard and it is possible to replicate or adapt the resolution of similar problems. The vessel was evaluated for varying loading conditions and in light of the four requirements imposed by the standard. After evaluation, the Naval Oil Filter was approved to operate up to $1.60[MPa]$ as the application of the standard ensures that the equipment is protected against plastic collapse, local failure, buckling and cyclic loading.

Keywords: ASME Section VIII. Division 2. FEM. Manual. Pressure Vessels. Naval Oil Filter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Modelo CAD Renderizado - Representação Artística do Filtro de Óleo Naval	27
Figura 1.2 – Carregamentos Presentes no Filtro de Óleo Naval	29
Figura 2.1 – Classificação dos Vasos de Pressão com Relação ao seu Funcionamento . . .	31
Figura 2.2 – Tanque de Armazenamento de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) para Uso Industrial.	32
Figura 2.3 – Navio Transportador de Gás	32
Figura 2.4 – Torre de Destilação em Refinaria de Petróleo	33
Figura 2.5 – Caldeira	33
Figura 2.6 – Vaso Cilíndrico: Linha de Ar Respirável para Mergulho.	34
Figura 2.7 – Tanque Esférico para Armazenamento de Gás	34
Figura 2.8 – Formatos e Posições dos Vasos de Pressão	36
Figura 2.9 – Modelo CAD do Filtro de Óleo Naval	37
Figura 3.1 – Alguns Tipos de Tampos de Fechamento em Vasos de Pressão	38
Figura 3.2 – Exemplo de Regiões GSD	40
Figura 3.3 – Classificação das Partes Principais do Filtro de Óleo Naval	41
Figura 4.1 – Alguns Tipos de Bocais e Formatos de Conexões	44
Figura 4.2 – Classificação das Aberturas e Acessórios do Filtro de Óleo Naval.	46
Figura 5.1 – Comitês da ASME para Equipamentos de Pressão	49
Figura 6.1 – Categoria de Tensões Primárias.	60
Figura 6.2 – Tabela 5.6 - Exemplo de Classificação das Tensões Primárias para o Tampo de Fechamento Plano	64
Figura 6.3 – Classificação das Tensões Primárias no Filtro de Óleo Naval	65
Figura 7.1 – Critério para determinação da Tensão Admissível em Vasos de Pressão Classe 2.	69
Figura 8.1 – Etapas do MEF	74
Figura 8.2 – Figura 5-A.1 - Exemplo de SCL e SCP	76
Figura 8.3 – Modelo CAD 3D Renderizado - Representação Artística do Filtro de Óleo Naval com Detalhamento	77
Figura 8.4 – Modelo CAD 3D simplificado - Filtro de Óleo Naval	78

Figura 8.5 – Comparativo Entre Modelo CAD e Modelo CAE para Análise MEF - Filtro de Óleo Naval	79
Figura 8.6 – Modelo CAD Adaptado para Geração de Malha Conforme Anexo 5-A da ASME Secção VIII - Divisão 2	80
Figura 9.1 – Exemplo de Sistema de Análise e Celulas em um Diagrama de Projeto no Ansys Workbench 17.	81
Figura 9.2 – Diagrama de Bloco dos Sistemas de Análise no Ansys Workbench - Modelo Estrutural Estático - Análise do Filtro de Óleo Naval	83
Figura 9.3 – Correção para rosca - Contato dos Parafusos na Análise do Filtro de Óleo Naval	85
Figura 10.1–Exemplo de Orientação da SCL	88
Figura 10.2–Condições para a Tensão Circunferencial e Longitudinal	88
Figura 10.3–Condição para a Tensão ao Longo da Espessura	89
Figura 10.4–Condição da Tensão de Cisalhamento	90
Figura 10.5–Posicionamento da SCL 01	95
Figura 10.6–Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 01	95
Figura 10.7–Posicionamento da SCL - 02	96
Figura 10.8–Gráfico das Tensões ao Longo da SCL 02	97
Figura 10.9–Posicionamento da SCL - 03	98
Figura 10.10Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 03	98
Figura 10.11Posicionamento da SCL - 04	99
Figura 10.12Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 04	100
Figura 11.1–Categorias de Tensão e Limites Equivalente de Tensão - Figura 5.1 da Norma	105
Figura 11.2–Exemplo de Histograma de Cargas	110
Figura 11.3–Locais Analisados para Validação do Componente	114
Figura 11.4–Resultado da Análise de Fadiga pelo ANSYS Mechanical - <i>Static Structural</i>	124
Figura A.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local	130
Figura B.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Colapso Plástico . . .	131
Figura B.2 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Colapso Plástico . . .	132
Figura C.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local	133
Figura C.2 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local	134

Figura A.1 – Tabela 2A Tensão Admissível Máxima para Vasos de Pressão pela Secção VIII, Divisão 2, em vasos de Classe 1.	140
Figura B.1 – Tabela 5.6 - Exemplo de Classificação das Tensões Primárias	141
Figura C.1 – Tabela 5.11 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2	142
Figura C.2 – Tabela 5.12 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2	142
Figura C.3 – Tabela 5.13 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dados do problema	28
Tabela 1.2 – Dados do Problema - Propriedade dos materiais	29
Tabela 5.1 – Quadro comparativo: ASME Seção VIII - Div.1, Div.2, Div.3.	57
Tabela 7.1 – Tabela de Tensões Admissível S (MPa) em Função da Temperatura.	70
Tabela 7.2 – Dados para Cálculo da Tensão Admissível (S) com Dados do Material Utilizado	71
Tabela 9.1 – Setup de Condição de Carregamento no ANSYS Mechanical	85
Tabela 10.1–Resultados SCL - 01	91
Tabela 10.2–Resultados SCL - 02	91
Tabela 10.3–Resultados SCL - 03	92
Tabela 10.4–Resultados SCL - 04	92
Tabela 10.5–Resultados SCL - 01 com Carga Térmica	93
Tabela 10.6–Resultados SCL - 02 com Carga Térmica	93
Tabela 10.7–Resultados SCL - 03 com Carga Térmica	94
Tabela 10.8–Resultados SCL - 04 com Carga Térmica	94
Tabela 11.1–Tensões Admissíveis para Avaliação do Requisito - Proteção Contra Colapso Plástico	115
Tabela 11.2–Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - SCL - 01	116
Tabela 11.3–Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 02)	117
Tabela 11.4–Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 03)	118
Tabela 11.5–Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 04)	119
Tabela 11.6–Tensões Admissíveis para Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Local	120
Tabela 11.7–Avaliação Cargas Cíclicas - Histograma de Cargas	121
Tabela 11.8–Avaliação do requisito - Análise de Fadiga	122

Tabela 11.9–Resultados - Avaliação Para Proteção Contra " <i>Ratcheting</i> "	123
Tabela C.1 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local- SCL-01 .	134
Tabela C.2 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-02 .	135
Tabela C.3 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-03 .	135
Tabela C.4 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-04 .	136
Tabela D.1 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 01	137
Tabela D.2 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 02	137
Tabela D.3 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 03	137
Tabela D.4 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 04	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
CAD	Computer Aided Design (Projeto Assistido por Computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Engenharia Assistida por Computador)
GSD	Gross Structural Discontinuity (Descontinuidade Estrutural Abrupta)
LSD	Local Structural Discontinuity (Descontinuidade Estrutural Local)
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code
SCP	Stress Classification Plane
SCL	Stress Classification Line
GDL	Graus de Liberdades
MEF	Método de Elementos Finitos
NR	Norma Regulamentadora
Div.	Divisão das ASME Secção VIII
T. Amb	Temperatura Ambiente
CC	Condições de Carregamento

LISTA DE SÍMBOLOS

β_{cr}	Fator de Redução de Capacidade
D	Carga Estacionária
D_f	Dano de Fadiga
$\Delta S_{LT,k}$	Varição da Tensão Equivalente Local Térmica
$\Delta S_{n,k}$	Varição da Tensão Equivalente Primária mais Secundária
$\Delta S_{p,k}$	Varição da Tensão Equivalente Efetiva
N_k	Número Ciclos Admissível
n_k	Número de Ciclos Especificado
P	Pressão de Projeto Especificada
P_b	Tensão Primária de Flexão
P_m	Tensão Primária de Membrana Geral
P_L	Tensão Primária de Membrana Local
R	Raio Interno do Vaso
R_Y	Razão Entre o Valor Médio da Curva de Tendência da Tensão de Escoamento Dependente da Temperatura e a Tensão de Escoamento à Temperatura Ambiente
S	Tensão Admissível
S_a	Amplitude de Tensão
S_{ac}	Amplitude de Tensão Ajustada
$S_{alt,k}$	Tensão Equivalente Alternada Efetiva
S_e	Tensão Equivalente Computada

S_{PL}	Limite Admissível em Locais onde a Tensão Foi Categorizada como Sendo Primária de Membrana Local ou Primária de Membrana Local mais Flexão
S_T	Limite à Tração Última à Temperatura Ambiente
S_{ut}	Limite à Tração Última à Dada Temperatura
S_Y	Limite Mínimo de Resistência ao Escoamento à Temperatura Ambiente
S_{yt}	Limite de Resistência ao Escoamento à Dada Temperatura
t	Espessura da Parede do Vaso
T	Temperatura
X	Expoente Usado para Determinar o Número de Ciclos
ϕ_B	Fator de Projeto para Flambagem
Y	Fator de Correção da Amplitude de Tensão em Função da Temperatura Utilizado para Determinar X

SUMÁRIO

1	Apresentação	22
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
1.2	OBJETIVOS DO MANUAL	22
1.3	VISÃO GERAL DO MANUAL	22
1.4	CONCEITO DE VASO DE PRESSÃO	25
1.5	GLOSSÁRIO DE DEFINIÇÕES ASME	25
1.6	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	27
2	CLASSES E TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO	31
2.1	CLASSES DE VASOS	31
2.2	TIPOS DE VASOS	31
2.3	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	36
3	PARTES PRINCIPAIS DOS VASOS DE PRESSÃO	38
3.1	VISÃO GERAL	38
3.2	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	41
4	ABERTURA E ACESSÓRIOS EM VASOS DE PRESSÃO	43
4.1	VISÃO GERAL	43
4.2	BOCAIS	43
4.3	BOCA DE VISITA E DE INSPEÇÃO	44
4.4	FLANGES	45
4.5	OUTROS ACESSÓRIOS	45
4.6	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	46
5	ASME E A NORMATIZAÇÃO PARA VASOS DE PRESSÃO	48
5.1	VISÃO GERAL	48
5.2	RESUMO HISTÓRICO	49
5.3	ASME VIII DIVISÃO 1 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO	50
5.4	ASME VIII DIVISÃO 2 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO: REGRAS ALTERNATIVAS	53

5.5	ASME VIII DIVISÃO 3 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO: REGRAS ALTERNATIVAS PARA VASOS DE ALTA PRESSÃO .	56
5.6	COMPARATIVO: DIVISÃO 1, DIVISÃO 2 E DIVISÃO 3	56
5.7	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	58
6	CLASSIFICAÇÃO DE TENSÕES SEGUNDO A ASME SECÇÃO VIII - DIVISÃO 2	59
6.1	VISÃO GERAL	59
6.2	TENSÕES PRIMÁRIAS	59
6.2.1	Membrana Geral (" <i>General Membrane</i> ")	60
6.2.2	Membrana Local (" <i>Local Membrane</i> ")	61
6.2.3	Flexão (" <i>Bending</i> ")	61
6.3	TENSÕES SECUNDÁRIAS	61
6.4	TENSÃO DE PICO	62
6.5	MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES	62
6.6	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	63
7	DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL	66
7.1	VISÃO GERAL	66
7.2	ASME SECÇÃO II PARTE D – MATERIAIS: PROPRIEDADES (SISTEMA INTERNACIONAL)	67
7.3	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	69
8	MODELAGEM 3D DE FILTRO DE ÓLEO NAVAL PARA ANÁLISE MEF	72
8.1	VISÃO GERAL	72
8.2	INTERPRETAÇÃO DO ANEXO 5 – A PARA GERAÇÃO DE MALHA E PÓS-PROCESSAMENTO	75
8.3	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	77
9	ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DE FILTRO DE ÓLEO NAVAL VIA ANSYS WORKBENCH	81
9.1	VISÃO GERAL	81
9.2	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	83
10	VALIDAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS NO ANSYS WORKBENCH	87
10.1	VISÃO GERAL	87
10.2	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	90

10.2.1	Resultados obtidos da Solução do Modelo Numérico via Ansys Mechanical	90
10.2.2	Validação dos Resultados	94
11	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	101
11.1	VISÃO GERAL	101
11.2	PROTEÇÃO CONTRA COLAPSO PLÁSTICO	103
11.3	PROTEÇÃO CONTRA FALHA LOCAL	107
11.4	PROTEÇÃO CONTRA FLAMBAGEM	108
11.5	PROTEÇÃO CONTRA FALHA DEVIDO A CARGAS CÍCLICAS	108
11.5.1	Proteção contra "Ratcheting" - Método de Análise da Tensão Elástica	113
11.6	APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL	114
11.6.1	Avaliação do Requisito - Proteção Contra Colapso Plástico	114
11.6.2	Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Local	120
11.6.3	Avaliação do Requisito - Proteção Contra Flambagem	120
11.6.4	Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Devido a Cargas Cíclicas	121
12	Conclusão	125
	Referências	127
	Apêndices	129
APÊNDICE A	BPVC - SECÇÕES DO CÓDIGO ASME PARA VASOS DE PRESSÃO E CALDEIRAS	130
APÊNDICE B	RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO - PROTEÇÃO CONTRA COLAPSO PLÁSTICO	131
APÊNDICE C	RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO - PROTEÇÃO FALHA LOCAL	133
APÊNDICE D	RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO - PROTEÇÃO CONTRA CARGAS CÍCLICAS	137

Anexos	139
ANEXO A TABELAS ASME BPVC SECÇÃO II - PARTE D - TABELA DE TENSÃO ADMISSÍVEL (S) (S)	140
ANEXO B TABELAS 5.6 DA ASME BPVC SECÇÃO II - DIVISÃO 2 - EXEMPLO DE CLASSIFICAÇÃO DE TENSÃO	141
ANEXO C TABELAS ASME BPVC SECÇÃO VIII - DIVISÃO 2 - AVALIAÇÃO PARA PROTEÇÃO CONTRA FALHA POR CARGAS CÍCLICAS . .	142

1 APRESENTAÇÃO

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturada em Capítulos que abordam o subsídio teórico e a aplicação da norma ASME em um projeto de Filtro de Óleo Naval.

Todos os Capítulos irão iniciar com uma fundamentação teórica, onde os primeiros subcapítulos lhe entregarão o conhecimento necessário, com indicação, sempre que pertinente, de complementação teórica, traduções, observações e "*tips*¹" em notas de rodapé. Ao final, haverá um último subcapítulo que trará a aplicação dos conceitos abordados no projeto de validação estrutural de um Vaso de Pressão.

Cada subcapítulo, **Aplicação em Filtro de Óleo Naval**, trará uma etapa do processo de aplicação da norma ASME Secção VIII - Divisão 2.

Ao final desse trabalho, espera-se disponibilizar um conhecimento teórico básico, e indicações que possam ampliar seu conhecimento acerca da norma, além de fornecer um exemplo replicável e adaptável a outras situações.

1.2 OBJETIVOS DO MANUAL

Analisar um Vaso de Pressão de geometria complexa e aplicação naval através da norma ASME Secção VIII - Divisão 2.

Os objetivos específicos do trabalho são: (1) Apresentar os principais conceitos da normas e teoria necessária para aplicação da norma ASME BPVC; (2) Apresentar um guia com os passos necessários para aplicar a ASME Secção VIII - Divisão 2 , Parte 5 em um Filtro de Óleo Naval; (3) Determinar a máxima Pressão cujo Filtro de Óleo possa operar.

1.3 VISÃO GERAL DO MANUAL

Os equipamentos de pressão estão presentes em diversas aplicações, sejam eles industriais, comerciais ou domésticos. Desde uma simples panela de pressão, a uma enorme caldeira de um submarino nuclear, ambos os equipamentos precisam ser construídos e operados

¹ Termo da língua inglesa para designar dicas que facilitam a compreensão ou execução de uma tarefa.

sob condições específicas, afim de garantir a segurança daqueles em seu entorno, ou do meio ambiente.

A primeira revolução industrial apresentou ao mundo as máquinas térmicas. Estes equipamentos operam transformando energia térmica em trabalho, seja pelos movimentos de elementos mecânicos ou no armazenamento de energia na forma de vapor.

Com as primeiras máquinas, também surgiram os primeiros acidentes industriais. A falta de uniformidade é característica de uma época onde cada região, empresa ou indivíduo seguia seus próprios padrões e condutas operacionais. A desuniformidade aumentava o risco de acidentes, gerando ineficiências econômicas, danos ambientais, e fatalidades humanas.

No final do Século XIX e início do XX surgiram diversas associações regulamentadoras. Formaram-se comitês compostos por industriais, acadêmicos e legisladores, a fim de propor regras e orientações a serem empregadas em diversos segmentos da sociedade. As Normas ("*Codes/Standard*") trouxeram uniformização dos projetos, processos de fabricação e operação dos equipamentos. Obteve-se, por esta uniformização, ganhos econômicos e de segurança.

Os comitês de normatização, como a ASME (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos), de tempos em tempos reúnem-se para avaliar o Estado da Arte e propor reformulações metodológicas na abordagem das orientações normativas, buscando aumentar a segurança e abranger o crescente grau de complexidade dos projetos e das demandas tecnológicas da sociedade.

Uma das normas que foram evoluindo com o avanço tecnológico foi a ASME Seção VIII. Inicialmente a norma abordava apenas uma metodologia analítica de cálculo e projeto, formas e usos simplificados. Com o passar do tempo e a necessidade de garantir a segurança de equipamentos cada vez mais complexos, seja quanto a geometria, redução de peso e espessura ou complexidade do local de instalação do equipamento, a esta adaptou-se e passou a permitir novas abordagens.

Enquanto a **Divisão 1** da ASME Seção VIII vai permitir projetar equipamento de geometria simplificada, menor pressão e de instalação estacionária, a **Divisão 2** da norma se destinará aos Vasos de Pressão, cuja pressão de projeto, e complexidade estrutural são maiores, além da sua instalação se dar em locais de maior risco (como navios, regiões sujeita a terremotos etc.).

A Divisão 2 da ASME Seção VIII, surgiu com a intenção de permitir o funcionamento de equipamento de maior pressão e complexidade, além de trazer fona alternativa para

projetar os Vasos de Pressão. O diferencial nessa Divisão é permitir analisar os equipamentos através do uso dos métodos computacionais, como o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Ao receber a demanda para o desenvolvimento de um componente ou equipamento de pressão, um engenheiro ou escritório de projetos precisa atentar-se, não apenas aos requisitos solicitados pelo cliente, mas também as normas, regulamentos e legislações que são aplicáveis as diversas dimensões dele (projeto, construção, operação, manutenção, inspeção etc).

A ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2 apresenta um roteiro para a elaboração de projeto de Vasos de Pressão. Ela também dita como classificar e certificar os equipamentos a fim de garantir a segurança dos mesmos. Além disso, as normas são podem ser utilizadas como parâmetro de validação legal junto a diversos órgãos de fiscalização e regulamentação.

Este manual se propõem a apresentar o conceito de Vasos de Pressão como um manual de projeto para validação de um vaso segundo a norma da ASME. O equipamento irá compor um sistema hidráulico a ser instalado em um navio. Desta forma, o local de instalação, é um parâmetro importante, uma vez que ele será determinante para identificar qual divisão da norma devemos utilizar.

Ao se tomar por base a normatização ASME para equipamentos de pressão, e por um Vaso de Pressão, cujo fluido de trabalho é óleo, devemos utilizar a ASME BPVC Secção VIII. Dado ao local de instalação (sítio não-estacionário), devemos validar o equipamento através da metodologia da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2.

A Divisão 2 irá permitir a análise por requisitos. Método este que consiste em estipular e classificar as tensões atuantes no vaso através de MEF, em locais de interesse no equipamento. Ao obter os resultados do MEF, no pós-processamento, devemos linearizar a tensão principal, classificar e avaliar conforme critérios de admissibilidade.

O manual foi escrito com ferramenta de edição de texto baseada em linguagem Latex e diversas ferramentas computacionais foram empregadas: SOLIDWORKS (construção do modelo CAD); ANSYS Workbench - DesignModeler (adequação do modelo para análise MEF), Mechanical (análise estrutural estática e construção do modelo MEF) etc; além de ferramentas como o Excel, PowerPoint, Matlab, CorelDRAW ferramenta online [tablesgenerator²](https://www.tablesgenerator.com) (geração de tabelas para Latex), draw.io etc.

Sendo assim, o manual busca responder a seguinte pergunta: Como utilizar a ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2 na validação do projeto de um Filtro de Óleo Naval e com isso

² <https://www.tablesgenerator.com>

permitir a análise e aplicação da norma em equipamentos similares.

1.4 CONCEITO DE VASO DE PRESSÃO

O conceito de Vasos de Pressão é debatido em diversos comitês técnicos e pode variar de acordo com legislações, regulações e normas técnicas; apesar das técnicas de projeto, construção, e formatos se manterem razoavelmente constantes nos últimos 100 anos de desenvolvimento tecnológico (Matthews, 2000).

Trecho de norma 1.1 (NR13, secção 15.5.5.1.1). *“Vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica”.*

Trecho de norma 1.2 (ASME VIII – DIVISÃO 2, Part 1, 1.2.1.1, p.1. 2021.). *“Vasos de pressão são recipientes para a contenção de pressão, interna ou externa. Esta pressão pode ser obtida de uma fonte externa ou pela aplicação de calor de uma fonte direta ou indireta como resultado de um processo, ou qualquer combinação destes”.*

Definição 1.1 (Vasos de Pressão). *Os recipientes estanques, de qualquer natureza, finalidade, dimensões, ou geometria, são denominados de forma genérica como Vasos de Pressão (pressure vessel) (Telles, 1996).*

A partir dos trechos de norma 1.1, 1.2 e da definição 1.1 pode-se entender que alguns elementos são essenciais para formação de um conceito geral de vaso de pressão.

Definição 1.2 (Vasos de Pressão). *É qualquer equipamento estanque, seja de armazenagem ou de processo, em que há a atuação de pressão (> 103 kPa) oriunda de um fluido presente na interface interna ou externa.*

A definição 1.2 dá um norteamento conceitual para que possamos entender os vasos de pressão a luz da ASME BPVC Secção VIII.

1.5 GLOSSÁRIO DE DEFINIÇÕES ASME

Dentro da norma ASME algumas definições são fundamentais na sua compreensão, dentre elas podemos destacar:

Definição ASME 1 (Divisão 1 - Pressão de Projeto, "*Design Pressure*"). Valor de pressão considerada para efeito de cálculos sob a condição prevista mais severa (maior pressão) de operação em serviço normal (ASME, 2021d).

Definição ASME 2 (Divisão 2 - Pressão de Projeto³, "*Design Pressure (P)*"). Valor de pressão utilizado no projeto de um Vaso de Pressão para determinar a espessura mínima admissível e as características física dos componentes do vaso (ASME, 2021c).

Definição ASME 3 (Divisão 3 - Pressão de Projeto, "*Design Pressure*"). Valor de pressão estampado na placa de identificação do vaso. Essa pressão é a base para determinar os mecanismos de alívio de pressão do vaso (ASME, 2021e).

Observação 1.1. A Temperatura de Projeto (*T*) possui equivalência com as definições ASME 1, 2, e 3, deve ser abordado em conjuntamente. A Temperatura de Projeto servirá de referência na determinação das propriedades do metal.

Definição ASME 4 (Descontinuidade Estrutural Abrupta⁴, "*Gross Structural Discontinuity (GSD)*"). Região fonte ou intensificador de tensão ou de deformação que possui a capacidade de promover aumento da tensão/deformação em uma área significativa da estrutura (ASME, 2021c).

Definição ASME 5 (Descontinuidade Estrutural Local, "*Local Structural Discontinuity (LSD)*"). Região fonte de tensão ou intensificador de deformação que possui a capacidade de promover aumento não significativo da tensão/deformação em uma pequena área da estrutura (ASME, 2021c).

Definição ASME 6 (Tensão de Membrana, "*membrane stress*"). Componente normal da tensão distribuída de forma uniforme, sendo a média da tensão através da secção transversal da parede do vaso (ASME, 2021c).

Definição ASME 7 (Plano de Classificação de Tensões, "*Stress Classification Planes (SCP)*"). Plano obtido pelo corte da secção transversal através da espessura de um componentes onde se obtém as Tensões de Membrana e Flexão (ASME, 2021c).

³ Ver ASME BPVC - Divisão 2, 4.1.5.2, p.169. 2021.

⁴ Ver ASME VIII – DIVISÃO 2, 5.12 (10), p.601. 2021.

Definição ASME 8 (Linha de Classificação de Tensões⁵, "*Stress Classification Lines (SCL)*"). *Em um plano, se obtém uma SCL através da redução de lados opostos de um SCP a um comprimento infinitesimal (ASME, 2021c).*

Definição ASME 9 (Fluência Cíclica, "*Ratching (Cyclic creep)*"⁶). *Deformação inelástica incremental e progressiva que ocorre em componentes sujeitos a uma variação de cargas mecânicas (Pressão) e/ou cargas térmicas (Pontos de calor ou variações de temperatura). O fenômeno do Ratching provoca tensões cíclicas no material que podem leva-lo ao colapso por fadiga (ASME, 2021c).*

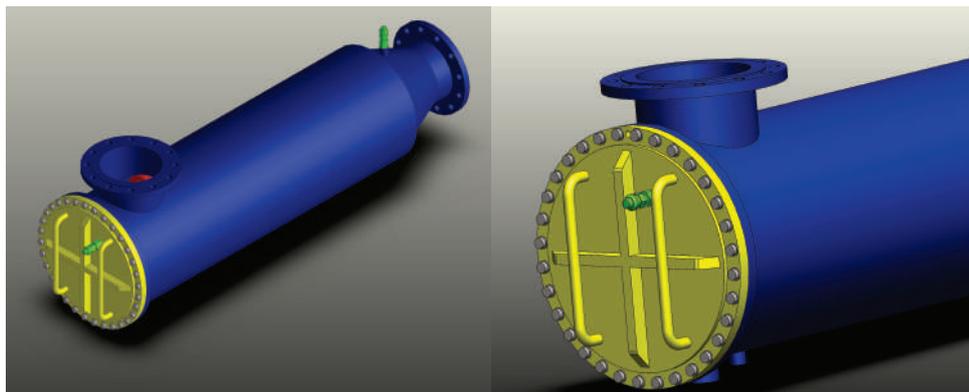
1.6 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Filtros de óleo possuem a função de remover partículas de óleos e combustíveis, a fim de evitar que as impurezas entre em contato com câmaras de combustão dos motores ou com pistões hidráulicos ou hidropneumáticos.

Os filtros tem por finalidade proteger sistemas complexos, minimizando as paradas por danos ou mal funcionamento de outros componentes ou subsistemas.

O Filtro de Óleo Naval em estudo faz parte de um sistema hidráulico em circuito fechado, empregado em uma embarcação de transporte oceânico, cuja função é promover a limpeza do fluido hidráulico utilizado nesse sistema.

Figura 1.1 – Modelo CAD Renderizado - Representação Artística do Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

⁵ A parte 5 da Norma BPVC Seção VIII - Divisão 2 se baseia na linearização das tensões. classificação e avaliação nessas linhas em comparação com valores admissíveis.

⁶ Ver ASME VIII – DIVISÃO 2, 5.12 (18), p.602. 2021.

O Filtro é composto de um elementos filtrantes, contido em um casco estanque, onde óleo é bombeado sob pressão e forçado a passar pelo filtro fazendo com que a pressão na parede interna do vaso sofra uma elevação acima da pressão ambiente ($> 103 [MPa]$). Como explicado na definição 1.2, todo equipamento com essas características é um **Vaso de Pressão**.

Na tabela 1.1 estão apresentadas as condições de operação a serem analisadas por MEF.

Tabela 1.1 – Dados do problema

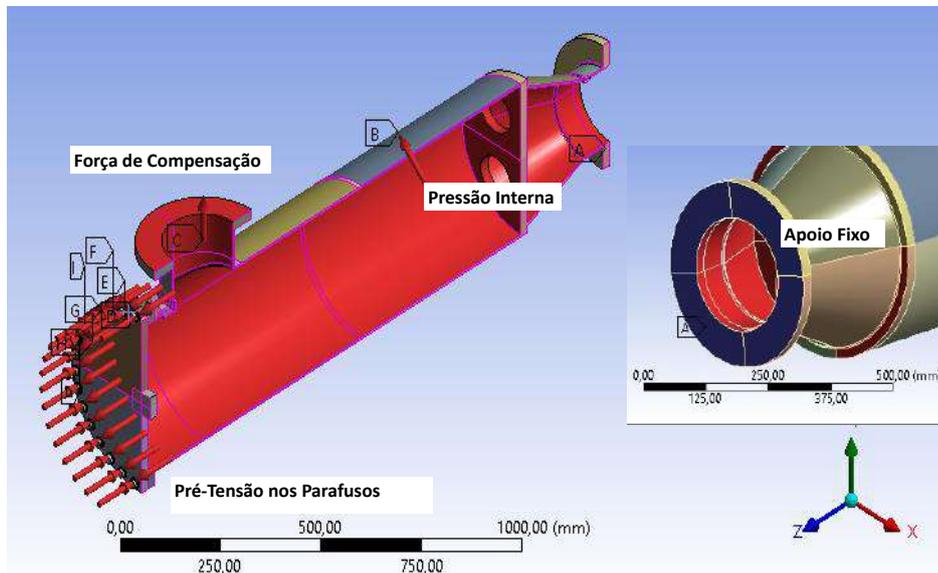
Situação	Força [N]	Pressão [MPa]	Pré-carga do Parafuso [N]
1	0	0,00	26.000
2	60.821	0,40	*
3	76.027	1,40	*
4	91.232	1,60	*
5	103.400	2,00	*
6	117.840	2,72	*
7	129.250	3,00	*
8	145.970	3,50	*
9	152.050	4,20	*

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Vaso de Pressão está sujeito a pressão exercida pelo Óleo contra a interface interna da parede. O Tampo de Fechamento Plano também sofre influência da pressão internamente. Os parafusos irão sofrer uma tensão devido ao pré-carregamento oriundo do aperto. Irá existir uma força de compensação aplicada a flange do bocal superior por conta do deslocamento do fluído. Toda a estrutura opera sob Temperatura de Projeto⁷ igual a $T = 60^{\circ}C$.

⁷ A temperatura de projeto segue a mesma compreensão da Definição ASME 2.

Figura 1.2 – Carregamentos Presentes no Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela 1.2 traz as propriedades mecânicas especificadas dos componentes. O Casco e o Tampo de Fechamento Plano do Filtro de Óleo Naval são construídos com o Aço EN 1.4432⁸, os parafusos utilizados são o BUMAX 88 (32 parafusos).

Tabela 1.2 – Dados do Problema - Propriedade dos materiais

Propriedades Mecânicas dos Materiais			
Componentes →		Filtro	Parafusos
Material →		EN 1.4432	BUMAX 88
Temperatura Ambiente	S_Y [MPa]	256	640
	S_T [MPa]	644	800
	E [GPa]	200	200
$T = 60^\circ C$	S_{yt} [MPa]	238	597
	S_{ut} [MPa]	498	625
	E [GPa]	200	200

Os dados problema, bem como as propriedade mecânica dos materiais serão uma informação fundamental, tanto no emprego da norma, como na construção do modelo numérico.

⁸ Também pode ser denominado como Aço AISI 316L ou UNS S31603.

Com esta análise, busca-se determinar o comportamento estrutural do equipamento sob diferentes pressões e com isso determinar a pressão máxima para utilização do mesmo em segurança e garantir sua conformidade com a norma ASME para Vasos de Pressão.

2 CLASSES E TIPOS DE VASOS DE PRESSÃO

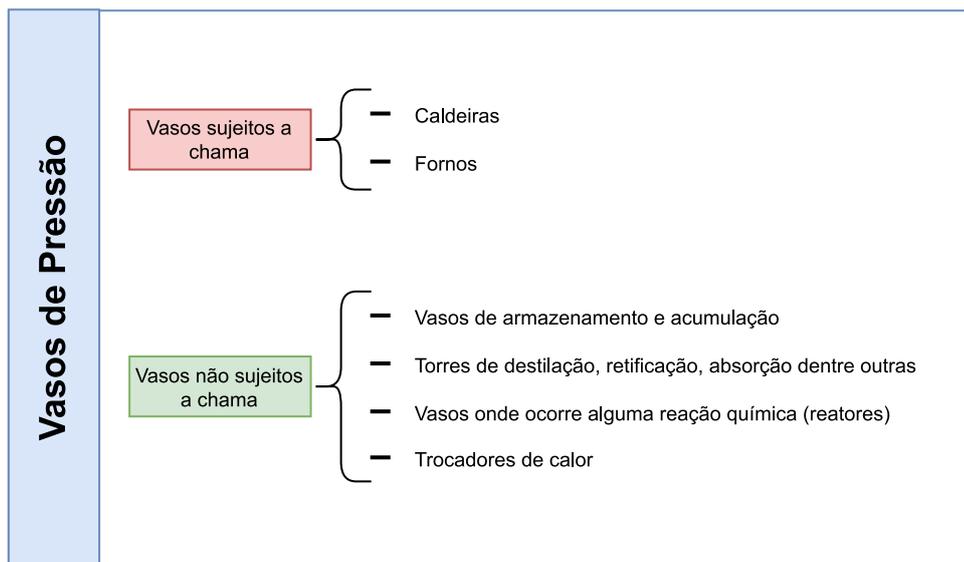
2.1 CLASSES DE VASOS

Os Vasos de Pressão estão divididos em duas grandes classes (Telles, 1996).

Definição 2.1 (Vasos Sujeito a Chamas). *São equipamentos que estão diretamente expostos, integral ou parcialmente, a chamas proveniente da queima de um combustível, seja ele líquido, sólido ou um gás.*

Definição 2.2 (Vasos Não Sujeito a Chamas). *São equipamentos onde não há presença de fogo, mesmo operando sob elevadas temperaturas.*

Figura 2.1 – Classificação dos Vasos de Pressão com Relação ao seu Funcionamento



Fonte: Telles, 1996, p.2 (com adaptações).

2.2 TIPOS DE VASOS

Dentro das classes dos vasos de pressão, Definição 2.1, 2.2, é possível definir os tipos de equipamentos a partir de 3 perspectivas (finalidade, formato, ou posição):

Definição 2.3 (Finalidade). *Para que se destina o uso do vaso: se é para armazenamento de gases ou líquidos, ou se estão dentro de algum processo de transformação.*

Vasos de Acumulação são os responsáveis por armazenar gases ou líquidos pressurizados, sejam em processos intermediários, estoque ou para transporte.

Exemplo 2.1. *Tanque para armazenamento de gás GLP.*

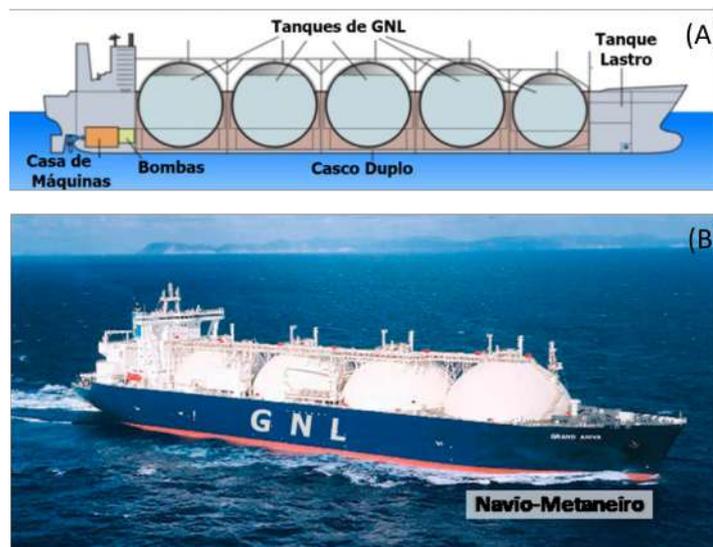
Figura 2.2 – Tanque de Armazenamento de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) para Uso Industrial.



Fonte: [Ultragaz \(2019\)](#).

Exemplo 2.2. *Navio tanque para transporte de gás (metaneiro).*

Figura 2.3 – Navio Transportador de Gás



Fonte: [CBIE \(2019\)](#).

Legenda: (A) Modelo esquemático de navio metaneiro; (B) Foto de navio tanque fazendo transporte de GNL (Gás Natural Liquefeito) por via oceânica.

Vasos de Processo são aqueles utilizados dentro dos processos de transformação, onde materiais fluídos e/ou sólidos sofrem transformações físicas e/ou químicas.

Exemplo 2.3. *Torre de destilação.*

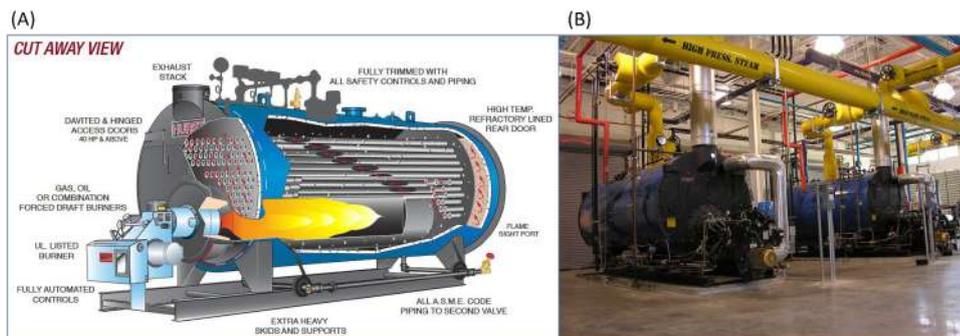
Figura 2.4 – Torre de Destilação em Refinaria de Petróleo



Fonte: [ALUTAL \(2018\)](#).

Exemplo 2.4. *Caldeiras.*

Figura 2.5 – Caldeira



Fonte: [HURST BOILER \(2011\)](#).

Legenda:(A) Modelo esquemático em corte de uma caldeira; (B) Foto de uma caldeira.

Definição 2.4 (Formato). *A classificação quanto ao formato é derivada do tipo de aplicação dos vasos de pressão e é feita a partir da sua forma geométrica.*

Os principais formatos utilizados na construção dos vasos de pressão são: circunferências, esferas, cones ou combinações desses

Vasos Cilíndricos, são os mais utilizados devido a facilidade de fabricação, já que podem ser construídos através da conformação e costura por solda de chapas (Telles, 1996).

Exemplo 2.5. *cilindro de mergulho.*

Figura 2.6 – Vaso Cilíndrico: Linha de Ar Respirável para Mergulho.



Fonte: [GASWIDE \(2016\)](#).

Vasos Esféricos, são os que permitem uma melhor distribuição das tensões, e com isso uma menor espessura de parede em relação aos vasos cilíndricos, quando comparados com a mesma pressão e volume (Telles, 1996).

Exemplo 2.6. *Tanque de armazenamento de gás.*

Figura 2.7 – Tanque Esférico para Armazenamento de Gás



Fonte: [CNI \(2019\)](#).

Vasos Cônicos, são utilizados como elo entre vasos cilíndricos de diâmetro diferente, quando existe uma diferença de vazão entre secções do vaso (Telles, 1996).

Exemplo 2.7. *Tanque de fermentação.*

Os vasos podem ser uma composição dos formatos cilíndricos, cônico e esférico, ou então geminados (vasos cilíndricos).

Vasos Geminados são aqueles onde dois ou mais vasos cilíndricos de mesmo diâmetro são construídos como um conjunto único (Telles, 1996).

Definição 2.5 (Posição). *Relação espacial com referência ao plano horizontal (assoalho).*

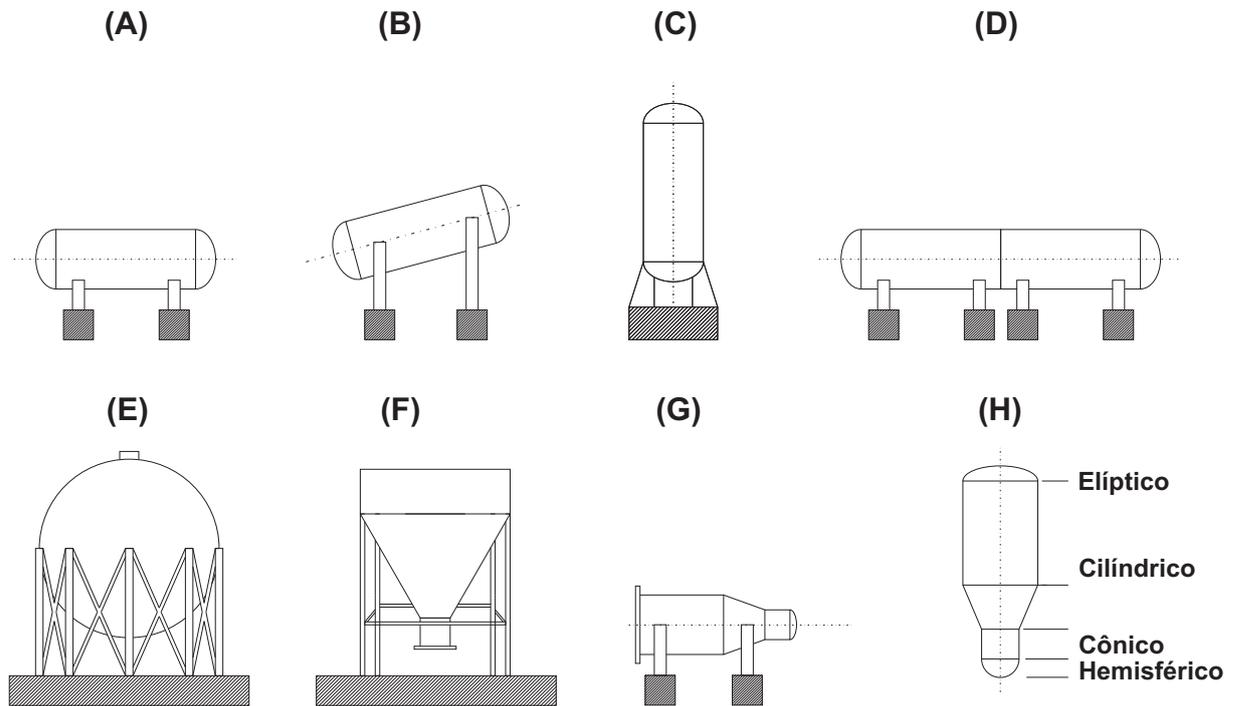
Os vasos de pressão podem ser categorizados em vasos horizontais, verticais e inclinados. Essa posição, geralmente, é determinada pelas características das suas aplicações.

Vasos Horizontais são bastante comuns em vasos de acumulação e trocadores de calor. Possuem menor custo de fabricação com relação as demais tipos (Telles, 1996).

Vasos Verticais são mais utilizados em vasos de processo (definição 2.5) quando a gravidade é fator fundamental. Tem um custo mais elevado, porém ocupam uma área menor (Telles, 1996).

Vasos Inclinados não são comuns e são utilizados quando existem necessidades específicas de serviço, como por exemplo a necessidade de escoamento por ação da gravidade de fluidos de elevada viscosidade, e portanto, elevada resistência ao escoamento (Telles, 1996).

Figura 2.8 – Formatos e Posições dos Vasos de Pressão



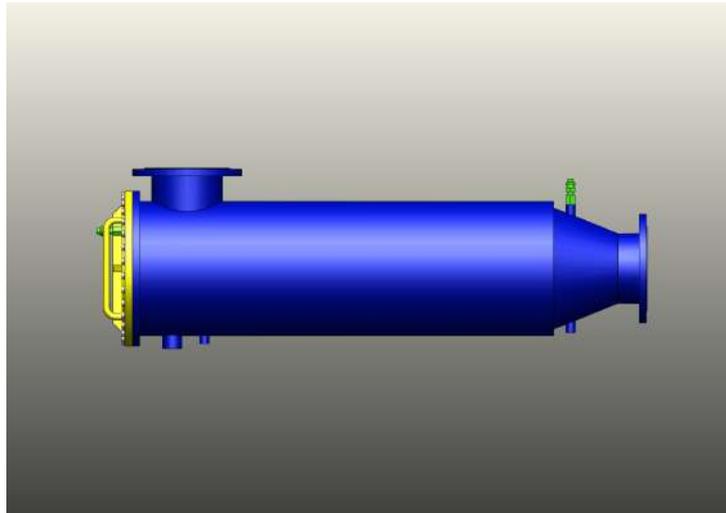
Fonte: elaborado pelo autor.

Legenda: (A) Vaso cilíndrico horizontal; (B) Vaso cilíndrico inclinado; (C) Vaso geminado; (D) Vaso esférico; (E) Vaso cilíndrico-cônico; (F) Vaso composto; (G) Exemplo de múltiplos formatos em um vaso.

2.3 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Analisando o Filtro de Óleo Naval da figura 2.9 somos capazes de classificar e tipificar através das definições apresentadas nesse capítulo.

Figura 2.9 – Modelo CAD do Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

- Quanto a classe:
 - Vaso não-sujeito a chamas.

- Quanto ao tipo:
 - Finalidade: Vaso de processo.
 - Formato: Vaso cilíndrico com parte cônica.
 - Posição: Horizontal.

A classificação do Vaso é importante na hora de adotar a norma, e faz parte da compreensão necessária para construção de modelos e elaboração do projeto.

3 PARTES PRINCIPAIS DOS VASOS DE PRESSÃO

3.1 VISÃO GERAL

Para entender os vasos pressão, é necessário compreender algumas terminologias que definem a “anatomia” básica do equipamento.

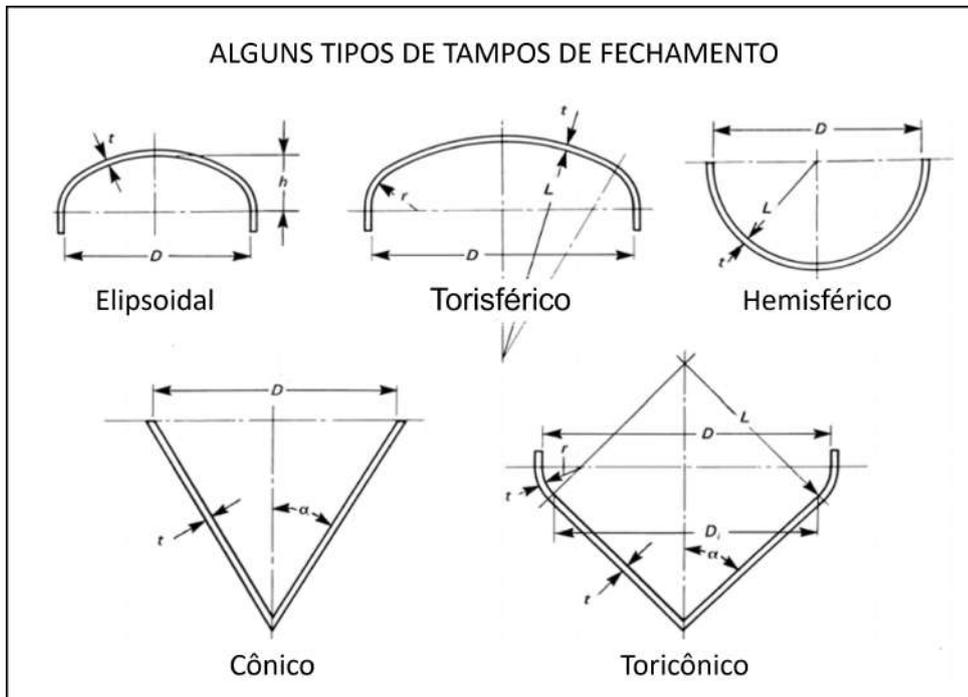
Definição 3.1 (Parede de Pressão, *pressure wall*). *Envoltório hermético externo que contém o fluido pressurizado, podendo ser simples ou de múltiplas camadas (Telles, 1996).*

Definição 3.2 (Casco, *shell*). *Parte construtiva principal do vaso, cujo formato é preferencialmente uma superfície de revolução (Telles, 1996).*

Definição 3.3 (Tampo de Fechamento, *head*). *Componente responsável pelo fechamento dos Vasos de pressão, podendo apresentar-se sob diferentes geometrias (Telles, 1996).*

Os tampos de fechamento costumam apresentar geometria esférica, elíptica, hemisférica, torisférica, cônica e plana (ASME VIII DIVISÃO 2, 2021).

Figura 3.1 – Alguns Tipos de Tampos de Fechamento em Vasos de Pressão



Fonte: ASME, 2021c, p.378 (com adaptações).

As definições 3.2 e 3.3, são os elementos básicos da Parede de Pressão, podendo os vasos, ainda, conterem partes como: suportes (componente não sujeito a pressão), além de peças internas e externas, denominadas acessórios (serão abordados com maior detalhamento no capítulo 4.

É importante salientar que a norma busca sempre determinar a espessura mínima da parede do vaso (t), a fim de que este possa suportar as cargas nele aplicadas.

Compreender a geometria e partes dos Vasos de Pressão, é parte essencial durante a aplicação da ASME Secção VIII, Divisão 2. Quando se projeta um vaso por Análise de Requisitos¹, executa-se um processo de classificação das tensões² conforme a observação da geometria do vaso.

Cada região do Vaso de Pressão poderá apresentar um valor de tensão admissível distinto, a depender do tipo da tensão atuante, a origem dessa tensão (tipo de carregamento) e das características geométrica de cada região do equipamento.

Quando observamos a figura 2.8, os formatos dos itens (G) e (H), apresentam regiões de descontinuidade geométrica. Essas regiões ocorrem onde a geometria sofre alterações abruptas na sua secção transversal. Em geral, essas alterações geométricas irá ocorrer quando há alterações no seu formato, por exemplo, na região de mudança entre a forma cilíndrica e cônica.

A Definição ASME 4 apresenta o conceito de GSD, regiões no vaso onde há mudanças na sua forma (descontinuidade geométrica) e portanto, são locais onde apresenta concentradores de tensão.

As definições abaixo irão permitir entender o que são os concentradores de tensão e em seguida poderemos compreender a importância da Divisão 2 permitir trabalhar com MEF.

Definição 3.4 (Concentradores de Tensão). *Quaisquer elementos presentes no vaso que gere alterações abruptas em sua secção transversal, tais como furos, entalhes, filetes, roscas etc.* ([Budynas; Nisbeth, 2016](#); [Ugural, 2015](#)).

Definição 3.5 (Concentração de Tensão). *Elevação das tensões provocadas por mudanças abruptas (descontinuidade geométricas) das secções transversais. Sendo as tensões nessas regiões denominadas de tensão local ou de pico* ([Ugural, 2015](#)).

¹ Ver ASME Secção VIII, Divisão 2, Parte 5, pg.579. 2021.

² Ver Capítulo 6.

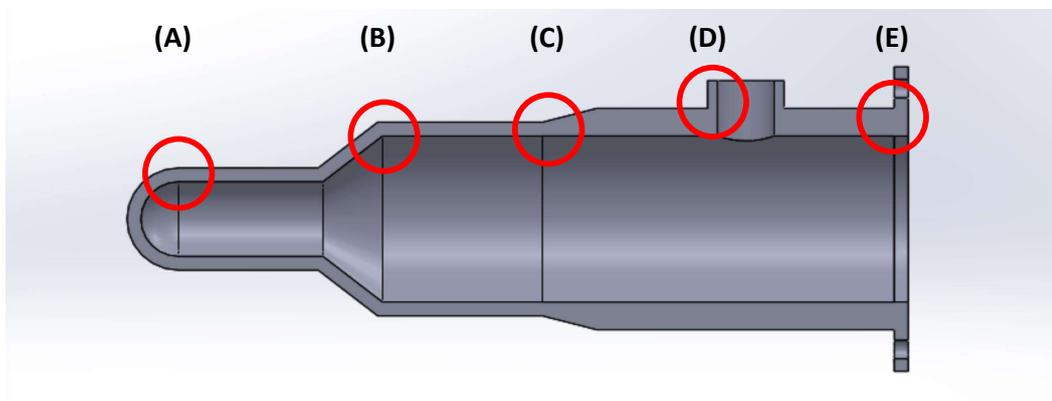
Das Definições 3.4, 3.5, temos que as GSD são fatores de concentração de tensão e são regiões que precisam ser bem definidas durante o processo de análise para aplicação da Divisão 2.

Definição 3.6 (Concentração de Tensão). *Alteração na distribuição de tensões provocada por descontinuidades geométricas em qualquer equipamento, de forma que as equações de continuidade não mais descrevem a tensão presente no entorno da região* (Budynas; Nisbeth, 2016).

A Definição 3.6, deixa evidente o risco da não avaliação correta da geometria do equipamento. Uma vez que os métodos conservadores de cálculo não se aplicam, corremos o risco de superdimensionar ao termos que fazer considerações grosseiras de projeto. Por isso se diz que a Divisão 2 permite espessuras de paredes menores que a Divisão 1 (Telles, 1996).

Sob a ótica da Definição ASME 4, e da Definição 3.4 temos os seguintes exemplo de GSD (Gross Structural Discontinuity) conforme figura 3.2:

Figura 3.2 – Exemplo de Regiões GSD



Fonte: elaborado pelo autor.

Legenda: Regiões de junções tampo de fechamento-casco (A); junção entre regiões de diferentes geometrias (B); junção entre cascos de espessuras diferentes (C); bocais-casco (D); flange-casco (E);

Qualquer abertura presente em um vaso de pressão irá gerar enfraquecimento em sua parede, sobretudo devido aos concentradores de tensões (Telles, 1996).

Observação 3.1. *Naqueles casos, onde não é possível aplicar a teoria da elasticidade para determinar as tensões ou a deformação em regiões de descontinuidade geométrica, pode-se utilizar métodos experimentais ou então aplicar Método dos Elementos Finitos (MEF) (Ugural, 2015).*

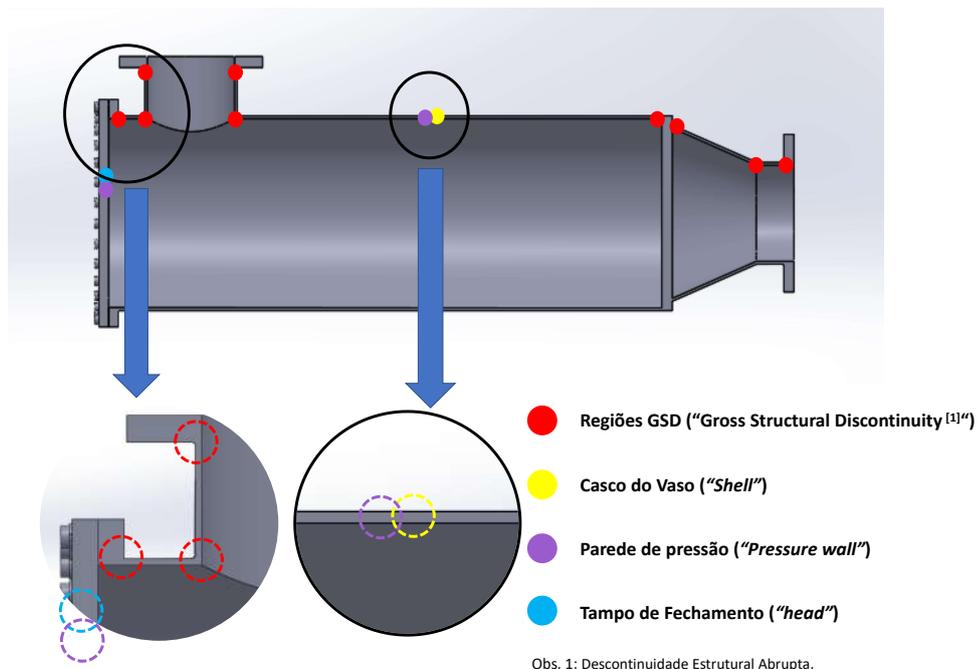
Um grande diferencial da Secção VIII, Divisão 2 é justamente fornecer a possibilidade de projetar um Vasos de Pressão através de MEF, naqueles casos onde existam a presença de Regiões com GSD e/ou vasos de geometria e aplicações complexas.

Observação 3.2. *é fundamental compreender e saber detectar as regiões de GSD. Essas regiões deverão receber atenção especial na concepção do modelo CAD, pois serão as regiões onde haverá a etapa de Linearização no pós-processamento do Modelo Numérico.*

3.2 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Na análise da figura abaixo, podemos ver apontados as regiões com GSD no Filtro de Óleo Naval. Essa classificação será de total importância no momento de determinar quais tipos de tensões (Primária ou Secundária)³ irá atuar em cada região do equipamento.

Figura 3.3 – Classificação das Partes Principais do Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

³ Ver Capítulo 6.

Os pontos em vermelho marcados na figura 3.3 indicam as regiões de interesse que devem receber atenção especial na preparação do modelo para análise MEF. Essas regiões precisam passar por um processo de fatiamento no modelo, a fim de permitir um tratamento mais adequado durante o processo de geração das malhas conforme indicado pela norma.

4 ABERTURA E ACESSÓRIOS EM VASOS DE PRESSÃO

4.1 VISÃO GERAL

Os Vasos de Pressão irão possuir aberturas ("*opennings*"), cuja finalidade são diversas, e sem as quais os vasos não possuiriam utilidade (Telles, 1996).

As aberturas servirão para ligações entre tubulações e/ou outros Vasos de Pressão, instrumentação, respiro e drenagem, bocas de visitas e/ou inspeção, desmontagens, peças internas, dentre outras (Telles, 1996).

Ao se fazer um projeto de Vasos de Pressão, conforme os critérios da ASME VIII - Divisão 2, deve-se consultar o paragrafo 4.5¹ da norma (REGRAS DE PROJETO PARA ABERTURAS EM CASCOS E TAMPOS). Quando por questões de projeto (carregamento, formato, tamanho etc.) não for possível utilizar os critérios da *Parte 4* deve-se partir para a abordagem por Análise de Requisitos (*Parte 5*, da mesma norma).

Os principais tipos de aberturas e acessórios são: bocais, bocas de visitas, e inspeção, flanges, dentre outros.

4.2 BOCAIS

Os bocais são elementos comuns em Vasos de Pressão. A maior parte deles são forjados ou fundidos, mas também podem ser construídos com base em tubos ou chapas grossas (Matthews, 2000).

Definição 4.1 (Bocais). *Consistem em aberturas de saída para fluidos efluente e promovem um aumento da velocidade do fluxo. Também podem apresentar-se com a função de ejeção ou entrada de fluidos, tendo como exemplo, drenos (Horner; Abbey, 1960).*

Trecho de norma 4.1 (ASME BPVC VIII – Divisão 2, 4.5.2.1, p.257. 2021.). *“Os bocais devem ser circulares, elípticos ou de qualquer outra forma que resulte da intersecção de um cilindro circular ou elíptico com o vaso.”*

Apesar de menos usuais, formas não-circulares podem ser utilizadas como: elípticas, ovoides etc. (Telles, 1996).

¹ Ver ASME BPVC Seção VIII Divisão - 2, 4.5, pg. 258. 2021.

Há diversos tipos de bocais, sendo o mesmo definido pela natureza e modo de funcionamento do vaso (Matthews, 2000).

Alguns tipos de bocais podem ser observados na figura 4.1.

Figura 4.1 – Alguns Tipos de Bocais e Formatos de Conexões



Fonte: Matthews, 2000, p.157 (com adaptações).

(A) Conexão rosca; (B) Conexão para solda de topo; (C) Conexão tipo joelho; (D) Manga de conexão; (E) Sela de reforço; (F) Conector lateral; (G) Niple rosca; (H) Niple para conexão soldada;

Os bocais, a partir de determinados diâmetros, terão que apresentar um reforço estrutural a fim de restaurar as tensões na parede do vaso, sendo isto definido por normas (Matthews, 2000).

4.3 BOCA DE VISITA E DE INSPEÇÃO

Dentre as varias aberturas necessárias num vaso de pressão, as bocas de visita/inspeção existirão para permitir exames exigidos por normas e regulamentos de segurança. O tamanho e a quantidade dessas aberturas serão definidas de acordo com o tamanho do vaso (Matthews, 2000).

Trecho de norma 4.2 (ASME VIII – DIVISÃO 2, 4.5.16.1, p.273. 2021.). *"Todos os vasos de pressão para uso com ar comprimido e aqueles sujeitos a corrosão interna ou que tenham*

partes sujeitas a erosão ou abrasão mecânica (ver 4.1.4), exceto quando permitido de outra forma neste parágrafo, devem ser providos de uma "manhole"² adequada, "handhole"³, ou outra abertura(s) de inspeção para exame e limpeza."

Definição 4.2 (Bocas de Visitas/Inspeção). *São aberturas fechadas por tampas móveis, cuja finalidade é permitir o acesso ao interior do Vaso de Pressão, permitindo com isso operações como montagem, remoção de peças internas, manutenção, limpeza, e sobretudo inspeções (Telles, 1996).*

4.4 FLANGES

Flanges são uma forma de conexão bastante utilizadas entre Vasos de Pressão e tubos, apesar de não possuírem critérios simples, nem gerais de dimensionamento (Annaratone, 2007).

Utiliza-se o sistema conexões flangeadas para facilitar a desmontagem de equipamentos ou junção entre tubulações (Bickell; Ruiz, 1967).

Definição 4.3 (Flange). *Consiste em uma nervura ou rebordo (borda voltada para fora) cuja finalidade é fornecer fixação através de parafusos (Horner; Abbey, 1960).*

Diversos tipos de flanges são empregadas em bocais e bocas de visita e de inspeção, dentre elas, flanges de pescoço ("welding neck"), flange sobreposta ("slip-on"), flange do tipo anel ("ring type flange"), flange para solda de encaixe ("socket-weld flange"), flange de pescoço longo ("long welding neck flange"), flange solto ("lap-joint flange"), dentre outras (Telles, 1996).

4.5 OUTROS ACESSÓRIOS

Os vasos de pressão podem conter diversas peças internas, que irão depender da finalidade do vaso (Telles, 1996).

Dentre os acessórios, podemos cita: distribuidores, grades ("grating"), bandejas ("trays"), borbulhadores ("bubble-caps"), chicanas ("baffles"), calhas ("down corners"), cole-

² "Manhole": Boca de Visita (Telles, 1996) ou Porta de Inspeção (Marques, 1959), consiste em uma abertura cujo diâmetro permita o acesso de uma pessoa ao interior do vaso de pressão (Horner; Abbey, 1960).

³ "Handfole": Janela ou Abertura de Inspeção ou Manejo (Marques, 1959), consiste em uma abertura cujo tamanho é suficientemente grande para inserção apenas de uma mão ou braço, permitindo assim inspecionar ou limpar locais cujo acesso não seja possível (Corrosionpedia, 2015).

tores ("*sumps*"), chaminés ("*risers*"), potes de selagem ("*seal pans*"), quebra-vórtices ("*vortex breakers*"), dentre outros (Telles, 1996).

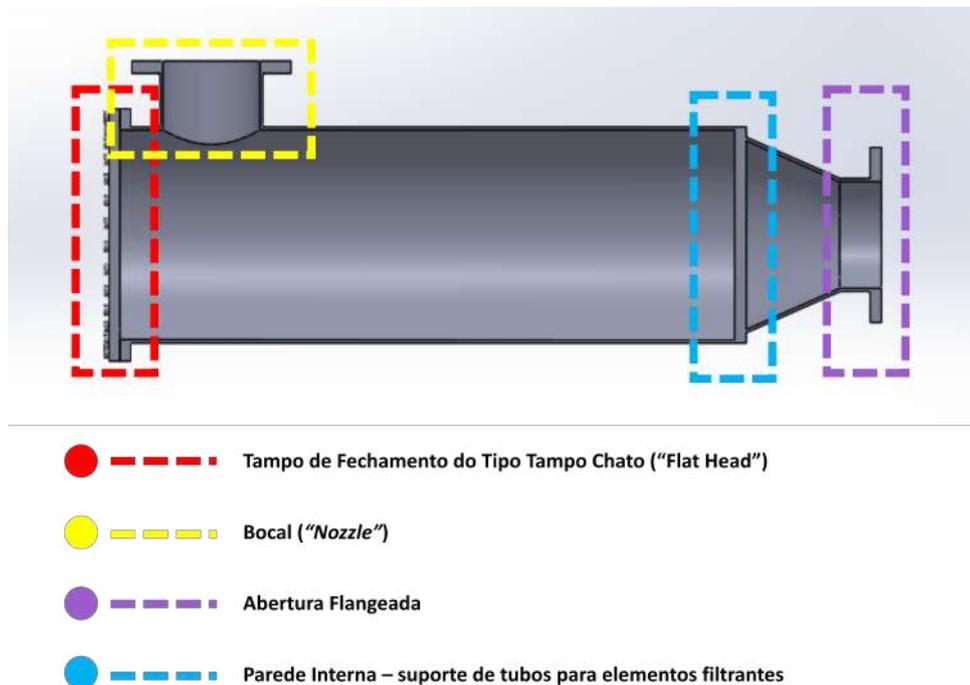
A partir das definições 3.4, 3.5 e 3.6, fica demonstrado que bocais, flanges, vasos com bocas de visitas etc. possuem elementos que provocam concentração de tensão, sendo assim a observação 3.1, torna válida a busca por metodologias normatizadas que nos permitam utilizar o **MEF** em projeto ou análise de projetos em Vasos de Pressão.

4.6 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

O filtro de óleo naval em estudo, a partir da análise do capítulo 3, e dos conceitos demonstrados no capítulo 4, apresenta diversas aberturas e acessórios, como flanges, bocais, bocas de inspeção (*manhole*), além de regiões de descontinuidade geométrica (GSD), já apresentadas na figura 3.3.

A figura 4.2 traz as aberturas e acessórios encontrados no Filtro de Óleo Naval. Dentre as aberturas temos: tampo de fechamento (boca de visita/inspeção); bocal; abertura flangeada; parede interna.

Figura 4.2 – Classificação das Aberturas e Acessórios do Filtro de Óleo Naval.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observação 4.1. *Da análise do filtro, tomando por base o exposto na observação 3.1, esse equipamento, devido a sua complexidade geométrica, deve ser analisado através de métodos computacionais.*

5 ASME E A NORMATIZAÇÃO PARA VASOS DE PRESSÃO

5.1 VISÃO GERAL

As normas de Vasos de Pressão, são documentos elaborados e publicados por associações técnicas ou sociedades de normalização públicas ou particulares de diferentes países. Diversos temas são englobados dentro dessas normas e podem variar no nível de exigência e detalhamento (Telles, 1996).

As normas visam garantir condições mínimas de segurança para operação, além de buscar padronizar e simplificar projetos e cálculos (Telles, 1996).

A ASME é subdividida em 13 comitês, cujo propósito é definir regras relacionadas a segurança e integridade estrutural para a construção e inspeção de equipamentos de pressão, como caldeiras, vasos de pressão, tanques de transporte, componentes de plantas nucleares etc.

Cada comitê é responsável pela elaboração de uma seção da norma, conforme apresentado na figura 5.1¹. A Seção VIII é responsável por abordar as regras para construção de Vasos de Pressão, já a Seção II fornece dados e propriedade dos materiais para utilização nas demais Seções da norma.

A ASME Seção VIII é subdividida em 3 divisões. Cada divisão irá abordar um determinado escopo de equipamentos.

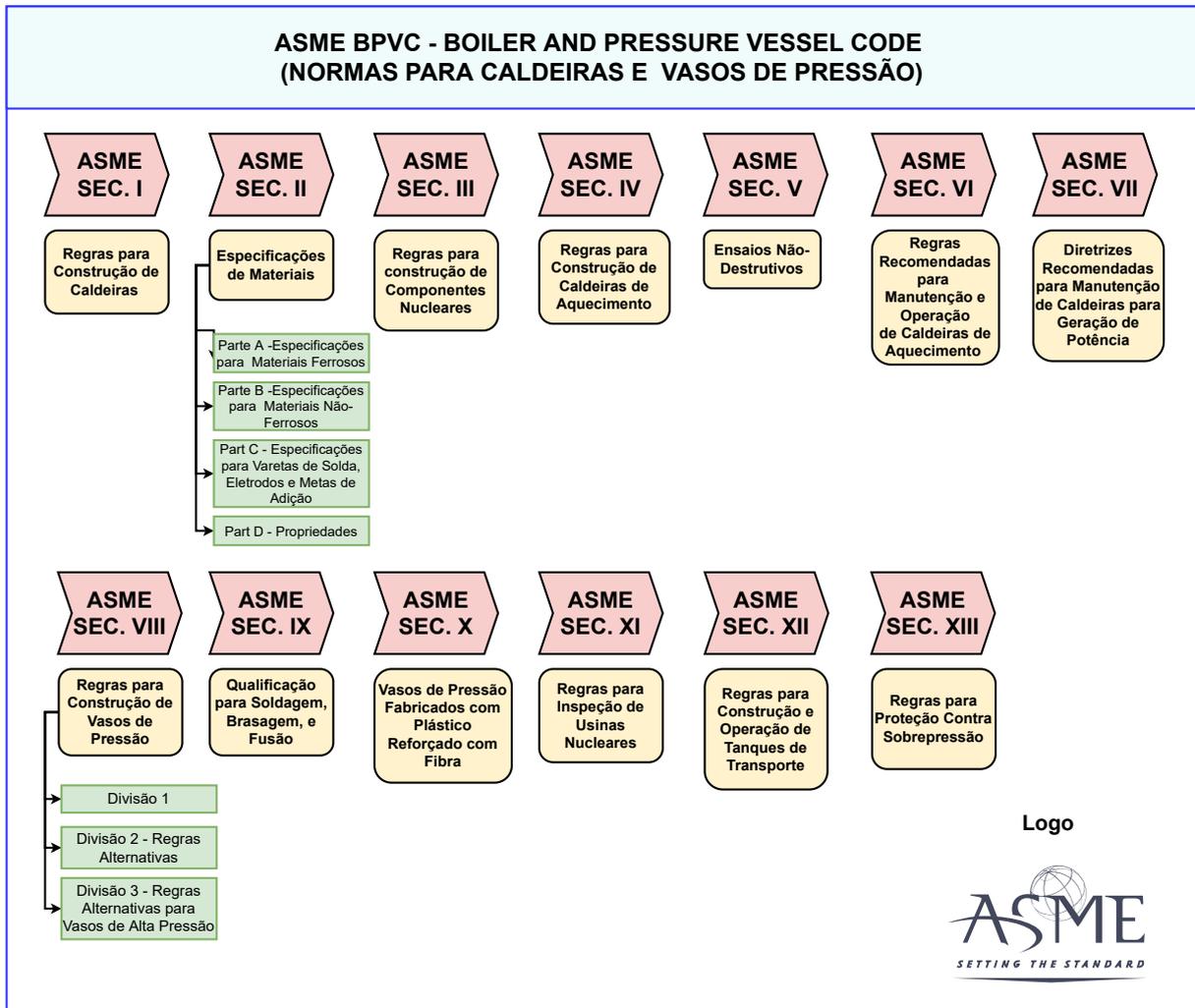
As divisões da ASME BPVC Seção VIII são:

- ASME VIII Divisão 1 – Regras para Construção de Vasos de Pressão.
- ASME VIII Divisão 2 – Regras para Construção de Vasos de Pressão: Regras Alternativas.
- ASME VIII Divisão 3 – Regras para Construção de Vasos de Pressão: Regras Alternativas para Vasos de Alta Pressão.

A aplicação de uma determinada Divisão está relacionado a fatores como tipo de equipamento, emprego, nível de risco, tipos de carregamentos mecânicos e térmicos, ambiente de instalação, dentre outros.

¹ No Apêndice A pode-se ver a imagem em maior resolução.

Figura 5.1 – Comitês da ASME para Equipamentos de Pressão



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 RESUMO HISTÓRICO

A "*The American Society of Mechanical Engineers - ASME*" (Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos) surgiu de reuniões e debates realizados por técnicos e industriais, pela primeira vez 1880, em Nova York - EUA. A ASME surge como fruto desses encontros, através da liderança de Henry R. Worthington, Alexander Lyman Holley e John Edson Sweet (ASME, 2016a).

A norma surge com o intuito de melhorar a confiabilidade, segurança e obter ganhos de eficiência operacional, na produção mecânica e projetos de máquinas. Inicialmente o intuito era desenvolver normatizações para a fabricação de peças de armas, máquinas de costura, de escrever, motores a vapor, locomotivas, dentre outros tipos de equipamentos (ASME, 2016a).

Em 1884, surge a primeira norma, "*Code for the Conduct of Trials of Steam Boilers*", com o objetivo de solucionar questões ligadas a teste e ensaios de caldeiras. Já em 1887 a ASME publicou "*Standard for the Diameter and Overall Dimensions of Pipe and Its Threaded Ends*", voltado para a normatização da produção em massa de tubos (ASME, 2016a).

No início do século XX, duas explosões de caldeiras em fábricas de calçados, no estado de Massachusetts - EUA (Brockton, 1905 e Lynn, 1906), levaram a sociedade a debater a necessidade de regulamentações. Os incidentes provocaram inúmeras mortes de operários (ASME, 2016a).

Em 1909 foi promulgada a lei estadual de Massachusetts: "*An Act Relating to the Operation and Inspection of Steam Boilers*". A lei regulava a operação, fabricação e inspeção de caldeiras. O principal objetivo da legislação era minimizar questões problemática recorrente no setor. Essa regulação foi precursoras das normatizações da ASME referente a Caldeiras e Vasos de Pressão (ASME, 2016a).

A primeira edição da norma ASME "*Boiler and Pressure Vessel Code*" (BPVC) foi publicada em 1915. A norma buscou padronizar vários aspectos relativos aos Vasos de Pressão e Caldeiras (ASME, 2016a).

A Seção VIII (Regras para Construção de Vasos de Pressão) da Norma ASME BPVC, foi evoluindo ao longo do tempo e se adaptando as necessidades da indústria e se adequando aos avanços científicos e tecnológicos.

Em 1925 surge a ASME BPVC Seção VIII (Norma de Caldeira e Vasos de Pressão, Seção VIII), sendo direcionada para Vasos de Pressão sem-chamas, tendo sido renomeada para "*Rules for Construction of Pressure Vessels, DIVISION 1*" (Regras de Construção de Vasos de Pressão, Divisão 1) (ASME, 2016b).

Em 1968, é publicada a primeira edição do BPVC - Seção VIII - Divisão 2 (Regras Alternativas para Construção de Vasos de Pressão) (ASME, 2016b).

Em 1997, é publicada a Divisão 3, da BPVC Seção VIII (Regras Alternativas para Construção de Vasos de Alta Pressão) (ASME, 2016b).

5.3 ASME VIII DIVISÃO 1 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

Definição 5.1 (ASME VIII Divisão 1). *Consiste em uma série de normas para construção de Vasos de Pressão, utilizando métodos tradicionais de projeto através de cálculos analíticos.*

Foi a primeira das 3 (três) divisões da Secção VIII e ser elaborada e publicada.

Trecho de norma 5.1 (ASME VIII – Divisão 1, U-1(a)(1), p.1. 2021). *"Esta Divisão contém requisitos obrigatórios, proibições específicas e orientações não obrigatórias para materiais, projeto, fabricação, exame, inspeção, teste, certificação e regulagem de pressão em Vasos de Pressão."*

Do trecho de norma 5.1, temos que a norma ASME abrange fórmulas de cálculos, detalhes de projetos, fabricação, e materiais etc. A norma fornece regras e códigos que abordam o equipamento da fase de projeto e se estende ao longo da sua vida útil.

A Divisão 1 é subdividida em 3 (três) subsecções: A, B e C.

A **Subsecção A** consiste na Parte UG, que abrange os requisitos gerais aplicáveis a todos os Vasos de Pressão: como materiais, partes do vaso, inspeção, regras de projetos, dentre outros.

A **Subsecção B** discorre sobre requisitos de acordo com o método de fabricação dos vasos e suas partes. É formada pelas Partes UW (fabricados por soldagem), Parte UF (forjamento), Parte UB (brasagem).

Já a **Subsecção C**, traz requisitos sobre as diferentes classes de materiais empregados nos Vasos de Pressão. É dividida em 11 partes, e aborda materiais como: aço carbono e baixa liga, aços de alta liga, materiais não-ferrosos etc.

As regras estabelecidas pela ASME Secção VIII - Divisão 1, servem de base para formulação de regulamentos e leis, sejam elas, federais, regionais ou locais e estão sujeita a aplicação total ou parcial por parte dos entes reguladores.

A **Divisão 1** inclui todos os Vasos de Pressão, com exceção:

- Daqueles que estão no escopo de outras Secções;
- Vasos sujeitos a chamadas;
- Equipamento de pressão que possuem partes moveis, integral ou parcialmente sob rotação ou movimento alternativo, como: compressores, bombas, turbinas etc.;
- Estrutura cuja função primária seja o transporte de fluídos, como sistemas de tubulações;
- Componentes de tubulações, como tubos, flanges, gaxetas, válvulas, juntas de expansão, dentre outros acessórios².

² Ver ASME Secção VIII - Divisão 1, U-1(c)(2)(-e), p.1. 2021.

- Vasos contendo água sob pressão, mesmo os que contenham ar, quando todas as condições abaixo estão presentes:
 - Pressão de projeto³ superior à 300 *psi* (2 *MPa*).
 - Temperatura de projeto superior à 210 °F (99 °C).
- Tanques de armazenamento de água quente aquecido por vapor ou meios indiretos, quando as condições abaixo estão presentes:
 - Taxa de entrada de calor for superior 200.000,00 *Btu/hr* (58,6 *kW*).
 - Temperatura da água superior à 210 °F (99 °C).
 - Tanques com volume nominal superior a 20 *gal* (450 *L*).
- Vasos cuja pressão de projeto, interna ou externa, seja inferior a 15 *psi* (103 *MPa*).
- Unidades Combinadas⁴ cuja pressão interna ou externa em qualquer uma das câmaras, ou no elemento comum seja inferior a 15 *psi* (103 *MPa*).
- Vasos cujo diâmetro interno, largura, altura ou secção transversal diagonal seja inferior a 6 polegadas (152 *mm*), sem limitações devido ao comprimento do vaso de pressão.
- Vasos de pressão para ocupação humana.⁵

Observação 5.1. *A ASME Secção VIII - Divisão 1 não especifica de forma nominal quais tipos de equipamentos estão em seu escopo. A norma se propõe a abranger todos os equipamentos, com exceção daqueles nominalmente citados.*

Observação 5.2. *Os vasos de pressão projetados de acordo com a Divisão 1, devem ter uma Pressão Máxima de 3.000 *psi* (20 *MPa*).*

A Divisão 1 da Secção VIII da ASME BPVC deverá ser utilizada sempre que o equipamento tiver uma menor complexidade geométrica, de carregamentos mecânicos ou térmicos (não houver cargas cíclicas, por exemplo), climáticas, entre outras. Essa divisão possui

³ Ver Conceito ASME 1.

⁴ Vasos de pressão composto por mais de uma câmara de pressão dependente ou independentes entre si, ligadas por um elemento comum, e que podem operar sob a mesma pressão, ou sobre condições distintas de temperatura e pressão (ver ASME Secção VIII - Divisão 1, UG-19(a), p.14. 2021.).

⁵ A ASME PVHO-1 (Safety Standard for Pressure Vessels for Human Occupancy), é a norma ASME que regula equipamentos com a finalidade de ocupação humana.

uma serie de limitações com relação ao seu emprego. Sempre que um Vaso de Pressão não se enquadrar em seu escopo, deve-se utilizar a Divisão 2 ou Divisão 3 da Secção VIII.

5.4 ASME VIII DIVISÃO 2 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO: REGRAS ALTERNATIVAS

A Divisão 2, surgiu da necessidade de adequar novas metodologias de engenharia (métodos computacionais) às necessidades técnicas e evoluções tecnológicas do Pós-Segunda Guerra Mundial.

Esta divisão veio com o intuito de preencher lacunas normativas da Divisão 1, e trouxe regras alternativas de projeto, permitindo assim projetos para aplicações mais complexas. Os métodos de cálculo e de projeto explicitados na Divisão 2, permitem a construção de vasos com espessura de parede e peso menor quando comparado com a metodologia de projeto da Divisão 1 para um equipamento a mesma pressão e geometria. Ela também permitiu a construção de Vasos de Pressão para operações com níveis de pressão maiores (Farr J.R. e Jawad, 2010).

Definição 5.2 (ASME VIII Divisão 2). *Norma ASME para equipamentos de pressão. Trata de normas obrigatórias, e recomendações voltadas para projetos e fabricação dos Vasos de Pressão, abarca uma classe maior de equipamentos que a Divisão 1, e permite formas alternativas de projeto que não apenas métodos analíticos.*

Esta Divisão não estabelece um limite máximo de pressão em operação, porém o vaso de pressão deve ser destinado para aplicações específicas⁶, onde as condições de uso devem ser estabelecidas previamente em um documento chamado de *User's Design Specification*⁷ (Telles, 1996).

Definição 5.3 (User's Design Specification). *Documento emitido pelo projetista contendo informações detalhada para cada Vaso de Pressão construído indicando que o equipamento foi projetado de acordo com a ASME VIII - Divisão 2.*

O documento *User's Design Specification*⁸, deve trazer informações como:

⁶ Vasos que não são de fabricação para uso geral ou vasos para operações sob condições severas como aqueles operando com fluídos corrosivos, por exemplo.

⁷ Tradução: Especificação de Projeto do Usuário.

⁸ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, 2.2.3, p.15. 2021.

- Local de instalação.
 - Endereço;
 - Condições ambientais (clima, cargas relativas aos ventos, cargas relativas a terremotos, neves, temperatura média mais baixa no local);
 - Identificação dos órgãos de regulamentação e fiscalização quando for aplicável.
- Identificação do vaso de pressão.
 - Número de identificação;
 - Propriedade dos fluido de serviço (gás, líquido, densidade etc.).
- Configurações do vaso.
- Condições de operação.
- Informações de projeto para ciclo de vida para falha por fadiga e corrosão.
- Material de construção do vaso.
- Dentre outras informações necessárias ⁹.

A Divisão 2, é dividida em 9 (nove) Partes, contendo regras obrigatórias e orientações não-obrigatórias, que proveem regras normativas, informes e ao final de cada Parte, em seus anexos, apresentam regras e sugestões de boas práticas¹⁰.

A Parte 1 da norma trata dos requisitos gerais, e apresenta orientações de como está estruturada a norma, além do seu escopo de aplicação.

Faz parte do escopo da ASME Section VIII - DIVISÃO 2, os equipamentos que estão de acordo com o Trecho de Norma 1.2.

Não irá fazer parte do escopo da norma equipamentos cuja pressão de projeto¹¹, interna ou externa, seja **inferior** a 15 *psi* (103 *kPa*).

A ASME Secção VIII - Divisão 2, abrange equipamentos que atuam sob condições adversas, de clima, de operação, ou sob efeito de cargas mecânicas cíclicas (sujeito a falha por fadiga).

⁹ Ver ASME BPVC VIII - Divisão 2, 2.2.3.1(f), p.16. 2021.

¹⁰ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, 1.1.2, p.1. 2021.

¹¹ Ver Conceito ASME 2

A norma também se aplicará na construção de Vasos de Pressão em algumas situações:

- Vasos estacionários (instalado em local fixo) para serviços específicos, cuja manutenção e acompanhamento devem ser efetuados ao longo de toda a sua vida útil.
- Vasos não-estacionário, instalado em navios, barcas, locomotivas, ou meios móveis onde as condições de carregamento impostas pelo movimento deverá ser considerada no projeto;
- Vasos de pressão ou partes que estiverem sujeitas a chamadas (definição 2.1).
- Dentre outros¹².

Os equipamentos serão Certificados como Classe 1 ou Classe 2¹³, conforme dados fornecido pelo Usuário do vaso na documentação do usuário (definido em 5.3).

Observação 5.3. *Os vasos serão certificados como **Classe 1** quando for fornecido dados pelo usuário que permitam executar a análise de fadiga¹⁴, caso contrário serão certificados como **Classe 2**.*

Há um fato a se observar com relação a análise dos Vasos de Pressão pela Divisão 2:

Observação 5.4. *Não deve ser considerado proibido o que não seja diretamente abordado pela norma acerca dos Vasos de Pressão. Fica a cargo do engenheiro tomar decisões em casos omissos, e se valer de um "juízo de engenharia"¹⁵ consistente com a filosofia da norma (ASME, 2021c).*

Observação 5.5. *Apesar de não haver um limite de pressão para a construção de Vasos pela Divisão 2, ela não inclui todos os tipos de vasos. Os Vasos de Pressão que operam sob alta pressão, acima de 68,95 MPa (10.000 psi), devem ser projetados com regras adicionais ou serem projetados pela ASME Seção VIII - Divisão 3.*

¹² Ver ASME BPVC VIII - Divisão 2, 1.2.1.3, p.2. 2021.

¹³ Ver ASME BPVC VIII - Divisão 2, 2.2.1, p.15. 2021.

¹⁴ Para melhor compreensão do conceito de Classe de Certificação você poderá ver: ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 2.2, p.15 e 4.1.1.2, p.170. 2021.

¹⁵ A norma traz a expressão "engineering judgment": julgamento técnico embasado na experiência do engenheiro com relação ao uso da norma (ASME, 2021c).

Observação 5.6. *Um dos principais diferenciais da Divisão 2 com relação a Divisão 1, é permitir o projeto por Análise de Requisito através do uso de metodologias computacionais como o Método dos Elementos Finitos (MEF).*

5.5 ASME VIII DIVISÃO 3 – REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO: REGRAS ALTERNATIVAS PARA VASOS DE ALTA PRESSÃO

Esta Divisão fornece regras de projeto, construção, inspeção, etc. para vasos cuja pressão de projeto¹⁶ seja elevada.

Observação 5.7. *A Divisão 3 não estipula limite inferior de pressão para seu uso, porém recomenda que seja aplicada quando a Pressão de Projeto for superior à superior a 10 ksi (70 MPa)¹⁷.*

Trecho de norma 5.2 (ASME VIII – Divisão 3, KG-101, p.1. 2021.). *"não é intenção desta Divisão estabelecer limites máximos de pressão para a Seção VIII, Divisão 1 ou 2, nem limites mínimos de pressão para esta Divisão."*

A partir do Trecho de norma 5.2 e da observação 5.7, fica evidente que a Divisão 3 é uma alternativa as demais divisões quando o vaso possui uma pressão de projeto elevada (ver Observação 5.5), porém não é de uso obrigatório, sendo em muitos casos possível fazer uso das demais divisões da ASME Seção VIII.

5.6 COMPARATIVO: DIVISÃO 1, DIVISÃO 2 E DIVISÃO 3

A escolha da Divisão da ASME BPVC - Seção VIII, estará diretamente correlacionada a aplicação do Vaso de Pressão, formato e as cargas atuantes. Além disso, questões importantes na seleção adequada da divisão devem ser observadas, tais como: local de instalação, condições ambientais e climáticas, condições específicas de operação e de manutenção ao longo da sua vida útil, dentre outras.

A tabela 5.1 mostra um resumo entre algumas características dos Vasos de Pressão e o escopo das divisões.

As Divisões 1 e 2, possuem escopos distintos, porém complementares, enquanto a Divisão 3 é recomendada para vasos que operam sob elevada pressão (ver subseção 5.5).

¹⁶ Ver Conceito ASME 3.

¹⁷ Ver ASME BPVC VIII - Divisão 3, KG-101, p.1. 2021.

Tabela 5.1 – Quadro comparativo: ASME Secção VIII - Div.1, Div.2, Div.3.

ASME - BPVC SECÇÃO VIII			
Característica	Divisão 1	Divisão 2	Divisão 3
Pressão superior a 20 MPa		✓	✓
Pressão superior a 70 MPa		✓	✓
Método analítico de projeto	✓	✓	✓
Métodos numérico na análise de projeto		✓	✓
Vaso destinado a um serviço específico pré-determinado		✓	✓
Vasos sujeito a chammas		✓	✓
Vasos não-estacionário		✓	✓
Vasos que geram vapor	✓		✓
Vasos sujeitos a cargas cíclicas		✓	✓
Vasos para ocupação humana			

Fonte: elaborado pelo Autor.

Observação 5.8. Enquanto a Divisão 2 e 3 irá abordar os vasos móveis¹⁸ (não-estacionário), cuja instalação se encontra em embarcações, locomotivas etc. a Divisão 1 traz em seu escopo apenas vasos estacionários.

As regras alternativas de projetos são a principal diferença entre a Divisão 1 e as demais.

Exemplo 5.1. Um vaso projetado com base na Divisão 1, irá permitir a análise do projeto apenas pelo método analítico. Caso o mesmo vaso enquadre no escopo da Divisão 2, ele poderá ser projetado ou pelo método analítico ou através da Análise de Requisitos¹⁹.

A Divisão 2 irá permitir menores espessuras de parede (t) que a Divisão 1, uma vez que permite trabalhar maiores valores de tensões. Há um grau de exigência maior no projeto e em inspeção ao longo da sua vida útil para projetar vasos que suportem maiores valores de pressão de acordo com as Divisões 2 e 3. Isso traz uma elevação ao custo de construção e operação do vaso (Telles, 1996).

Os vasos que estão no escopo da Divisões 2 e 3, são destinados a um serviço específico pré-determinado, ou seja as condições de operação e manutenção são especificadas no *User's Design Specification*²⁰. e devem ser observadas ao longo da vida útil do equipamento²¹.

¹⁸ Ver ASME BPVC VIII - Divisão 2, 1.1.1.3(b), p.2. 2021.

¹⁹ As regras alternativas de projeto fazem uso de métodos computacionais como o MEF.

²⁰ Ver Definição 5.3

²¹ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 2. p.15. 2021.

5.7 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Como abordado no Capítulo 1, o filtro de óleo irá operar dentro de um navio, dessa forma as condições de carregamento impostas ao vaso, devido a movimentação da embarcação estarão em constantes alterações, sendo portanto um filtro não-estacionário. O Filtro de Óleo Naval em estudo encontra-se no escopo da Divisão 2 de acordo com: **ASME BPVC Section VIII - Divisão 2, Parte 1, parágrafo 1.2, subparágrafo 1.2.1.3(b)**.

Observação 5.9. *Na documentação de requisitos enviada pelo usuário para análise do Filtro pela ASME não foi especificado informações sobre as condições de funcionamento cíclico do vaso. O filtro de Óleo Naval deverá ser Certificado como **Classe 2** uma vez que é necessário avaliar o equipamento sob condições para falha por fadiga²², de acordo com o expostos no subparágrafo 4.1.1.4²³ da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2.*

Uma vez que o Filtro está no escopo da Divisão 2, sendo um vaso de Classe 2 podemos abordar o projeto através da Análise de Requisitos²⁴, de acordo com **ASME BPVC Section VIII - Divisão 2, Parte 4, parágrafo 4.1, subparágrafo 4.1.1.5.2** e fazer uso do MEF no estudo do equipamento.

Observação 5.10. *A principal característica que nos força a utilizar a Divisão 2 é o fato do Filtro de Óleo ser um equipamento instalado em uma embarcação.*

²² Como não foi fornecido dados sobre os tipos de carregamento cíclico, durante a análise do requisito, trabalhou-se mediante algumas considerações que permitiram executar a avaliação para proteção contra cargas cíclicas, em caráter exemplificativo. Para o objetivo desse trabalho tais considerações foram suficiente para demonstrar aplicação da norma.

²³ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, 4.1.1.4, p.170. 2021.

²⁴ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, 5.1, p.579. 2021.

6 CLASSIFICAÇÃO DE TENSÕES SEGUNDO A ASME SECÇÃO VIII - DIVISÃO 2

6.1 VISÃO GERAL

Em vasos onde se apresentam regiões que não seja possível determinar as tensões analiticamente¹ (junções entre flange e bocal, aberturas etc.), através de fórmulas conhecidas, a Secção VIII - Divisão 2 permite projetar tais equipamentos através do método de Análise por Requisitos², utilizando métodos computacionais como o MEF (Farr J.R. e Jawad, 2010).

Programas computacionais como o ANSYS, ABAQUS, dentre outros, são utilizados para determinar a tensão total em um determinado ponto ou local do equipamento. A tensão pode ser dividida em três componentes: membrana, flexão e tensão de pico (Farr J.R. e Jawad, 2010).

Observação 6.1. *A Divisão 2, no anexo 5-A, traz recomendações para análise de pós-processamento da tensão elástica obtida através de elementos finitos. O primeiro passo é a determinação de planos de avaliações, tomando como referência o processo de **classificação das tensões** (ASME, 2021c).*

As tensões são classificadas em **Primária**, **Secundária**, e de **Pico** de acordo com a norma (Farr J.R. e Jawad, 2010).

6.2 TENSÕES PRIMÁRIAS

A principal característica da **Tensão Primária** é que não é auto-limitante (*"self-limiting"*), ou seja, não há uma redução de tensão devido a deformação no vaso (Telles, 1996).

Uma vez que as tensões primárias não são auto-limitantes, estas tensões irão provocar falhas estruturais e distorções consideráveis no vaso, caso o limite de escoamento do material seja excedido (Farr J.R. e Jawad, 2010).

Definição 6.1 (Tensão Primária³, *"Primary Stress"*). *São todas as tensões de cisalhamento e/ou normais (compressão ou tração) imposta por um carregamento (pressão interna ou externa,*

¹ Ver observação 3.1.

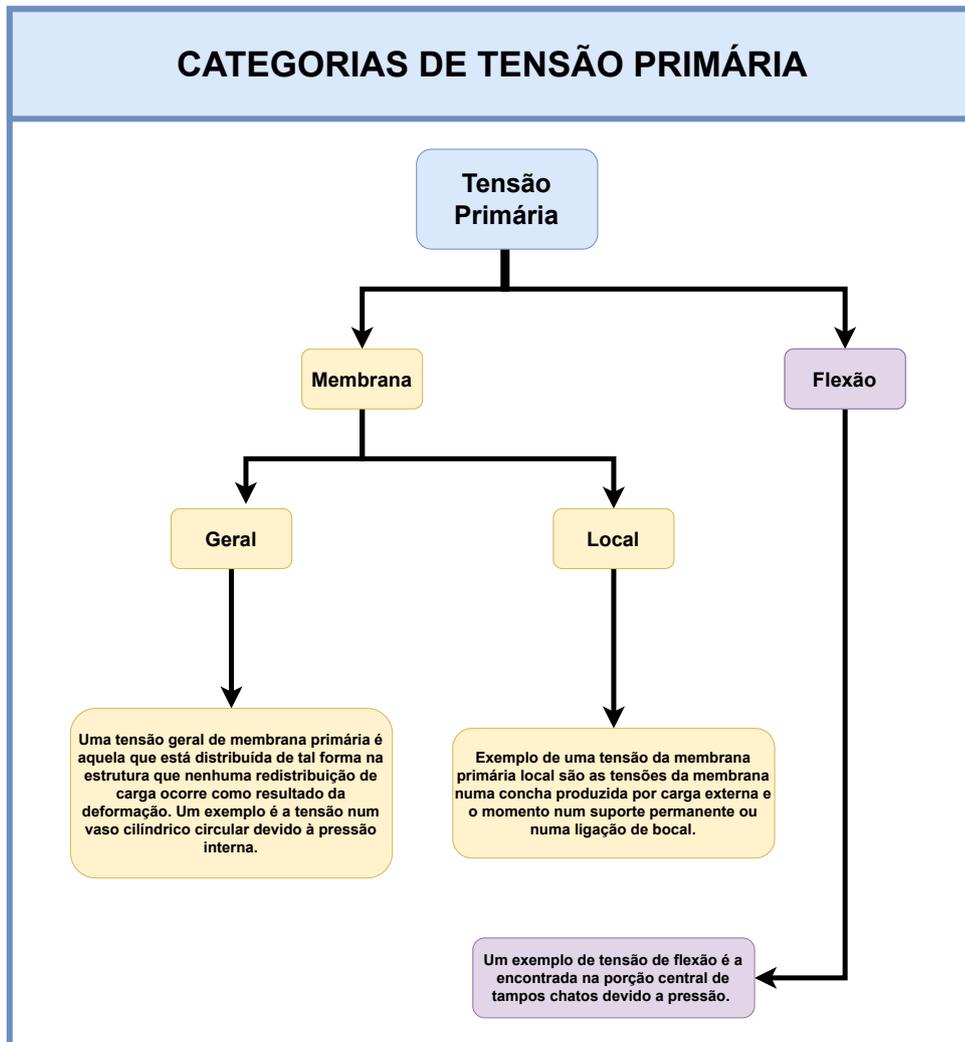
² Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5, p.679. 2021.

³ ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Part 5, 5.12(17), p.602. 2021.

peso, dentre outros) e que satisfaz as leis de equilíbrio de força e momento (ASME, 2021c).

A **Tensão Primária** é subdividida em **Tensão Primária de Membrana** e **Tensão Primária de Flexão** (ASME, 2021c).

Figura 6.1 – Categoria de Tensões Primárias.



Fonte: Farr J.R. e Jawad, 2010, p.255 (com adaptações).

6.2.1 Membrana Geral ("General Membrane")

Essa tensão irá surgir em regiões distantes de discontinuidades, provocadas pela pressão ou outro tipo de carregamento mecânico (ASME, 2021c).

Definição 6.2 (Tensão Primária de Membrana Geral (P_m)). *É aquela onde sua distribuição ao longo da estrutura ocorre de modo que não há redistribuição de carga como resultado do escoamento (ASME, 2021c).*

Exemplo 6.1. *Tensão longitudinal ou circunferencial provocada por pressão interna num vaso de corpo cilíndrico, será classificada como Tensão Primária de Membrana Geral.*

6.2.2 Membrana Local ("*Local Membrane*")

Essa tensão irá surgir devido a carregamentos mecânicos em regiões que apresentam descontinuidade geométrica (regiões de GSD⁴.)

Definição 6.3 (Tensão Primária de Membrana Local (P_L)). *É a tensão provocada apenas pela pressão ou outro carregamento mecânico em regiões de descontinuidade, desde que as cargas não gerem excessiva deformação ou transfira carga para outras regiões do corpo do vaso (ASME, 2021c).*

Observação 6.2. *As regiões onde se classifica como membrana local costumam ter características de tensão secundária, porém por uma questão de conservadorismo deve-se classificar como primária local, por sugestão da norma⁵ (ASME, 2021c).*

Exemplo 6.2. *Tensão encontrada em regiões de descontinuidade, como a região de transição entre a casco e o bocal de um vaso.*

6.2.3 Flexão ("*Bending*")

A **Tensão Primária de Flexão** (P_b) é a tensão provocada apenas pela pressão ou outro carregamento mecânico em regiões longe de descontinuidade, cujo valor é proporcional a distância com relação a linha neutra (ASME, 2021c).

Exemplo 6.3. *Tensão gerada por efeito da pressão interna na parte central de um tampo plano, caso não haja descontinuidade ou elementos que provoquem concentração de tensão.*

6.3 TENSÕES SECUNDÁRIAS

As **Tensões Secundárias** (Q) não são provocadas por carregamentos mecânicos. Elas são geradas por restrições geométricas do vaso ou resultantes da dilatação diferencial do vaso. Quando uma parte do vaso sofre dilatação ou contração, esta irá deformar-se, gerando tensões "secundárias" em regiões de transição geométrica (GSD) (Telles, 1996).

⁴ Ver Conceito ASME 4.

⁵ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, Part 5, 5.12(11), p.601. 2021.

Definição 6.4 (Tensão Secundária, "*Secondary Stress*"). *Tensão normal ou cisalhante, produzida pela restrição de partes adjacentes ou uma autorrestrição do vaso. Sendo a principal característica dessa tensão, ser autolimitante ("self-limiting" (ASME, 2021c).*

As tensões secundárias podem ser oriundas de tensões térmicas provocadas por distribuição não-uniforme de temperatura ou coeficientes de dilatação térmica diferentes. (Farr J.R. e Jawad, 2010)

Exemplo 6.4. *Tensões térmicas ou tensões de flexões provocadas em regiões de descontinuidade estrutural abrupta (GSD)⁶.*

6.4 TENSÃO DE PICO

A **Tensão de Pico** (F) irá surgir em regiões de GSD e podem ser provocadas por concentradores de tensões ou cargas térmicas.

Definição 6.5. *A Tensão de Pico, "Peak Stress" é uma tensão local, incapaz de gerar deformações observáveis, mas é uma fonte provável de trincas por fadiga ou fratura frágil (ASME, 2021c).*

Exemplo 6.5. *A tensão de pico poderá surgir em regiões de transição entre casco e flange, ou região onde há união entre diferentes espessura de parede⁷(t).*

6.5 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES

Quando se deseja aplicar a metodologia de projeto baseada na Análise de Requisitos⁸, a principal etapa é o processo de classificação das tensões⁹.

Esse processo consiste na observação e estudo da geometria do objeto e dos tipos de carregamentos. A partir disso, se classifica os tipos de tensões presente nas diferentes partes do equipamento.

Para classificar as tensões presentes em um equipamento, devemos analisar a **Tabela de Exemplos de Classificação de Tensão**¹⁰ presente na Parte 5, da ASME Seção VIII - Divisão 2.

⁶ Ver Conceito ASME 4.

⁷ Ver Definição 3.1.

⁸ Ver ASME Seção VIII - Divisão 2, 5.1, p.579. 2021.

⁹ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.2.2.2, p.581. 2021.

¹⁰ Ver ASME Seção VIII - Divisão 2, Tabela 5.6, p.611. 2021.

Essa tabela irá indicar a classificação da tensão a partir do tipo de componente do vaso, a localização, origem e tipo de tensão.

A Tabela 5.6 da norma trata-se de um resumo geral dos expostos no sub-parágrafo 5.2.2.2 da Divisão 2 - Categorização das Tensões¹¹. Esse trecho da norma traz a descrição de como classificar cada região do vaso em termos gerais. Quando se trata da classificação das tensões em bocais, a norma traz requisitos suplementares no parágrafo 5.6¹².

A classificação das tensões será utilizada na etapa de pós-processamento do MEF. Na etapa de Pré-processamento as regiões de interesses deverão receber tratamento de malha adequado e devem ser preparadas para ser aplicado o processo de linearização, onde a tensão ao longo da secção linearizada será fornecida em termos dos componentes: Tensão de Membrana, Flexão, Pico e Tensão Total.

6.6 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

A partir da análise da geometria do Filtro de Óleo Naval nas subsecções 3.2, e 4.6, e do tipo de carregamento aplicado (ver Figura 1.2), foi possível avaliar com auxílio tabela 5.6 da norma, apresentada na figura B.1 do anexo B, e executar uma pré-classificação das Tensões Primárias.

Analisando a figura 6.3, podemos classificar as tensões a partir do exemplo a seguir:

Exemplo 6.6 (Tampo de Fechamento Plano). *O tipo de componentes é um tampo plano, sendo avaliado no centro. Com o efeito da presso interna, irá surgir uma tensão de membrana e de flexão, e serão classificadas como: Tensão de Membrana Geral (P_m), e Tensão de Flexão (P_b). A figura 6.2, demonstra os passos para classificar esse componentes.*

¹¹ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, 5.2.2.2, p.581. 2021.

¹² Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, 5.6, p.598. 2021.

Figura 6.2 – Tabela 5.6 - Exemplo de Classificação das Tensões Primárias para o Tampo de Fechamento Plano

Tabela 5.6 Exemplos de Classificação de Tensão				
Componentes do Vaso	Localização	Origem da Tensão	Tipo de Tensão	Classificação
Tampas de fechamento planos ("Flat head") *	Região Central *	Pressão Interna *	Membrana *	P_m *
			Flexão *	P_b *
	Junção com o casco *	Pressão Interna	Membrana	P_L
			Flexão	Q

Fonte: Adaptado da Tabela 5.6, p.611 (ASME, 2021c).

Legenda: * indicam o caminho utilizado para classificação e determinação do tipo de tensão.

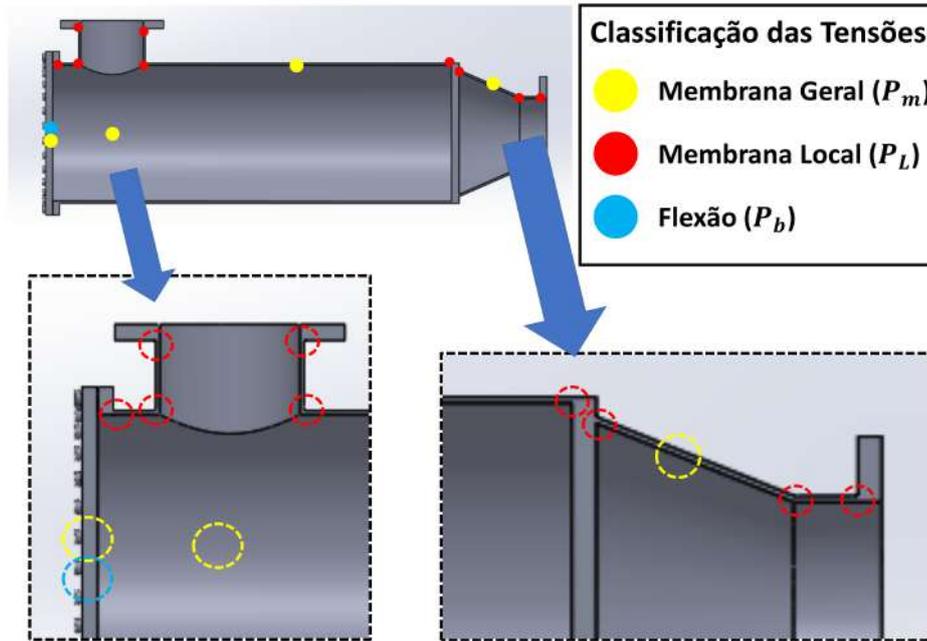
A partir do recorte traduzido da Tabela 5.6 apresentada no Anexo B, podemos executar o mesmo processo para as regiões de GSD e para o casco cilíndrico e cônico.

Exemplo 6.7 (Regiões de descontinuidade como a transição Casco-Bocal). *Perto de bocais, com pressão interna e força axial aplicada ao bocal, a tensão de membrana gerada será classificada como Tensão de Membrana Local (P_L), bem como qualquer região próxima de descontinuidades, como as regiões entre o casco e flanges e entre casco e a parede dos bocais.*

Exemplo 6.8 (Casco cilíndricos ou cônicos). *As regiões longes de descontinuidades, como a parede cilíndrica do vaso, serão classificadas sempre como Tensão de Membrana Geral (P_m).*

Os três exemplos anteriores podem ser visualizados através das indicações de cores na figura 6.3

Figura 6.3 – Classificação das Tensões Primárias no Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

A etapa executada nesse capítulo tem a proposta de identificar Regiões de Interesse. Essas regiões deverão receber um tratamento diferenciado durante a fase de criação, tanto do modelo CAD como do modelo numérico (CAE) para permitir que o tipo de malha gerado e análise numérica sejam executadas conforme dita a norma da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5.

7 DETERMINAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL

7.1 VISÃO GERAL

A tensão admissível é a máxima tensão que um elemento estrutural é capaz de suportar sob condições especificadas (DeWolf *et al.*, 2021).

Para efeito de cálculo e dimensionamento das diversas partes de um Vaso de Pressão, adota-se uma Tensão Admissível (S) que seja menor que o Limite de Escoamento (S_y) e Limite de Ruptura¹ (S_T) do material (Telles, 1996).

A norma ASME BPVC irá especificar as propriedades dos materiais permitidos na construção de partes dos Vasos de Pressão que estejam sujeitos a pressão (ASME, 2021c).

O valor da resistência mecânica dos materiais é sensível com relação a temperatura, sofrendo diminuição com o aumento da temperatura de trabalho e são tabeladas por normas (Telles, 1996).

Avaliando segundo a norma ASME VIII - Divisão 2, temos que:

Trecho de norma 7.1 (ASME VIII – DIVISÃO 2, Part 2, 2-I.3, p.53. 2021.). *"Para as peças sujeitas a tensão devido a pressão, o Fabricante deve utilizar materiais conforme especificações listadas como aprovadas para utilização"*.

A ASME VIII - DIVISÃO 2 irá ditar, não apenas quais materiais podem ser utilizados, mas também fornecerá as especificações mínimas de propriedades desses materiais para emprego na construção dos Vasos de Pressão.

Trecho de norma 7.2 (ASME VIII – DIVISÃO 2, Part 3, 3.2.1.5, p.117. 2021.). *"Materiais diferentes dos permitidos por esta Divisão não devem ser utilizados, a menos que sejam submetidos a testes e aprovados em conformidade com a Secção II - Parte D do Comitê de Caldeiras e Vasos de Pressão"*.

Analisando os trechos de norma 7.1 e 1.2, podemos entender que parte importante do procedimento para aplicação da norma, consiste em consultar a ASME Secção II Parte D – Materiais: Propriedades (Sistema Internacional²), norma responsável por fornecer tabelas de

¹ Também pode ser chamado de Limite de Resistência à Tração Última.

² A ASME II - Parte D, fornece uma versão com dados baseados nas Unidades Usuais dos Estados Unidos (*US Customary Units*).

referência com as propriedades dos materiais que podem ser utilizados na fabricação dos Vasos de Pressão.

7.2 ASME SECÇÃO II PARTE D – MATERIAIS: PROPRIEDADES (SISTEMA INTERNACIONAL)

A secção II é o resultado de uma colaboração entre a "American Society of Mechanical Engineers" (ASME) e a ³ (ASTM) para o desenvolvimento de especificações visando garantir a segurança dos materiais empregados no campo dos equipamentos de pressão (ASME, 2021a).

A ASME BPVC Secção II - Parte D irá fornecer dados para diversos materiais utilizados na construção de equipamentos de pressão, dentre eles, tabelas com valores de tensões admissíveis, propriedades mecânicas e físicas dos materiais⁴.

Observação 7.1. *As tabelas 2A fornecem valores de tensões admissíveis para materiais ferrosos utilizados na construção de Vasos de Pressão, Classe 1⁵ pela Secção VIII, Divisão 2, enquanto a 2B⁶ fornece dados para os materiais não-ferrosos (ASME, 2021b).*

Observação 7.2. *As tabelas 5A e 5B irão fornecer dados de tensões admissíveis para os Vasos de Classe 2⁷. sendo a primeira para materiais ferrosos e a segunda voltada para os não-ferrosos (ASME, 2021b).*

Dados sobre as propriedades mecânicas dos materiais, o Limite à Tração Última à Temperatura Ambiente (S_T) e Limite de escoamento (S_y), são fornecidos respectivamente pelas tabelas U⁸ e pelas tabelas Y-1⁹ (ASME, 2021b).

O subparágrafo Subpart 1(4)¹⁰, da ASME Section II - Parte D irá fornecer informações sobre as tabelas referente as diferentes propriedades físicas dos materiais como Condi-

³ Órgão responsável pela emissão de normas técnicas para área de materiais.

⁴ Ver ASME Section II - Part D, Subpart 1, p.3. 2021.

⁵ Ver sobre classes de certificações na Observação 5.3

⁶ Desde a versão 2019 da normas, as tabelas 2A e 2B passaram a abranger, de forma separada, os vasos de Classe 1 da Secção VIII - DIVISÃO 2. Antes estava (até a edição 2015) abrangidas nas tabelas 5A e 5B da Secção II, Part D.

⁷ Ver Observação 5.3.

⁸ Ver ASME Secção II - Part D (métrico), Tabela U, p.568. 2021.

⁹ Ver ASME Secção II - Part D (métrico), Tabela Y-1, p.776. 2021.

¹⁰ Ver ASME Secção II - Part D (métrico), Subparte 4, p.5. 2021.

vidade Térmica (Tabela TC), Difusividade Térmica (Tabela TD)¹¹, Expansão Térmica (Tabela TE), Módulo de Young (Tabela TM), Coeficiente de Poisson e Densidade (Tabela PRD).

As Tabelas 2A, Tabelas 2B, Tabelas 5A e Tabelas 5B fornecem os valores das **Tensões Admissíveis** (S) para os materiais empregados nos equipamentos de pressão projetados segundo a ASME VIII - Divisão 2. Estas seguem uma estrutura dividida em 3 partes: sendo a primeira com uma identificação numérica das linha (para referência do material), a composição química nominal, a forma que se apresenta o produtos e outras identificações da liga; a segunda parte apresenta: os valores mínimo da Tensão de Escoamento e da Tensão Última a Tração; a terceira parte irá apresentar a Tensão Admissível com relação a temperatura. Tabela observável na figura A.1, presente no anexo A.

Para Determinar a Tensão Admissível (S) é necessário ter definido a qual Classe pertencer o vaso de acordo com as informações do *User's Design Specification*¹². Com a determinação da classe de certificação do vaso (Classe 1 ou Classe 2) escolhe-se a tabela correta a depender do tipo de material.

Para determinar o valor da **Tensão Admissível** (S), para outros materiais que possuam mesma característica dos tabelados, porém propriedades com valores superiores¹³, e/ou para parafusos, podemos adotar o procedimento do Anexo Obrigatórios 2¹⁴ (tabelas 2A e 2B) e Anexo Obrigatórios 10¹⁵ (Tabelas 5A e 5B).

A figura 7.1, traz a Tabela 10-100 da ASME Secção II - Parte D, onde apresenta critérios para determinação da Tensão Admissível em Vasos de Pressão de Classe 2. Esses critérios são os mesmo utilizados na elaboração das das Tabelas 5A e 5B.

¹¹ Ambas são encontradas no conjunto de Tabelas nomeadas de TCD. Ver ASME BPVC Secção II - Parte D - Propriedades (SI), 4.2, p.6. 2021.

¹² Ver Definição 5.3.

¹³ As tabelas da Secção II - Parte D, fornecem valores especificados mínimos.

¹⁴ Ver ASME Secção II - Parte D, MANDATORY APPENDIX 2, p.1268. 2021.

¹⁵ Ver ASME Secção II - Parte D, MANDATORY APPENDIX 10, p.1293. 2021.

Figura 7.1 – Critério para determinação da Tensão Admissível em Vasos de Pressão Classe 2.

Tabela 10-100						
Critérios para o Estabelecimento de Valores de Tensão Admissíveis para as Tabelas 5A e 5B						
Produto/Material	Abaixo da Temperatura Ambiente		Temperatura Ambiente e Acima			
	Resistência à Tração Última (S_T)	Resistência ao Escoamento (S_y)	Resistência à Tração Última (S_T)	Resistência ao Escoamento (S_y)	Tensão de Ruptura à Fadiga	Taxa de Fluência
Todas os formatos de produtos ferrosos e não ferrosos, forjados ou fundidos, exceto os parafusos, e exceto os aços inoxidáveis austenítico, ligas de níquel, ligas de cobre e ligas de cobalto com uma relação S_y/S_T inferior a 0,625	$\frac{S_T}{2,4}$	$\frac{S_y}{1,5}$	$\frac{S_T}{2,4}$	$\frac{R_y S_y}{1,5}$	$Min. (F_{avg} F_{Ravg}, 0,8 F_{Rmin})$	$1,0 S_{Cavg}$
Todos produtos forjados ou fundidos de aço inoxidável austenítico, liga de níquel, liga de cobre, e produto de liga de cobalto formas, excepto aparafusamento, com uma relação S_y/S_T inferior a 0,625. [Nota (1)].	$\frac{S_T}{2,4}$	$\frac{S_y}{1,5}$	$\frac{S_T}{2,4}$	$Min. \left(\frac{S_y}{1,5}, 0,9 R_y S_y \right)$	$Min. (F_{avg} F_{Ravg}, 0,8 F_{Rmin})$	$1,0 S_{Cavg}$

Nota Geral: Ao utilizar este critério para determinar as tensões admissíveis sem função da temperatura, para um material específico a uma temperatura mais elevada, esta nunca poderá ser superior a uma tensão admissível a uma temperatura inferior.

Nota:
(1) Estes valores de tensão mais elevados foram estabelecidos a temperaturas onde as propriedades de tensão de curta duração governam, para permitir a utilização destes materiais onde uma deformação ligeiramente maior é aceitável. Os valores de tensão nesta faixa excedem 66% mas não excedem 90% da tensão de escoamento a dada temperatura. Estes valores de tensão não são recomendados para as flanges de juntas vedadas ou outras aplicações onde em que pequenas distorção possam causar vazamentos ou mau funcionamento. A tabela Y-2 lista fatores multiplicadores que, quando aplicados aos valores da tensão de escoamento mostrados na tabela Y-1, fornecerão tensões admissíveis que resultarão em valores mais baixos de deformação permanente.

Fonte: [ASME, 2021b](#), p.1294 (com adaptações).

7.3 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

A determinação da Tensão Admissível (*Allowable Stress*) de um material, é parte essencial no projeto de qualquer equipamento pressão. Este representa a tensão minimamente necessária para garantir o funcionamento do equipamento de acordo com um fator de segurança ([Ugural, 2015](#)).

A Análise de Requisitos, metodologia definida na ASME Secção VIII - Divisão 2, Parte 5 baseia-se na análise de 4 requisitos¹⁶. Dentre as análises, a primeira é a Proteção contra Colapso Plástico, cuja essência se baseia no levantamento e classificação das tensões e comparação com a Tensão Admissíveis (S) para o material do equipamento avaliado.

De acordo com a Aplicação em Filtro de Óleo Naval 5.7, o vaso em estudo é Classe 2. Caso o material seja conhecido e as propriedades coincidentes, podemos utilizar a Tabela

¹⁶ São abordados no Capítulo 11.

7.1.

Tabela 7.1 – Tabela de Tensões Admissível S (MPa) em Função da Temperatura.

Tabela 5A - Tensão Admisível (S)			
Aço: EN 1.4432 - AISI 316L - UNS S31603			
Mín. S_T (MPa)		485	
Mín. S_Y (MPa)		170	
T (°C)	S (MPa)	T (°C)	S (MPa)
40	115	275	100
65	115	300	98,1
100	115	325	96,1
125	115	350	94,3
150	115	375	92,6
175	113	400	90,9
200	109	425	89,3
225	106	450	87,6
250	103	475	85,9

Fonte: [ASME, 2021b](#), p.1294 (com adaptações).

Observação 7.3. A tabela 7.1 foi elaborada com dados extraídos da Tabela 5A, Linha 43, Material: Chapa plana, ASME Secção II - Parte D (métrica), p.480. ([ASME, 2021b](#)).

Quando as propriedades do material forem superiores aos valores tabelados, devemos então utilizar o procedimento da Figura A.1 (Tabela 10-100).

Primeiro passo é determinar o valor R_Y , um fator de correção da Tensão Admissível para a temperatura especificada, conforme equação 7.1.

$$R_Y = \frac{S_{yt}}{S_Y}, \quad (7.1)$$

onde,

R_Y : Razão entre o valor médio da curva de tendência da Tensão de Escoamento dependente da temperatura e a Tensão de Escoamento à temperatura ambiente¹⁷.

S_{yt} : Limite de Resistência ao Escoamento à dada temperatura.

S_Y : Limite de Resistência ao escoamento mínimo especificado a temperatura ambiente.

¹⁷ Tradução da terminologia em língua inglesa expressa na norma ASME 631.1 "Ratio of the average temperature dependent trend curve value of yield strength to the room temperature yield strength"

Tabela 7.2 – Dados para Cálculo da Tensão Admissível (S) com Dados do Material Utilizado

Propriedades Mecânicas do Aço: EN 1.4432 - AISI 316L - UNS S31603		
Temperatura Ambiente	S_Y (MPa)	S_T (MPa)
		256	644
$T = 60^\circ C$	S_{yt} (MPa)	S_{ut} (MPa)
	238	625

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dos dados da Tabela 7.2, e da Equação 7.1 para o material do Filtro de Óleo Naval, à $60^\circ C$, $R_y = 0,93$ [adm].

Aplicando os dados da Tabela 7.2 e o fator de correção (R_y) calculado na equação 7.1, podemos determinar a tensão admissível do material a partir das Equações da Tabela expressa na Figura 7.1.

Sendo assim, a **Tensão Admissível** (S) avaliada à temperatura ambiente e à $60^\circ C$ para o Aço EN 1.4432 do **Filtro de Óleo Naval**, Segundo a ASME Secção VIII, Divisão 2 é apresentada pelas equações 7.2 e 7.3.

$$S_{(T.Amb)} = \frac{S_y}{1,5} = \frac{256}{1,5} = 170,67 [MPa]. \quad (7.2)$$

$$S_{(60^\circ C)} = \frac{R_y S_y}{1,5} = \frac{0,93 \times 238}{1,5} = 147,56 [MPa]. \quad (7.3)$$

8 MODELAGEM 3D DE FILTRO DE ÓLEO NAVAL PARA ANÁLISE MEF

8.1 VISÃO GERAL

Não é possível se pensar atualmente no desenvolvimento de projetos de engenharia sem ter por base a utilização de assistência computacional. O uso de software tem se tornado a prática comum no ciclo de vida de qualquer produto (Lee, 1999).

Definição 8.1 (CAD, "Computer Aided Design¹"). Segundo Groover e Zimmers (1984), é a tecnologia que utiliza sistemas computacionais para auxiliar na criação, análise ou otimização de um projeto.

Observação 8.1. Costuma-se traduzir CAD como "Desenho Assistido por Computador", porém essa tradução se mostra incompleta. A tecnologia CAD comporta toda a documentação de projeto e carrega consigo informações que vão além das dimensões e geometria do componente, como: propriedades mecânicas, informações sobre a fabricação etc. (Sarkar, 2014).

O Projeto Assistido por Computador traz inúmeras vantagens aos projeto de engenharia. Dentre eles estão: a redução de tempo ao possibilitar a rápida visualização; simulação e análise de produtos em desenvolvimento. Durante a concepção de um equipamento com o uso assistido por computador é possível, analisar a funcionalidade, robustez, e sua viabilidade. O CAD vai permitir a criação de um equipamento de forma dinâmica e permitir que rapidamente se altere sua geometria, material, propriedades mecânicas, e processos de fabricação (Sarkar, 2014).

Diversos software irão utilizar como base o "Sketch" (esboço). O esboço é necessário na criação de qualquer modelo paramétrico para criação das formas de um componente (Sarkar, 2014).

Um modelo será concebido através de um esboço, no plano ou tridimensional, e a partir dele se aplica diversas ferramentas para gerar superfícies ou sólidos (Sarkar, 2014).

Observação 8.2. Ao se elaborar um modelo para análise computacional, é preciso fazer um certo nível de abstração do modelo geométrico do componente. Nessa fase, deve-se remover

¹ Tradução: Projeto Assistido por Computador.

detalhes desnecessários do projeto, e/ou reduzir dimensões, e/ou identificar simetrias (Lee, 1999).

CAE ("*Computer Aided Engineering*²") é Uma das tecnologias aplicáveis na otimização do projeto de um produto. Essa tecnologia consiste no uso de sistemas computacionais para análise a partir da geometria CAD. O Sistema CAE vai simular e avaliar o comportamento do produto e permitir otimizações e alterações de diversos parâmetros rapidamente (Lee, 1999).

O **Método dos Elementos Finitos (MEF)**, é uma das ferramentas numéricas das metodologias computacionais de Engenharia. Essa abordagem permite determinar e analisar condições como tensão, deformação, transferência de calor, em projetos cuja solução seja impraticável por outros meio (Lee, 1999).

O MEF consiste em dividir o modelo CAD em um número finito de elementos não sobrepostos e depois analisar a atribuição de propriedades nos elementos (Sarkar, 2014).

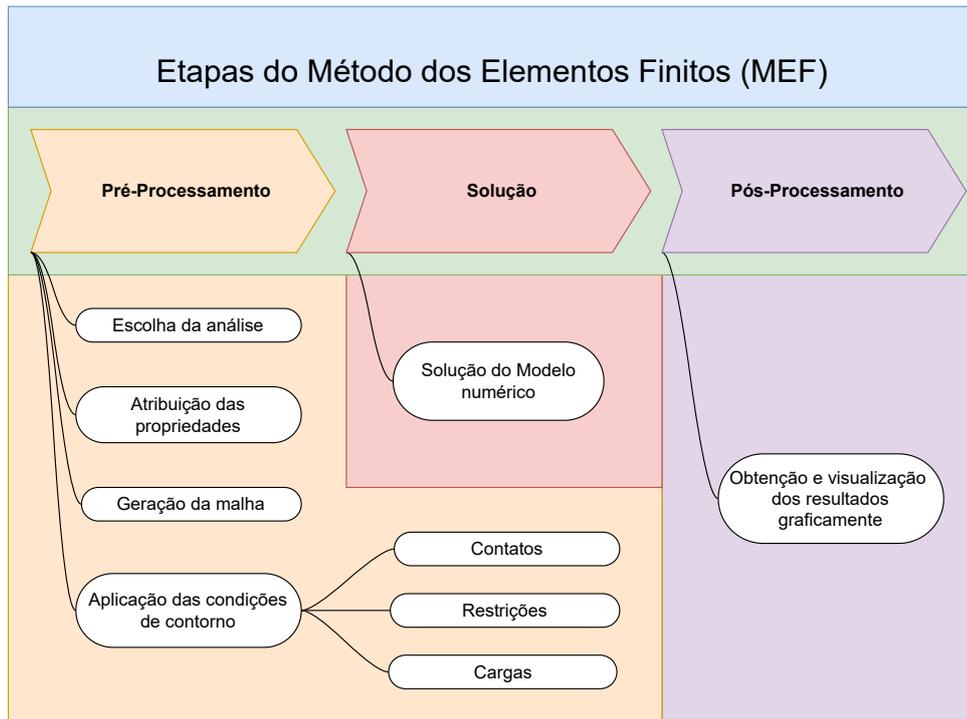
A seguinte sequência é realizada na aplicação do MEF: O modelo é convertido em uma malha semelhante a sua forma, onde cada elemento é conectado aos elementos vizinhos através de nós, e os parâmetros e equações são atribuídos a cada elemento (Sarkar, 2014).

A análise MEF é composta de três etapas: **Pré-Processamento, Solução e Pós-Processamento.**

Na figura 8.1 podemos ver esquematicamente os passos necessários para a Análise MEF. Esses passos são executados em softwares como o ANSYS Workbench, por exemplo.

² Tradução: Engenharia Assistida por Computador

Figura 8.1 – Etapas do MEF



Fonte: elaborado pelo autor.

O **Pré-Processamento** consiste na conversão de um Modelo CAD em um modelo de elementos finitos ³. Ao se realizar uma análise, tem que se ter em mente que o modelo não necessita do mesmo nível de precisão e detalhe em todas as regiões. Sempre que for preciso, ou exigido por norma⁴, deve-se dar ênfase e adequar Regiões de Interesse (RDI)⁵. Essa discricionariedade permite utilizar elementos cuja precisão é superior, porém com um aumento do custo computacional⁶.

Na primeira etapa (Pré-processamento) é realizada a escolha do tipo de análise numérica, quanto ao tipo (estrutural, térmica, estática, transiente etc.); quanto a dimensão de análise do elementos (1D, 2D ou 3D) (Sarkar, 2014).

Após a escolha da análise, temos a atribuição das propriedades (geométricas, mecânicas etc.). Em seguida a malha é gerada e refinada, para por fim, se aplicar as condições de contorno (Sarkar, 2014).

Após os dados inseridos, a **Solução** do modelo numérico é iniciada a partir da gera-

³ Ver observação 8.2

⁴ A ASME Secção VIII - Divisão 2 especifica o tipo de elemento a ser utilizado na análise.

⁵ RDI são locais de um objeto de estudo onde se deve avaliar com maior acurácia.

⁶ Tempo necessário para executar completamente uma certa operação computacional. Um aumento desse custo implicará na necessidade de um equipamento mais robusto para execução da simulação (Burgos *et al.*, 2019).

ção de uma matriz de carga e uma matriz de rigidez global, que ao final irá fornecer os valores de tensão para cada elemento (Sarkar, 2014).

Os resultados obtidos na solução do Modelo numérico (tensão Von-Misses, deformação, fator de segurança, dentre outros) estão disponíveis na forma de soluções nodais e de elementos. O **Pós-processamento** exibe os diferentes resultados graficamente (Sarkar, 2014).

8.2 INTERPRETAÇÃO DO ANEXO 5 – A PARA GERAÇÃO DE MALHA E PÓS-PROCESSAMENTO

O Anexo 5 - A da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2 traz:

Trecho de norma 8.1 (ASME VIII – Divisão 2, 5-A.1, p.619. 2021). *"Recomendações para o pós-processamento dos resultados de uma análise elástica de tensão de elementos finitos para comparação com os limites em 5.2.2⁷".*

Na análise MEF para componentes contínuos, se obtém a distribuição total de tensão no pós-processamento (ASME, 2021c).

É desejável obter a tensão em termos de tensão de flexão e de membrana. Para isso temos que realizar a **Linearização** da distribuição total de tensões e obter as tensões equivalentes (ASME, 2021c).

Na análise numérica, as tensões de membrana e de flexão são obtidas diretamente como resultante das tensões na casca quando modelado como elementos do tipo casca ("*shell element*"). Nesses casos, não há a necessidade de executar o processo de linearização das tensões (ASME, 2021c).

As SCP⁸ são planos obtidos pelo corte da secção transversal de um componentes, enquanto as SCL⁹ são linhas retas que ligam dois pontos entre as superfícies de um SCP (ASME, 2021c).

O Anexo 5-A traz 3 método para linearização do resultado obtido na análise dos elementos finitos¹⁰. O software ANSYS Mechanical possui ferramenta para executar o processo de linearização da tensão em elementos contínuos através de análise numérica.

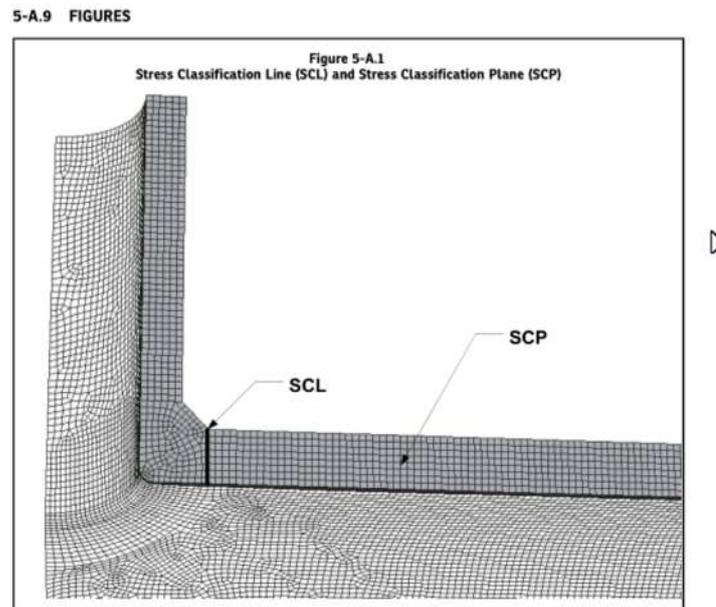
⁷ Ver ASME VIII – Divisão 2, 5.2.2, p.582. 2021.

⁸ Ver definição ASME 7.

⁹ Ver definição ASME 8.

¹⁰ Ver ASME Secção VIII - Divisão 2, Annex 5-A, 5-A.2(c), p.619. 2021.

Figura 8.2 – Figura 5-A.1 - Exemplo de SCL e SCP



Fonte: [ASME \(2021c, p.626\)](#).

O pacote ANSYS Mechanical possui a ferramenta "*Linearized Stress*". Essa ferramenta calcula ao longo de uma linha reta (um "*Path*") a **Tensão Linearizada** de Membrana, Flexão, Pico e Tensão total ([ANSYS, 2015](#)).

Para esse procedimento, o "*Path*" criado deve estar inteiramente dentro dos elementos do modelo e é recomendado que seja reto ([ANSYS, 2015](#)).

Observação 8.3. O "*Path*"¹¹ será posicionado nas Regiões de Interesses determinadas na **Apliação em Filtro de Óleo Naval 6.6** de acordo com o especificado no Anexo 5-A da norma.

Observação 8.4. As diretrizes¹² do Paragrafo 5-A.3(c)¹³ deverão ser cumpridas, a fim de garantir a precisão das tensões linearizadas obtidas na análise MEF ([ASME, 2021c](#)).

Observação 8.5. O modelo CAD deve ser preparado de tal modo que permita a geração de elementos com a forma Hexaédrica nas regiões onde serão aplicadas as SCL¹⁴. Conforme a figura 8.2. Essas regiões necessitarão de um tratamento e refinamento da malha adequados.

¹¹ A Ferramenta "*Path*" será utilizada nas SCL especificada pela norma.

¹² Serão melhor abordadas no Capítulo 10.

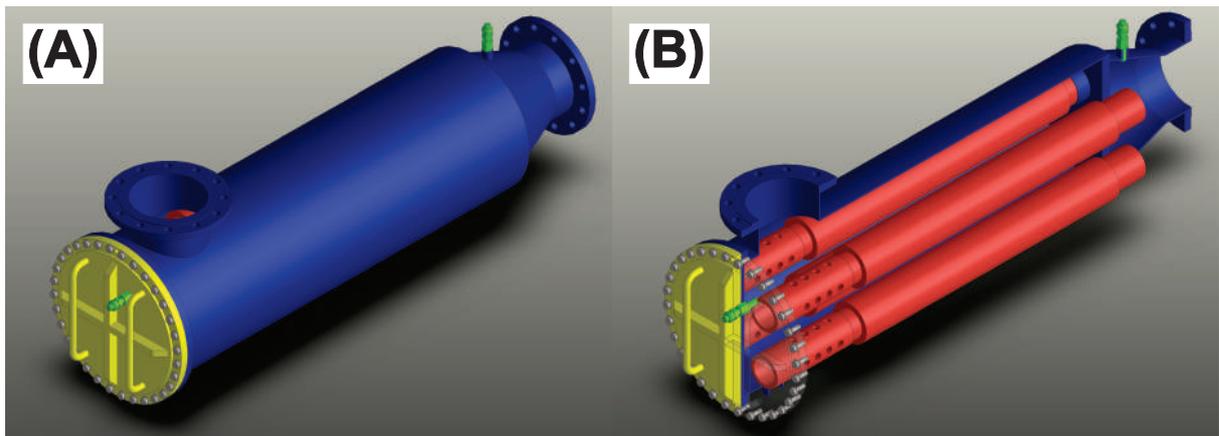
¹³ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Anexo 5-A, 5-A.3, p.619. 2021.

¹⁴ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Anexo 5-A, Figuras 5-A.1, p.626; 5-A.4, p.629.; 5-A.5, p.630. 2021.

8.3 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

O modelo CAD tem diversas funcionalidades. Ele carregada dados e representações da geometria, de dimensões, informações sobre materiais, fabricação etc. Ele também pode ser útil como representação gráfica artística. Quando renderizado é possível observa-lo com os aspectos de um objeto semelhante ao real.

Figura 8.3 – Modelo CAD 3D Renderizado - Representação Artística do Filtro de Óleo Naval com Detalhamento



Fonte: elaborado pelo autor.

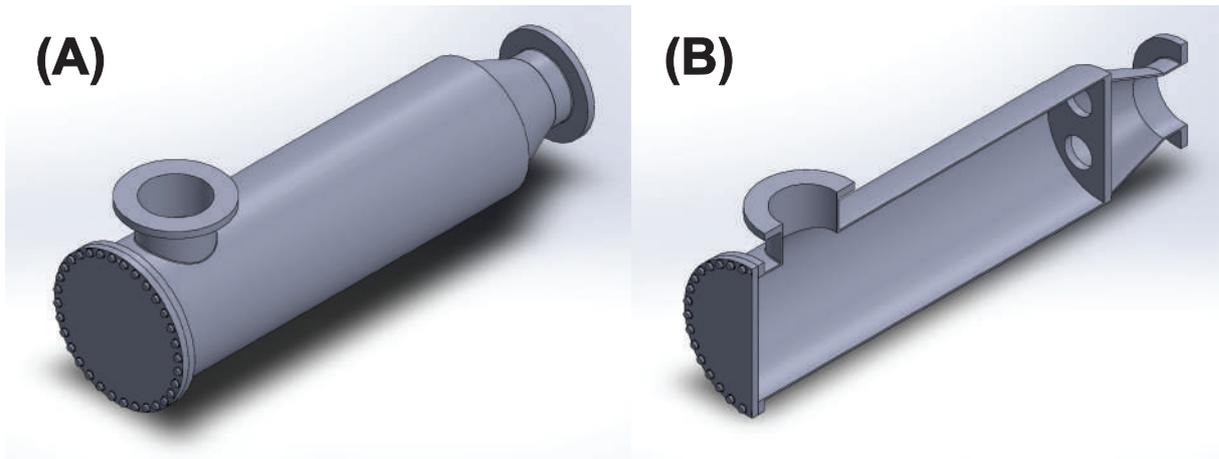
Legenda: (A) Vista isométrica do Filtro de Óleo Naval com representação dos seus acessórios externos; (B) vista isométrica do Filtro de Óleo Naval em corte com representação dos acessórios internos.

A figura 8.3 traz uma representação do componente montado com suas diversas partes, aberturas e acessórios. Porém para a análise MEF, como exposto na Observação 8.2, temos que simplificar o modelo para permitir uma redução da complexidade durante a análise do modelo numérico.

Apesar do Modelo CAD da figura 8.3 ser um representação artística criada para fins didáticos nesse manual, ele carrega em seus arquivos diversos dados importantes. A partir do modelo CAD poderia ser gerado diversos documentos como o desenho técnicos, documentos de especificações de fabricação ou mesmo atribuir propriedade dos materiais em cada parte do equipamento.

A figura 8.4 mostra o Modelo CAD simplificado. Trata-se do mesmo modelo apresentado na figura 8.3, porém com a remoção de partes que imporiam um grau maior de complexidade computacional desnecessária ao modelo numérico.

Figura 8.4 – Modelo CAD 3D simplificado - Filtro de Óleo Naval

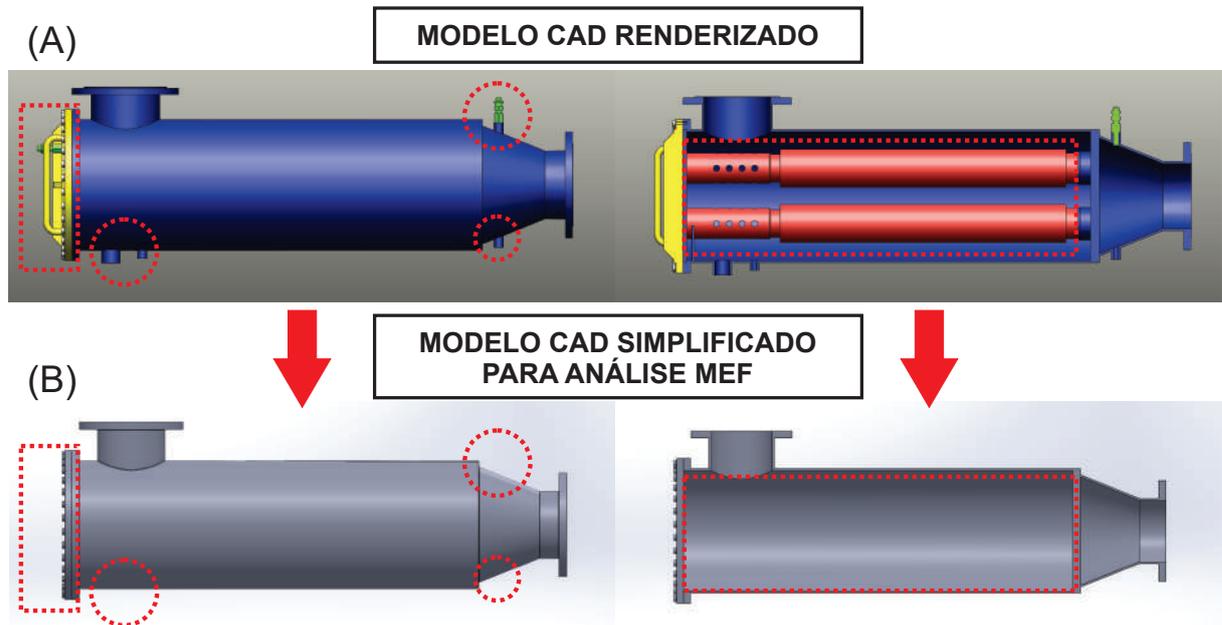


Fonte: elaborado pelo autor.

Legenda: (A) Vista isométrica do Filtro de Óleo Naval com simplificações geométricas; (B) Vista isométrica do Filtro de Óleo Naval em corte com simplificações geométricas.

Os acessórios, alguns bocais, e detalhamentos como o do tampo de fechamento acabaram-se mostrando desnecessários na análise numérica. Na figura 8.5, pode-se ver comparativamente a simplificação. Ambos os modelos são uma representação virtual de como deverão ser o componentes, mantendo as principais características geométricas e dimensionais, mesmo após a simplificação.

Figura 8.5 – Comparativo Entre Modelo CAD e Modelo CAE para Análise MEF - Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

Legenda: (A) Vista isométrica do Filtro de Óleo Naval com simplificações geométricas; (B) Vista isométrica do Filtro de Óleo Naval em corte com simplificações geométricas.

Para executar a modelagem foi utilizado o Software **SolidWork 2018**, tanto do modelo **CAD Renderizado** como do **Modelo CAD Simplificado**.

Como **método** de trabalho, modelou-se os componentes separadamente e uniu-se as diversas parte através da ferramenta de montagem. Essa montagem foi salva em um arquivo do tipo **Parasolid (.x_t)**¹⁵.

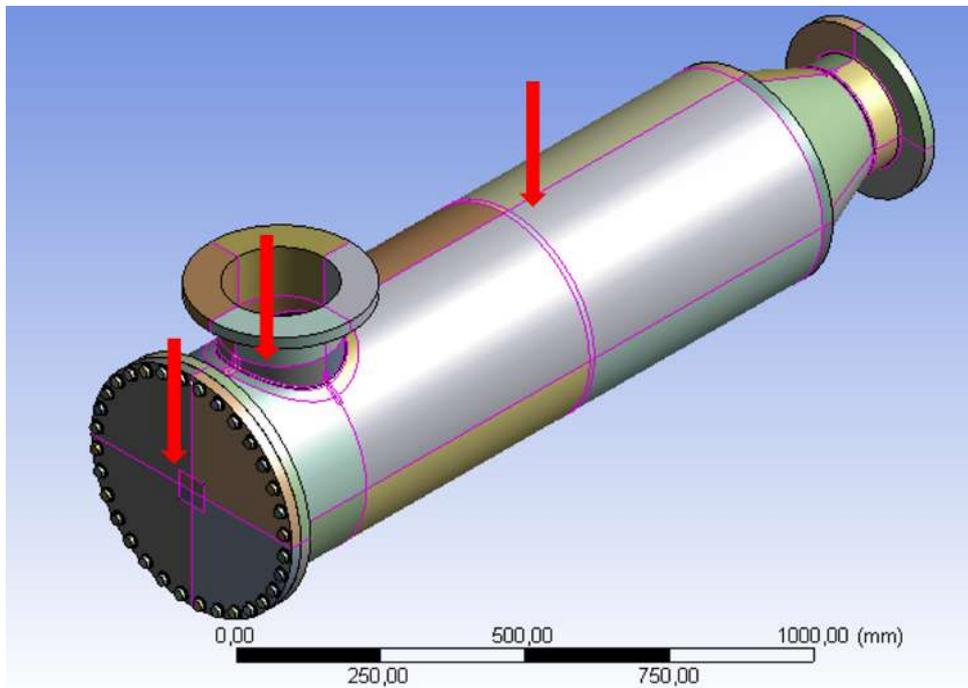
O modelo CAD simplificado foi importado pelo Software ANSYS Workbench, onde adequou-se a geometria para cumprir o exposto na observação 8.5. Essa etapa serviu para facilitar a geração da malhas e formar elementos que ficassem conforme exige o Anexo 5-A da ASME Secção VIII - Divisão 2 (exemplificado na figura 8.2).

As **Regiões De Interesse (RDI)**, foram selecionadas de acordo com a observação 8.5 e demonstrada durante a etapa executada na Aplicação em Filtro de Óleo Naval 8.3. Foi seccionado partes do modelo, através da ferramenta de *"slice"*, ferramenta do suplemento de modelagem CAD do próprio ANSYS (*"DesignModeler"*). As regiões foram selecionadas de acordo com a necessidade de garantir a malha adequado onde se desejava inserir os *"Path"*.

¹⁵ Arquivos parasolid mantém apenas alguns dados do CAD, como geometria, topologia e cor.

A ferramenta de "Path" é necessária para obtenção das tensões linearizadas durante a etapa de pós-processamento¹⁶ do modelo numérico.

Figura 8.6 – Modelo CAD Adaptado para Geração de Malha Conforme Anexo 5-A da ASME Secção VIII - Divisão 2



Fonte: elaborado pelo autor.

Na figura 8.6, podemos ver o modelo já fatiado, representado pelas linhas cor rósea e indicado pelas setas em vermelho. Após esse processo, cada secção do modelo unido por linhas cor rósea pode ser trabalhada separadamente durante a construção do modelo numérico dentro da ferramenta de análise MEF estrutural estática "**Mechanical ANSYS**".

Além da ferramenta de "Slice" (fatiamento), também foi necessário fazer uso da ferramenta de compartilhamento da topologia. A ferramenta "**Shared topology**" irá garantir que cada secção de um corpo fatiado esteja unida topologicamente e represente o mesmo corpo durante a análise numérica.

Após a etapa de preparação e adequação do modelo CAD, partiu-se para a construção do modelo numérico e análise Estrutural estática do Filtro de Óleo Naval.

¹⁶ Ver Observação 8.3.

9 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DE FILTRO DE ÓLEO NAVAL VIA ANSYS WORKBENCH

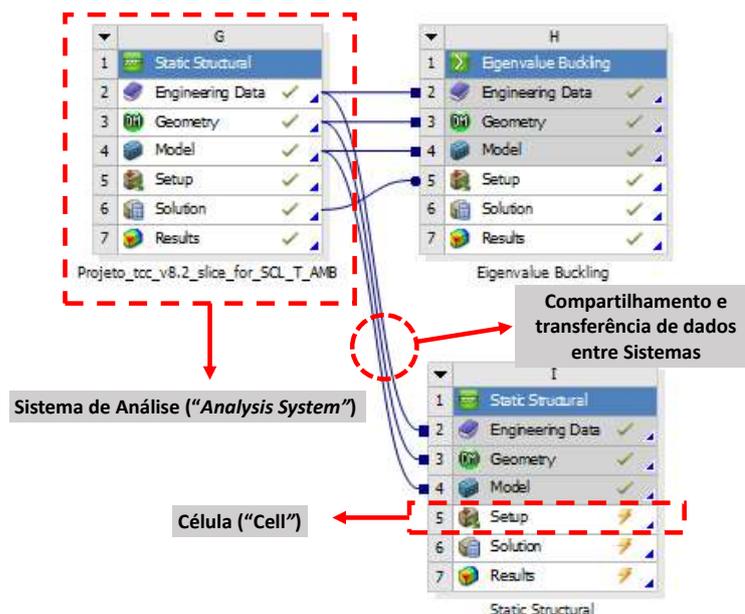
9.1 VISÃO GERAL

O Ansys Workbench é uma ferramenta que permite a integração e fluxo entre as diversas ferramentas da Ansys na execução de um projeto de engenharia baseado em simulação computacional (Ansys, 2021).

O Ansys Workbench permite gerir e desenvolver projetos a partir de um Objeto chamado **Aba de Projeto** ("Project Tab"). Dentro dessa aba, é possível adicionar blocos de construção denominados **Sistemas de Análises** ("Analysis Systems"), e inseri-los no ambiente **Diagrama de Projeto** ("Project Schamatic"). Os diversos Sistemas formam um fluxograma que indica o fluxo de dados do projeto (ANSYS, 2015).

Os Sistemas podem ser constituídos de um ou mais componentes chamados de **células** ("Cell"). O conjunto de Células representam os passos sequências para a realização de uma análise específica (ANSYS, 2015).

Figura 9.1 – Exemplo de Sistema de Análise e Celulas em um Diagrama de Projeto no Ansys Workbench 17.



Fonte: elaborado pelo autor.

O Ansys Workbench permite o compartilhamento e a transferência de dados entre

as diversas aplicações adicionadas ao Diagrama de Projeto (ANSYS, 2015).

Diversas aplicações do Ansys podem ser trabalhadas dentro do Diagrama de Projeto¹. As aplicações podem ser trabalhadas em uma mesma aba dentro do ambiente Workbench ou em suas próprias janelas (ANSYS, 2015).

As aplicações do Ansys permitem análises de diversas características como: dimensões geométricas; propriedades dos materiais; condições de contorno; dentre outros (ANSYS, 2015).

Dentro da Aba de Projeto, há um *Toolbox* com diferentes tipos de Análise. Os Sistemas de Análises irão fornecer todos os Componentes necessário, na ordem correta, para a realização de um determinado tipo de análise numérica (ANSYS, 2015).

As análises são realizadas através das células em cada sistema, seguindo de cima para baixo, definindo entradas e especificando parâmetros do projeto. Após isso, é realizada a simulação e os resultados são observados a fim de validar ou otimizar o projeto. As ferramentas do Workbench permitem alterar as diversas características de um projeto, atualizar e verificar os resultados da simulação obtidos devido as alterações (ANSYS, 2015).

Uma análise estrutural estática ("*static structural*") determina os deslocamentos, tensões, deformações e forças em um componente ou estrutura, causados por efeito de cargas que não sejam capazes de induzir efeitos inerciais ou amortecimento de forma significativa. Nessa condição, se considera que as cargas e respostas não variam com o tempo ou varia muito lentamente, e portanto são estáveis (estáticas) (ANSYS, 2015).

Na análise estática, o modelo é limitado a uma condição homogênea, isotrópica e linear. É considerado que o material possui características linear-elástica, logo a lei de Hook é aplicável. Não há mudanças topológicas e a deformação ocorre lentamente sem efeitos dinâmicos (Lee, 2021).

Dentre as Aplicações do Ansys necessárias para a realização da análise estrutural estão o *Project Schematic*, *Engineering Data*, *DesignModeler*, e o *Mechanical*.

O Sistema de Análise Estrutural Estático ("*Static Structural*") do Ansys Workbench é inserido a partir do *Toolbox* na janela do Diagrama de Projeto. O sistema de análise é representado por um bloco, e possui 6 células que indicam os passos necessários para realização do modelo numérico (Lee, 2021).

As Células do Sistema de Análise Estrutural Estático são: (1) *Engineering Data*;

¹ Tradução para Project Schematic.

(2) *Geometry*; (3) *Model*; (4) *Setup*; (5) *Solution*; (6) *Results*.

O "*Engineering Data*" é um recurso que configura as propriedades dos materiais utilizados em um Sistema de Análise. Essa aplicação possui uma biblioteca própria, além de permitir que o usuário configure e armazene modelos de materiais (ANSYS, 2015).

O modelo CAD é construído, ou modificado na célula "*Geometry*". Nessa células é possível importar o modelo CAD de outro software ou trabalhar com as aplicações de edição de modelos da *Ansys DesignModeler* ou *SpaceClaim* (ANSYS, 2015).

As demais células correspondem a aplicação "*Mechanical*", onde é trabalhado a geração da malha, aplicação das condições de contorno, solução do modelo numérico e onde é realizado a análise dos resultados e tratamento de pós-processamento.

9.2 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Foi realizado dois modelos numéricos. Um modelo teve a presença de uma carga térmica (temperatura uniforme e constante em todo componente), ou seja, funcionando sob Temperatura de Projeto Especificada ($T = 60^{\circ}C$), enquanto o outro foi modelado a temperatura ambiente.

Figura 9.2 – Diagrama de Bloco dos Sistemas de Análise no Ansys Workbench - Modelo Estrutural Estático - Análise do Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

Na realização do Sistema de Análise, A **primeira etapa** foi configurar a célula referente as propriedades dos materiais. Utilizou como padrão o Aço Estrutural da biblioteca do

próprio Ansys, alterando apenas os Valores² de Limite Mínimo de Resistência ao Escoamento (S_Y) e Limite à Tração Última, tabelados conforme apresentados na Aplicação em Filtro de Óleo Naval 1.6.

A **segunda etapa** foi a importação do modelo CAD (Célula "**Geometry**") e tratamento no DesignModeler conforme já detalhado na Aplicação em Filtro de Óleo Naval 8.3.

A **terceira etapa** da construção do modelo numérico consistiu na configuração das demais células, e foram realizadas na janela da aplicação Ansys *Mechanical*.

Foram selecionadas quatro regiões de interesses para análise, de acordo com o avaliado na Aplicação de Filtro de Óleo Naval 6.6. Essas regiões receberam um tratamento de malha diferenciado e ajustado para ficar em conformidade com as orientações da norma³. Para avaliar nessas regiões as tensões nas SCLs, foram aplicadas a ferramenta path (em "**Construction Geometry**").

Nessas regiões, para permitir que fosse possível avaliar as tensões nas SCLs aplicou-se a ferramenta path .

Na interface de contato entre o Casco e Tampo de Fechamento Plano se utilizou o tipo de contato "**Rough**", pois restringe o deslocamento tangencial. Definiu-se a condição "**Frictional**" para os contatos entre Arruela-Parafuso e Arruela-Tampo, com "**Friction Coefficient**" de 0,1 e "**Behavior**" configurado como "**Symmetric**".

O contato entre as Parafuso-tampo-vaso foi setado como "**Frictional**", com "**Friction Coefficient**" de 0,2 e "**Behavior**" configurado como "**Asymmetric**", com correção da rosca⁴ ("**Frictional** → **Geometric Modification** → **Contact Geometry Correction: Bolt Thread**"), como apresentado na figura 9.3 .

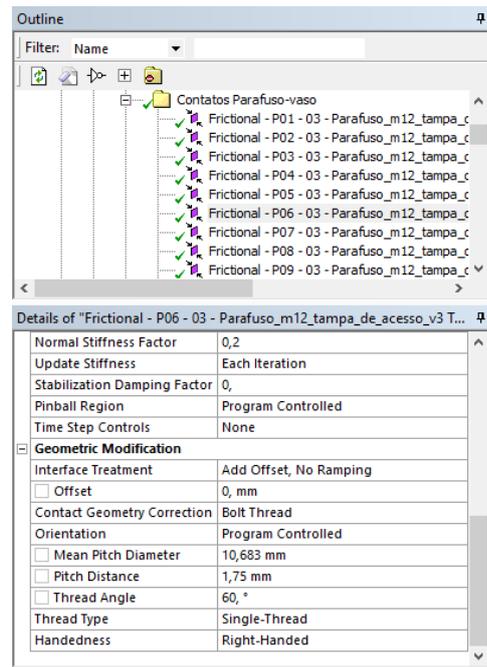
Na geração dos elementos ("**Mesh**") foi utilizado "**Relevance**" de 25, "**Size Function = Curvature**", com "**Relevance Center = Medium**" na configuração geral da malha. Para adaptar a malha ao solicitado na norma nas regiões de aplicação das SCL, foi utilizado "**Edge sizing**" ("**Type = Number of Divisions**" com 6 divisões), e "**Body Sizing**" ("**Type = element Size**", com 2 mm), além do uso do método de refino de malha do tipo "**Sweep**".

² Ver tabela 1.2 - Propriedades Mecânicas dos Materiais.

³ Ver Subsecção 8.2.

⁴ Essa configuração é indicada nas situações onde a rosca é feita na própria peça (ESSS, 201-).

Figura 9.3 – Correção para rosca - Contato dos Parafusos na Análise do Filtro de Óleo Naval



Fonte: elaborado pelo autor.

Na configuração das condições de contorno da análise foram criados nove STEPS, de um segundo cada. Foi ativado o "**Large Deflection**". As cargas foram inseridas de forma gradual conforme a tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Setup de Condição de Carregamento no ANSYS Mechanical

STEP	Time [s]	Força [N]	Pressão [MPa]	Pré-carga do Parafuso [N]
1	1	0	0,00	26.000
2	2	60.821	0,40	Lock
3	3	76.027	1,40	Lock
4	4	91.232	1,60	Lock
5	5	103.400	2,00	Lock
6	6	117.840	2,72	Lock
7	7	129.250	3,00	Lock
8	8	145.970	3,50	Lock
9	9	152.050	4,20	Lock

Fonte: elaborado pelo Autor.

As condições de contorno foram inseridas conforme o exposto na figura 1.2, aplicando "**Fixed support**" (Apoio Fixo), "**pressure**" (pressão interna aplicada na interface interna do vaso) e "**Remote force**" (força de compensação) aplicado no bocal.

As Tensões foram obtidas através dos carregamentos descritos na Aplicação de Filtro Naval 1.6 e conforme apresentado na tabela 1.1. A Pressão de Projeto (P) foi estabelecida em $P = 1,6 [MPa]$.

Buscou-se analisar nesse trabalho, o comportamento do Vaso de Pressão em 7 situações de carregamentos. Com essa variação na análise, pretendeu-se avaliar, a luz da norma, o comportamento do componente com diferentes cargas e certificar sua viabilidade para operação em casos excepcionais a pressões especificadas.

Na fase de pós-processamento, aplicou-se a ferramenta "*Linearized Stress*" para obter as componentes das tensões (Membrana + Flexão + Pico). A ferramenta de linearização foi aplicada para atender os critérios de avaliação dos requisitos da norma em sua Parte 5. Esse processo foi necessário para realizar a análise nas SCLs, e por fim, aplicar o método da Tensão Elástica na avaliação dos componentes.

Os valores obtidos na análise numérica através da **Linearização de Tensão** via Ansys Workbench, foram classificados para a obtenção das Tensões Equivalente (S_e) e comparação com os limites admissíveis.

Para validar os valores, foi aplicado a ferramenta *Stress* → *Normal*, onde foi possível avaliar ao longo da espessura o comportamento das tensões Circunferenciais, Longitudinais, Radiais e Tensão de Cisalhamento.

No tampo de fechamento, SCL 01, se deu a seguinte orientação: **Tensão Circunferencial** ("*Orientation = X Axis*"); Tensão Longitudinal ("*Orientation = Y Axis*"); Tensão Radial ("*Orientation = Z Axis*"). A Tensão Cisalhante ("*Stress* → *Shear*"), foi observada no plano YZ.

No casco, SCLs 02, 03 e 04 se deu a seguinte orientação: **Tensão Circunferencial** ("*Orientation = X Axis*"); Tensão Longitudinal ("*Orientation = Z Axis*"); Tensão Radial ("*Orientation = Y Axis*"). A Tensão Cisalhante ("*Stress* → *Shear*"), foi observada no plano YZ.

10 VALIDAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS NO ANSYS WORK-BENCH

10.1 VISÃO GERAL

É necessário seguir algumas diretrizes ao se trabalhar com o método por Análise de Requisitos da ASME Seção VIII - Divisão 2. Para garantir a precisão dos dados e confiabilidade da análise. O Anexo 5, em seu parágrafo 5-A.3, apresenta uma diretriz a ser seguida.

Observação 10.1. *As SCLs devem ser preferencialmente localizadas em regiões de GSD, devido ao fato de serem pontos de enorme concentração de tensão¹. Esses locais irão permitir uma avaliação mais precisa para análise da possibilidade de falha por **Colapso Plástico²** ou "**Ratcheting³**" (ASME, 2021c).*

A observação 10.1, trata de onde posicionar preferencialmente as SCLs para que se faça uma análise das regiões onde se sabe serem críticas, e portanto devem ser averiguadas com maior minúcia.

Além de avaliar nos locais adequados, é preciso garantir que os resultados obtidos na análise pelo MEF sejam válidos. Para isso, a norma recomenda procedimentos de como interpretar as tensões linearizadas de membrana e flexão, para que se possa comparar com os limites elásticos admissíveis.

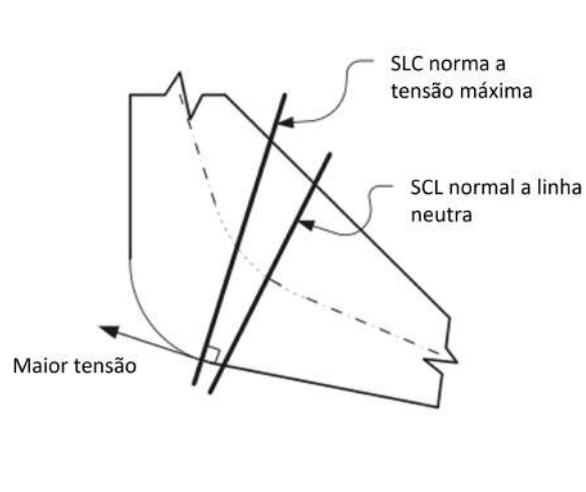
Observação 10.2. *As SCLs devem ser posicionadas na direção normal a linha de contorno das regiões onde as tensões são mais elevadas. Quando não for possível posicionar nas linhas de contorno, elas devem ser posicionadas na direção normal com a linha neutra. Essa observação está exemplificada na figura 10.1 (ASME, 2021c).*

¹ Ver Observação 3.1

² Ver ASME Seção VIII - Divisão 2, 5.2, p.580. 2021.

³ Ver Definição ASME 9.

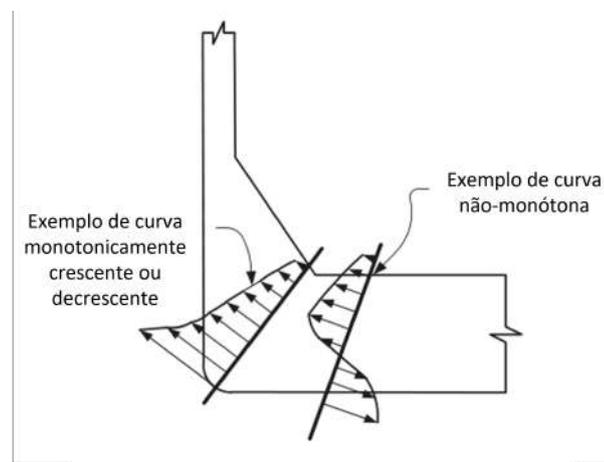
Figura 10.1 – Exemplo de Orientação da SCL



Fonte: [ASME, 2021c](#), p.628 (com adaptações).

Observação 10.3. *As tensões circunferenciais ou longitudinais devem ser distribuídas ao longo da SCL monotonicamente crescente ou decrescente, sendo a exceção quando houver efeitos de concentradores de tensão. Essa observação está exemplificada na figura 10.2 ([ASME, 2021c](#)).*

Figura 10.2 – Condições para a Tensão Circunferencial e Longitudinal

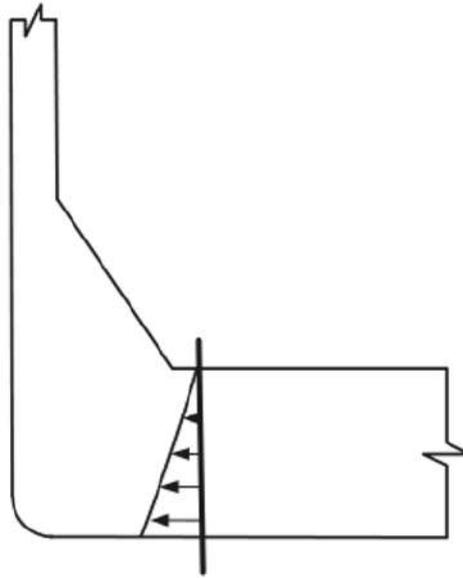


Fonte: [ASME, 2021c](#), p.628 (com adaptações).

Observação 10.4. *A distribuição de tensão ao longo da espessura deve ser monotonicamente crescente ou decrescente, sendo a exceção quando houver efeitos de concentradores de tensão. Quando o carregamento for devido ao efeito da pressão, a tensão nessa superfície deve ser igual a pressão aplicada e próxima de zero na superfície oposta definida pela SCL. Essa observação*

não é válida quando a SCL não for perpendicular a linha de contorno. Essa observação está exemplificada na figura 10.3 (ASME, 2021c).

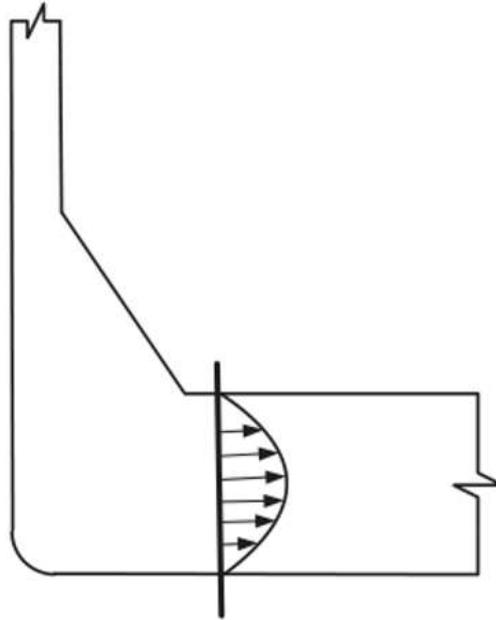
Figura 10.3 – Condição para a Tensão ao Longo da Espessura



Fonte: ASME, 2021c, p.628 (com adaptações).

Observação 10.5. *O tensão de cisalhamento deve apresentar um comportamento parabólico e/ou ser relativamente menor que as tensões circunferências e longitudinais. A depender do tipo de carregamento a tensão cisalhante deverá ser próxima de zero em ambas as superfícies que definem a SCL. Essa observação está exemplificada na figura 10.4 (ASME, 2021c).*

Figura 10.4 – Condição da Tensão de Cisalhamento



Fonte: [ASME, 2021c](#), p.628 (com adaptações).

10.2 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

A validação dos resultados obtidos através da solução computacional, foi realizada seguindo as diretrizes expostas no subparágrafo 5-A.3(c) da ASME BPVC Seção VIII - DIVISÃO 2. As diretrizes estão resumidas nas observações 10.2, 10.3, 10.4, e 10.5.

As Tensões Equivalentes (S_e) foram obtidas a partir dos Componentes da Tensão Linearizada oriundos da resolução do modelo numérico estrutural estático realizado com a ferramenta *ANSYS Mechanical - Static Structural*.

10.2.1 Resultados obtidos da Solução do Modelo Numérico via Ansys Mechanical

O ANSYS fornece as Tensões Equivalentes (S_e) apresentadas na tabelada a seguir a partir da Linearização das Tensões avaliadas em quatro SCLs⁴. Os valores demonstrados são referentes a Pressão de Projeto $P = 1,6MPa$.

Dados obtidos para análise sem carga térmica.

⁴ As figuras das regiões linearizadas das SCLs, são apresentadas na Subseção 10.2.2, onde é aplicado a diretriz de validação dos resultados segundo o ASME BPVC Seção VIII - Divisão II, Anexo 5, em seu paragrafo 5-A.3.

Tabela 10.1 – Resultados SCL - 01

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL- 01					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,7735	0,9003	1,6735	0,0060	1,6738
2	3,0172	35,6630	36,2060	0,2235	36,2900
3	5,7495	102,7700	108,3500	0,3578	108,6200
4	6,2472	124,2900	130,2200	0,4538	130,5200
5	7,8045	156,9500	164,5500	0,5797	164,9000
6	11,1930	210,3900	221,5500	0,7811	221,9900
7	12,4850	233,9000	246,3500	0,8865	246,8100
8	14,9820	274,4800	289,4400	1,0765	289,9400
9	19,0050	324,3500	343,3500	1,3071	343,8800

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.2 – Resultados SCL - 02

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 02					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,3740	1,1630	1,2921	0,0315	1,3000
2	89,3410	90,5470	128,2100	15,4840	127,6300
3	182,7000	130,4200	230,1500	24,9640	228,7400
4	213,6200	151,9200	268,7400	29,3440	267,0800
5	255,3100	173,5200	319,6000	34,2880	317,7100
6	328,4500	204,0600	400,9800	41,6410	398,7900
7	361,6800	222,5700	440,6700	45,6770	406,8100
8	417,3800	251,1300	506,3200	52,1010	503,6300
9	478,9100	270,4700	574,6700	57,4920	571,8200

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.3 – Resultados SCL - 03

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 03					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,0423	0,0055	0,0438	0,0001	0,0438
2	28,7670	14,2670	39,2230	0,2054	39,1020
3	44,0840	7,6592	51,7290	0,1155	51,6400
4	51,3340	9,5448	60,8260	0,1434	60,7160
5	62,1590	8,7120	70,8700	0,1336	70,7680
6	81,7210	5,7512	87,3830	0,0958	87,3150
7	90,0950	5,9117	95,9020	0,0997	95,8330
8	104,8000	5,4253	110,0700	0,0962	110,0100
9	125,1600	1,6730	126,5400	0,0540	126,5200

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.4 – Resultados SCL - 04

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 04					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,1467	0,0796	0,2097	0,0283	0,1975
2	251,2400	171,9800	401,8700	54,0890	378,3400
3	130,3600	94,9970	218,9100	29,6150	205,5700
4	172,6100	125,2900	288,3700	39,0520	270,8700
5	158,5600	117,6000	269,1000	36,4650	252,6000
6	98,2540	76,3910	173,1100	23,1240	162,4100
7	105,0100	81,8190	236,8600	24,7150	173,8000
8	100,8400	78,1180	177,2600	23,3020	166,4900
9	81,2290	12,4570	84,5740	1,5154	84,6590

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Filtro de Óleo Naval foi modelado sob condições de temperatura ambiente e sob a presença de uma carga térmica constante e uniforme ($T = 60^{\circ}C$). Os resultados do modelo analisado a sessenta graus Celsius, para as 4 SCLs, e obtidos do ANSYS Mechanical são apresentados nas tabelas 10.5, 10.6, 10.7 e 10.8.

Tabela 10.5 – Resultados SCL - 01 com Carga Térmica

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 01 ($T = 60^{\circ}C$)					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,7735	0,9003	1,6735	0,0060	1,6738
2	47,0730	35,8100	82,1020	1,7936	80,7870
3	51,6030	101,8700	153,4300	1,8108	152,2900
4	51,9980	123,1100	175,0300	1,8212	173,9200
5	53,6340	155,6800	209,2700	1,9159	208,2100
6	57,1440	209,0000	266,1300	2,1338	265,1500
7	58,4320	232,4100	290,8300	2,2321	289,8700
8	60,9310	272,7900	333,7200	2,4132	332,7900
9	64,9620	322,5500	387,5000	2,6562	386,6100

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.6 – Resultados SCL - 02 com Carga Térmica

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 02 ($T = 60^{\circ}C$)					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,3740	1,1630	1,2921	0,0095	1,3000
2	93,4600	100,9800	170,4100	25,9540	169,6900
3	183,2800	140,0500	260,2500	35,5270	259,7100
4	213,9400	161,0500	296,7900	39,9070	296,1000
5	257,2200	182,1700	341,8900	44,8570	341,1300
6	327,8500	212,1900	412,3700	52,2290	411,5700
7	360,9900	230,5200	448,5100	56,2750	447,5900
8	416,5400	258,8200	507,3700	56,6460	506,3100
9	477,8200	277,8800	564,0100	68,1220	562,9600

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.7 – Resultados SCL - 03 com Carga Térmica

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 03 ($T = 60^{\circ}C$)					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,0423	0,0055	0,0438	0,0001	0,0438
2	101,1400	23,2000	120,5100	16,5870	126,3400
3	121,4700	20,6830	131,3300	16,5480	134,0600
4	128,8200	21,3160	140,7000	16,5570	143,4100
5	139,3300	21,0920	149,5900	16,5510	151,4900
6	157,4600	20,4050	162,9800	16,5320	163,2500
7	165,7000	20,4780	171,1500	16,5320	171,1300
8	179,9100	20,4500	184,2500	16,5270	183,6200
9	198,0200	20,1280	201,3200	16,5030	201,4100

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela 10.8 – Resultados SCL - 04 com Carga Térmica

Resultado ANSYS (MPa)					
SCL - 04 ($T = 60^{\circ}C$)					
STEP	Membrana	Flexão	Membrana + Flexão	Pico	Total
1	0,1496	0,2059	0,3223	0,0587	0,3122
2	220,0800	391,3300	542,9900	96,4590	539,3000
3	88,0140	205,6800	262,9000	46,6820	265,4400
4	131,5300	277,5800	370,8000	65,6280	370,5700
5	114,1200	258,1900	341,6100	60,3520	341,7600
6	42,5250	157,3800	192,9100	33,9970	195,2900
7	61,9790	169,6600	211,7000	36,9910	213,4900
8	41,7090	159,3200	198,8000	34,2720	200,1200
9	92,4310	15,0200	107,3000	21,6140	105,9000

Fonte: elaborado pelo Autor.

A partir dos resultados expostos, será aplicado a classificação das tensões que permitira avaliar o componentes para o Requisito de Análise para Proteção contra Colapso Plástico.

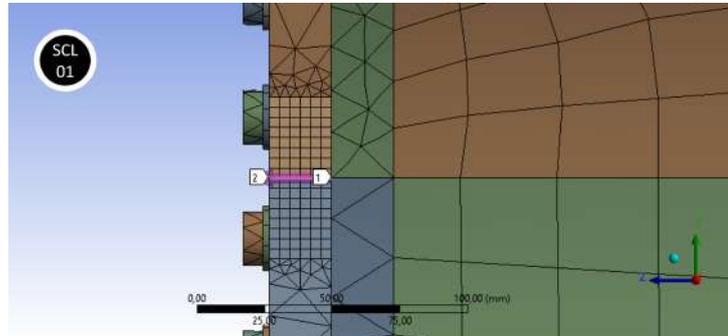
10.2.2 Validação dos Resultados

As tensões normais ao plano do componente foram medidas ao longo de cada SCL e foram avaliadas e validadas de acordo com o que exige a norma.

Validação SCL - 01:

Analisando a SCL - 01 quanto ao posicionamento:

Figura 10.5 – Posicionamento da SCL 01

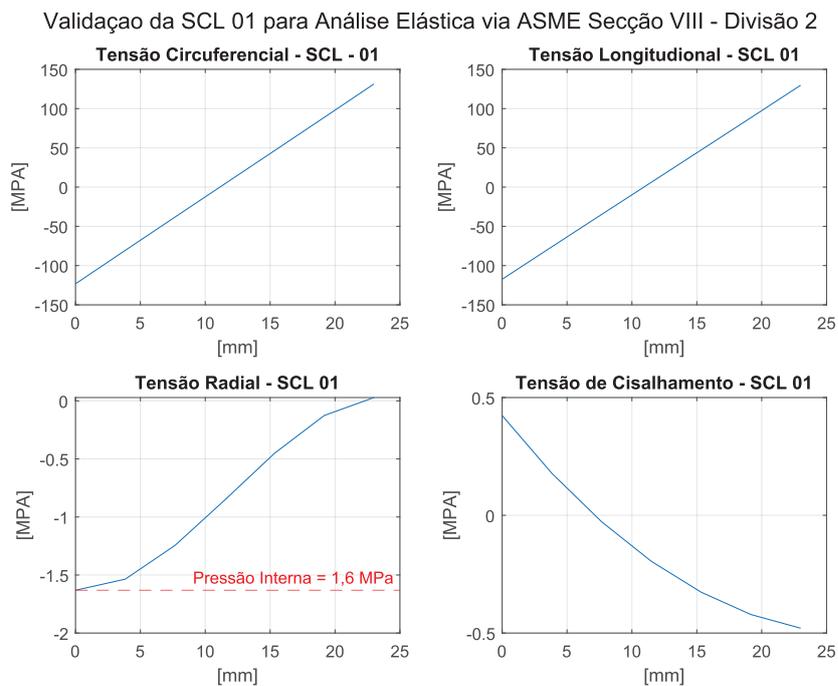


Fonte: elaborado pelo autor.

A SCL 01 está indicada na figura 10.5 pela seta rósea. O formato dos elementos estão de acordo com o indicado pela norma, demonstrado na figura 8.2; O posicionamento da SCL, quando comparado com a figura 10.1 está de acordo com a observação 10.2.

Analisando a SCL 01 quanto a distribuição de tensão:

Figura 10.6 – Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 01



Fonte: elaborado pelo autor.

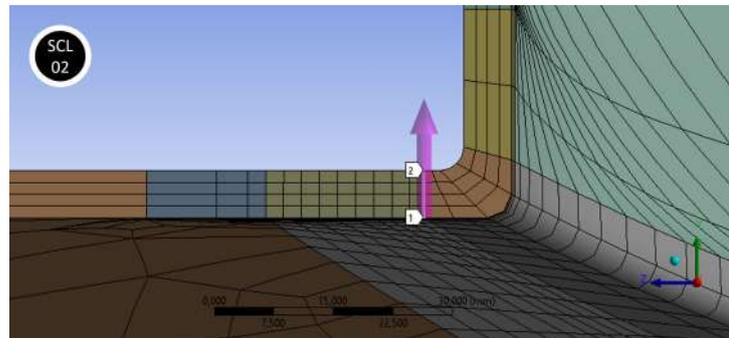
A Tensão Circunferencial e Longitudinal apresentam características de acordo com a observação 10.3 e exemplificado na figura 10.2. A Tensão Radial se apresenta de acordo com a observação 10.4 e exemplificado na figura 10.3. O comportamento da Tensão de Cisalhamento ao longo da SCL não apresenta comportamento parabólico, porém seu valor é relativamente menor que as tensões Cnrcunferencias e Longitudionais, de forma que está de acordo com a observação 10.5.

A **SCL 01** apresenta todas as características indicadas pelas diretrizes da norma, portanto é considerada **valida** e pode ser utilizada na análise da tensão elástica para avaliação do componente pelos critério de requisitos segundo a ASME BPVC Secção VIII - Divisão2, Parte 5.

Validação SCL - 02:

Analisando a SCL 02 quanto ao posicionamento:

Figura 10.7 – Posicionamento da SCL - 02

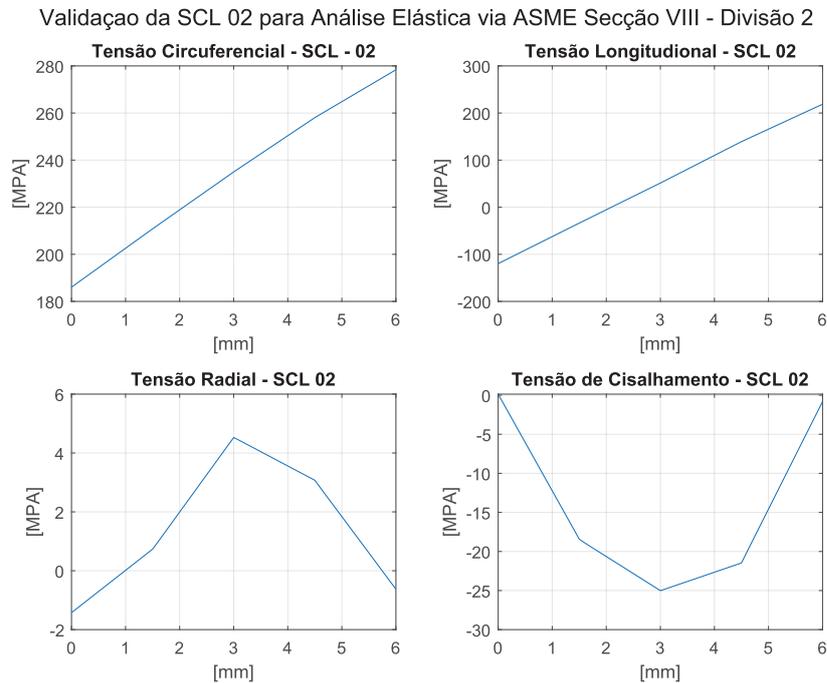


Fonte: elaborado pelo autor.

A SCL - 02 está indicada na figura 10.5 pela seta rósea. O formato dos elementos estão de acordo com o indicado pela norma, demonstrado na figura 8.2; O posicionamento da SCL, quando comparado com a figura 10.1 está de acordo com a observação 10.2.

Analisando a SCL - 02 quanto a distribuição de tensão:

Figura 10.8 – Gráfico das Tensões ao Longo da SCL 02



Fonte: elaborado pelo autor.

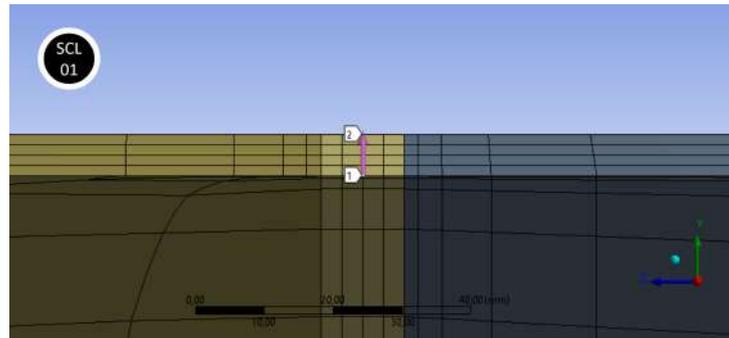
A Tensão Circunferencial e Longitudinal apresentam características de acordo com a observação 10.3 e exemplificado na figura 10.2. A Tensão Radial não apresenta característica monotonicamente crescente ou decrescente devido ao efeito de concentradores de tensão. Dessa forma se apresenta de acordo com a observação 10.4. O comportamento da Tensão de Cisalhamento ao longo da SCL apresenta comportamento parabólico, e está de acordo com a observação 10.5 exemplificado na figura 10.4.

A **SCL 02** apresenta todas as características indicadas pelas diretrizes da norma, portanto é considerada **valida** e pode ser utilizada na análise da tensão elástica para avaliação do componente pelos critério de requisitos segundo a ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5.

Validação SCL - 03:

Analisando a SCL - 03 quanto ao posicionamento:

Figura 10.9 – Posicionamento da SCL - 03

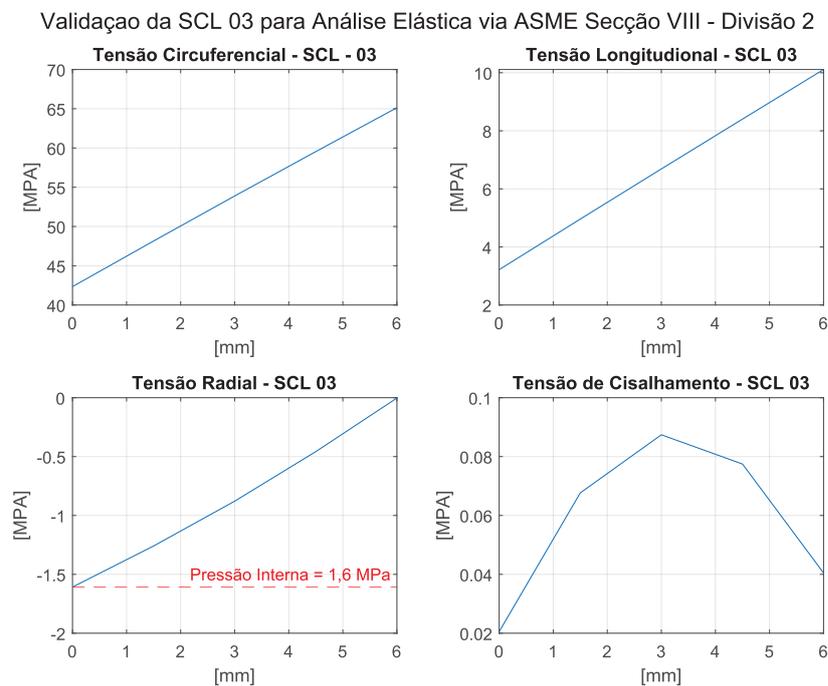


Fonte: elaborado pelo autor.

A SCL - 03 está indicada na figura 10.5 pela seta rósea. O formato dos elementos estão de acordo com o indicado pela norma demonstrado na figura 8.2; O posicionamento da SCL, quando comparado com a figura 10.1 está de acordo com a observação 10.2.

Analisando a SCL - 03 quanto a distribuição de tensão:

Figura 10.10 – Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 03



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tensão Circunferencial e Longitudinal apresentam características de acordo com a observação 10.3 e exemplificado na figura 10.2. A Tensão Radial⁵ se apresenta de

⁵ A SCL 01 e 03 por não estarem em regiões GDS e não sofrerem com efeitos de concentradores de tensão, irão

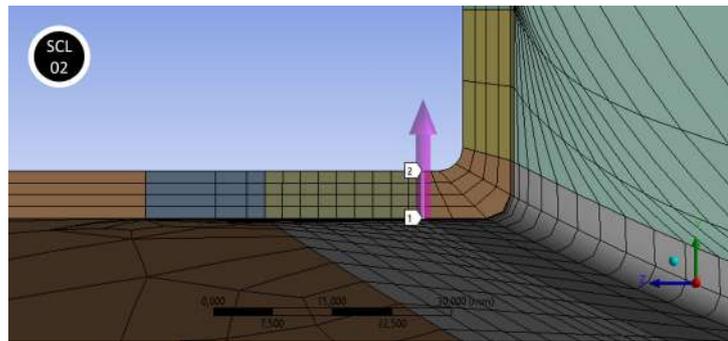
acordo com a observação 10.4 e exemplificado na figura 10.3. O comportamento da Tensão de Cisalhamento ao longo da SCL apresenta comportamento parabólico, e está de acordo com a observação 10.5 exemplificado na figura 10.4.

A **SCL 03** apresenta todas as características indicadas pelas diretrizes da norma, portanto é considerada **valida** e pode ser utilizada na análise da tensão elástica para avaliação do componente pelos critério de requisitos segundo a ASME BPVC Secção VIII - Divisão2, Parte 5.

Validação SCL - 04:

Analizando a SCL - 04 quanto ao posicionamento:

Figura 10.11 – Posicionamento da SCL - 04



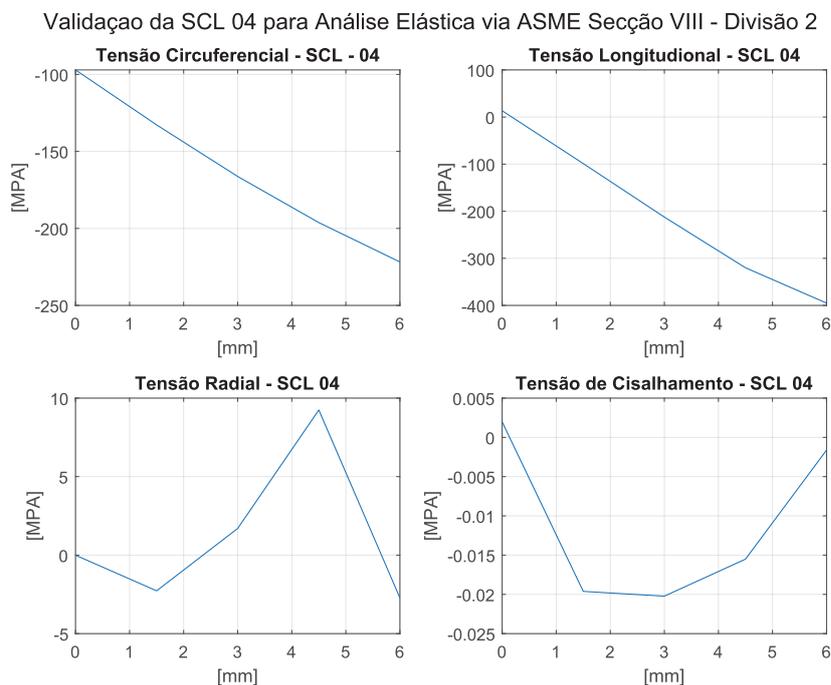
Fonte: elaborado pelo autor.

A SCL - 04 está indicada na figura 10.5 pela seta rósea. O formato dos elementos estão de acordo com o indicado pela norma demonstrado na figura 8.2; O posicionamento da SCL, quando comparado com a figura 10.1 está de acordo com a observação 10.2.

Analizando a SCL - 04 quanto a distribuição de tensão:

apresentar tensão compressiva com valor igual a pressão exercida na superfície interna do Filtro de Óleo Naval.

Figura 10.12 – Gráfico das Tensões ao Longo da SCL - 04



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tensão Circunferencial e Longitudinal apresentam característica de acordo com a observação 10.3 e exemplificado na figura 10.2. A Tensão Radial não apresenta característica monotonicamente crescente ou decrescente devido ao efeito de concentradores de tensão, dessa forma se apresenta de acordo com a observação 10.4. O comportamento da Tensão de Cisalhamento ao longo da SCL apresenta comportamento parabólico, e está de acordo com a observação 10.5 exemplificado na figura 10.4.

A **SCL 04** apresenta todas as características indicadas pelas diretrizes da norma, portanto é considerada **valida** e pode ser utilizada na análise da tensão elástica para avaliação do componente pelos critério de requisitos segundo a ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5.

Observação 10.6. *Uma vez que todas as SCLS estão de acordo com as diretrizes do Anexo 5-A da ASME BPVC Secção VIII - DIVISÃO 2, a metodologia de avaliação pela tensão elástica é válida e os resultados obtidos através da análise MEF podem ser utilizados na aplicação da norma.*

11 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

11.1 VISÃO GERAL

A Parte 5 da ASME BPVC Secção VIII - DIVISÃO 2, traz uma metodologia para o desenvolvimento de projetos de Vasos de Pressão por Análise de Requisitos. Essa abordagem se baseia na utilização dos resultados obtidos na análise de tensão elástica¹ em um determinado componente para avaliação da possibilidade de falha em 4 (quatro) requisitos²: falha por colapso plástico, falha local, flambagem e cargas cíclicas. Além disso a Parte 5 traz requisitos suplementares para análise de parafusos, chapas perfuradas e vasos multicamadas (ASME, 2021c).

Para cada tipo de análise de falha, há diversos procedimentos para qualificação do componente. Entretanto, não se deve utilizar mais de um tipo de método na avaliação de um mesmo requisito (ASME, 2021c).

Observação 11.1. *A Proteção Contra Colapso Plástico será aplicada onde a espessura e a configuração do componente for estabelecida utilizando um projeto baseado na concepção por regras de requisitos (ASME, 2021c).*

Observação 11.2. *A Proteção Contra Falha Local será aplicada onde a espessura e a configuração do componente for estabelecida utilizando um projeto baseado na concepção por regras de requisitos. Não se faz necessário a avaliação contra falha local sempre que o componente estiver de acordo com ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Part 4, 4.2. p.177. 2021 (ASME, 2021c).*

Observação 11.3. *A Proteção Contra Colapso por Flambagem será aplicada onde a espessura e configuração do componente for estabelecida utilizando um projeto baseado na concepção por regras de requisitos e as cargas aplicadas resultam num campo de tensão compressivo (ASME, 2021c).*

Observação 11.4. *A Proteção Contra Falha Devido a Cargas Cíclicas será aplicada onde a espessura e configuração do componente for estabelecida utilizando um projeto baseado na*

¹ Há também abordagens não-lineares.

² Ver ASME BPVC Divisão 2, 5.1.1.2, p.579. 2021.

concepção por regras de requisitos e houver a presença de carregamentos cíclicos (ASME, 2021c).

Uma outra observação importante é que as propriedades de tensões admissíveis devem ser uma variável independentes do tempo para que a metodologia seja aplicável. Em situações diferentes, alguns requisitos devem ser observados³ (ASME, 2021c).

O **Projeto por Análise de Requisito** (Parte 5 da norma) baseia-se na análise do resultado das tensões obtidas com a solução do **Modelo Numérico (CAE)**. As condições de carregamento irão determinar a necessidade de analisar os componentes sobre carregamento térmico sempre que for necessário obter os valores de tensões térmicas (ASME, 2021c).

A norma não especifica como o modelo numérico do componente deva ser construído, porém a análise das tensões precisa incluir a validação dos resultados como parte da documentação de projeto (ASME, 2021c).

As propriedades dos materiais a serem utilizadas na análise de tensão devem estar conforme o especificado na ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 3⁴ (ASME, 2021c).

Observação 11.5. *Todas as cargas aplicadas sobre um componentes devem ser consideradas para a análise por requisitos. Isso implica que outras condições de carregamento além da pressão devem ser consideradas, mesmo quando não especificado no documento "User's Design Specification"*⁵ (ASME, 2021c).

Um diferencial entre a Divisão 1 e Divisão 2 é a possibilidade de projetar equipamentos que estarão sujeitos a carregamentos cíclicos. A formas como deve ser trabalhado o estudo dos carregamentos para análise fica especificado no Trecho de norma 11.1.

Trecho de norma 11.1 (ASME VIII – DIVISÃO 2, 5.1.3.3, p.580. 2021.). *"Se alguma das cargas variar com o tempo, deve ser desenvolvido um histograma de carga para mostrar a variação com o tempo de cada carga específica"*⁶.

A norma fornece orientações sobre como devem ser tratadas as **Condições de Carregamento**⁷ atuante sob o vaso, no Parágrafo 5.1.3.

³ Ver ASME BPVC Divisão 2, 5.1.1.3, p.579. 2021.

⁴ ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 3, p.57. 2021.

⁵ Ver definição 5.3.

⁶ Ver ASME BPVC Divisão - 2, 5.1.3.3, p.580. 2021. Esse trecho irá trazer especificações acerca de como deverá ser construído os histogramas de cargas.

⁷ Ver ASME BPVC Divisão 2, 5.1.3, p.580. 2021.

A norma fornece orientações de como tratar os diversos tipos de carregamentos sobre condições de funcionamento distintos nos Vasos de Pressão, como: sob pressão de teste, operação normal, operação normal mais situações ocasionais e em situações anormais de operação.

As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 da norma, devem ser consultadas para se executar a análise.

A Tabela 5.1 (Cargas e Condições de Carregamento a Serem Consideradas em um Projeto⁸), especifica como atuam as cargas e quais conjuntos de carregamentos devem ser considerados em diversas situações operacionais do Vaso de Pressão

A Tabela 5.2 (Parâmetros de Combinações de Cargas⁹), especifica cada parâmetro a serem considerados sobre as condições de carregamento quando analisado sobre o projeto ou sob a análise em operação.

A Tabela 5.3 (Combinações de Condições de Carregamento e Tensão Admissível para Análise Elástica¹⁰), especifica como as combinações de carregamento devem ser relacionadas com a tensão admissível segundo a norma.

11.2 PROTEÇÃO CONTRA COLAPSO PLÁSTICO

A Divisão 2 traz três métodos¹¹ alternativos para avaliar a **Proteção Contra Colapso Plástico: (1) Método de Análise da Tensão Elástica; (2) Método de Análise da Carga Limite¹²; (3) Método de Análise da Tensão Elastoplástica¹³; (ASME, 2021c).**

O **Método de Análise da Tensão Elástica**, baseia-se no cálculo das tensões a partir da uma análise do comportamento elástico do material (linear), classificando-as e comparando com valores admissíveis determinado conservadoramente (ASME, 2021c).

Esse método poderá ser utilizado sempre que o componentes estiver de acordo com as Observações 11.6, 11.7, 11.8:

Observação 11.6. *O método elástico Não deve ser utilizado quando a complexidade de geometria e/ou as combinações de carregamento gerem incertezas durante procedimento de Classificação das Tensões¹⁴. Sempre que a Classificação das Tensões for executada erroneamente,*

⁸ Ver ASME BPVC Divisão - 2, table 5.1, p.607. 2021.

⁹ Ver ASME BPVC Divisão - 2, table 5.2, p.608. 2021.

¹⁰ Ver ASME BPVC Divisão - 2, table 5.3, p.609. 2021.

¹¹ Não é objetivo desse trabalho executar análises não-linear, portanto se buscou como exemplo para este manual uma análise puramente elástica.

¹² Ver ASME BPVC - Divisão 2, 5.2.3, p.583. 2021.

¹³ Ver ASME BPVC - Divisão 2, 5.2.4, p.584. 2021.

¹⁴ Ver Capítulo 6.

irá obter-se resultados ambíguos e pouco confiáveis (ASME, 2021c).

Observação 11.7. *O método elástico Não deve ser utilizado na análise de "vasos de parede pesada"¹⁵ ($R/t \leq 4$). Os resultados serão não-conservadores, já que as distribuições de tensões em secções de parede pesadas não são representadas com precisão pela distribuição linear implícita de tensão utilizada no procedimento de Classificação das Tensões (ASME, 2021c).*

Observação 11.8. *O método elástico Não deve ser utilizado sempre que houver a necessidade de um grau de precisão elevado na garantia da Proteção Contra Colapso Plástico. Esse método fornece apenas resultados aproximados, logo com menor precisão que os demais (ASME, 2021c).*

Trecho de norma 11.2 (ASME VIII – DIVISÃO 2, 5.2.2.1, p.581. 2021.). *"Para avaliar a proteção contra o colapso do plástico, os resultados de uma análise de tensão elástica do componente sujeito a condições de carga definidas, são categorizados e comparados com um valor limite associado."*

Em resumo, o Trecho de norma 11.2 explica que os valores obtidos na análise numérica devem ser classificados para se obter um valor de Tensão Equivalente (S_e) que deve ser comparado com o valor da Tensão Admissível determinado no Capítulo 7.

Os passos para avaliar um componente, segundo a norma, para Proteção Contra Colapso Plástico pelo **Métodos da Análise da Tensão Elástica**¹⁶ consiste em:

Passo da norma 11.2.1. *Determinar os tipos de carregamentos atuando no componente e classificar de acordo com as combinações previstas na Tabela 5.3 da norma.*

Passo da norma 11.2.2. *Deve ser analisado os pontos do vaso para determinar e classificar tensões equivalentes que atuam nas diversas regiões (P_m , P_L , P_b , Q e F). As tensões devem ser classificadas de acordo com a **Figura 5.1**¹⁷ e **Tabela 5.6**¹⁸ da norma.*

A classificação de tensão pode ser melhor compreendida no Capítulo 6 e a figura 5.1 da norma encontra-se traduzida neste trabalho na figura 11.1.

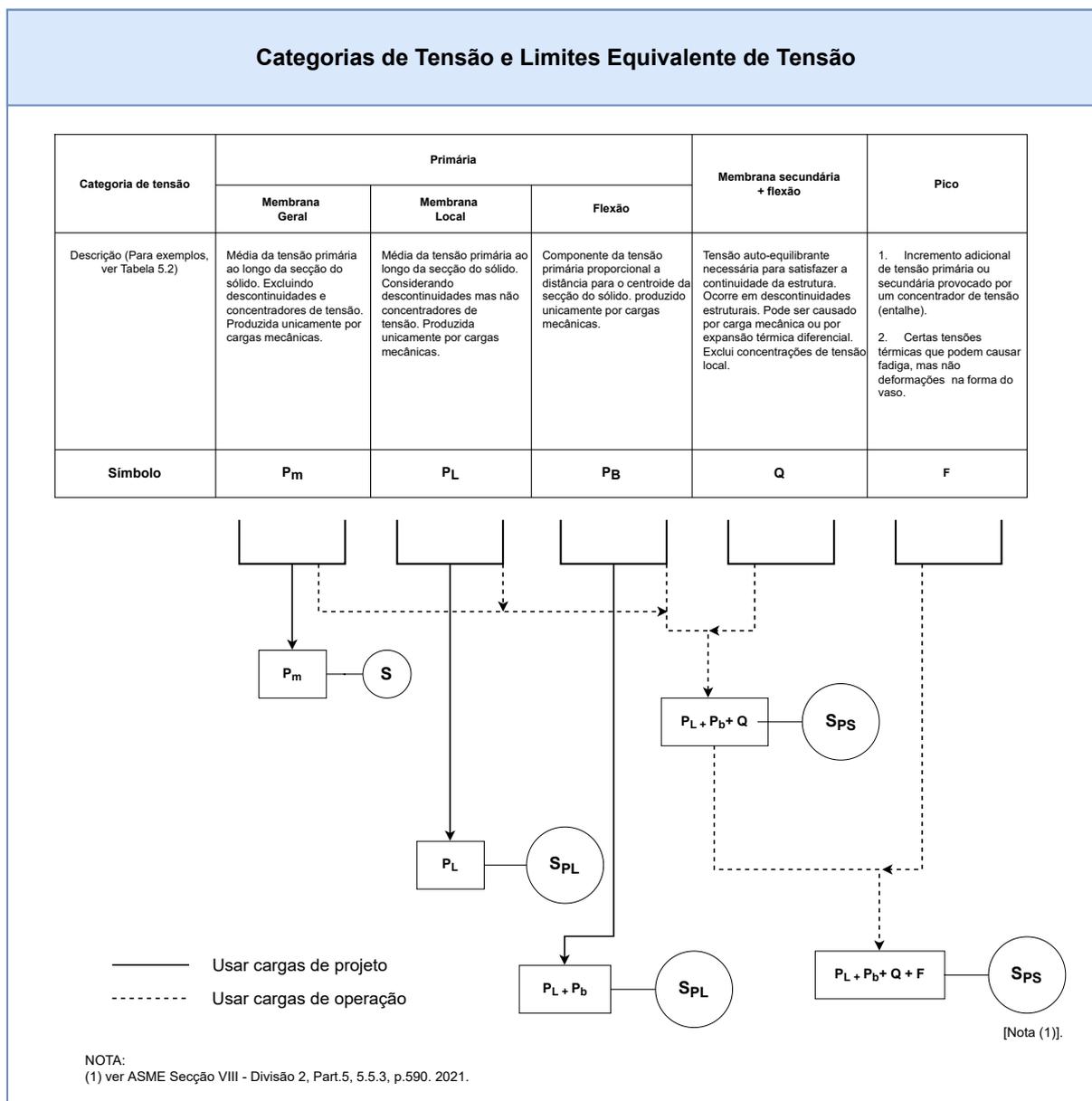
¹⁵ A norma traz o termo "pesada", porém é convencional a utilização do termo: Vaso de Parede Espessa.

¹⁶ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, 5.2.2.4, p. 582. 2021.

¹⁷ Ver ASME BPVC Divisão 2, Figure 5.1, p.616. 2021.

¹⁸ Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Table 5.6, p.611-612. 2021.

Figura 11.1 – Categorias de Tensão e Limites Equivalente de Tensão - Figura 5.1 da Norma



Fonte: ASME, 2021c, p.616 (com adaptações).

Passo da norma 11.2.3. A *Tensão Equivalente Categorizada* representa o efeito de todas as cargas. A tensão equivalente é extraída dos dados obtidos na análise MEF realizada no Ansys Workbench. Após categorizadas, de acordo com o passo anterior, estas devem ser somadas, quando for pertinente.

Exemplo 11.1. P_m , P_L , $(P_L + P_b)$, $(P_L + P_b + Q + F)$ etc.

Observação 11.9. O Ansys Workbench irá entregar os valores em termos de componentes de

*Tensão: Membrana (Membrane), Flexão (Bending), Pico (Peak), Total (Total)*¹⁹. A partir da classificação do Passo da norma 11.2.2, apenas o valor correspondente deve ser utilizado.

Exemplo 11.2. Uma carga oriunda da pressão no tampo de fechamento plano irá gerar tensões que devem ser classificadas de acordo com a figura 11.1 como sendo Tensão Primária Membrana Geral (P_m) e Tensão Primária de Flexão (P_b), portanto a Tensão Equivalente Categorizada será a soma direta dos valores das tensões obtidos da Análise realizada no Ansys Workbench ($P_m + P_B$).

Passo da norma 11.2.4. Para avaliar a **Proteção Contra Colapso Plástico**, deve-se comparar a Tensão Equivalente Categorizada com o Valor da Tensão Admissível Correspondente, como explicitado na figura 11.1, de acordo com as relações definidas nas equações 11.1, 11.2, ou 11.3.

Observação 11.10. Para Tensão Primária de Membrana Geral (P_m), deve-se comparar seu valor diretamente com a Tensão Admissível S ; Para Tensão Primária de Membrana Local (P_L) ou Membrana Local + Flexão ($P_L + P_b$), deve-se comparar com a Tensão Admissível S_{PL} .

Observação 11.11. A Tensão Admissível S_{PL} será o maior valor entre duas situações: (1) 1,5 vezes o valor da Tensão Admissível S ($S_{PL} = 1,5S$); (2) $S_{PL} = S_y$, exceto quando $S_y/S_T > 0,7$ ou o valor de S seja uma propriedade dada em função do tempo (ASME, 2021c).

$$P_m \leq S \quad (11.1)$$

$$P_L \leq S_{PL} \quad (11.2)$$

$$(P_L + P_b) \leq S_{PL} \quad (11.3)$$

Observação 11.12. Uma vez estabelecido que o Valor da Tensão Equivalente Computada (S_e) seja menor ou igual a Tensão Admissível, avaliado nas SCLs, será considerado que o componente **Atende ao Requisito para Proteção Contra Colapso Plástico** estabelecido pela norma **ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5**.

¹⁹ A subsecção 10.2.1 apresenta os dados conforme extraídos do Ansys Mechanical no pós-processamento.

11.3 PROTEÇÃO CONTRA FALHA LOCAL

Além da avaliação para Proteção **Contra Colapso Plástico**, o critério de **Proteção Contra Falha Local** deve ser satisfeito para validação do componente. O requisito é aplicável a todos os componentes dimensionados de acordo com o método analítico (Parte 4 da norma). Não é necessário avaliar esse requisito²⁰, sempre que o componente estiver projetado de acordo com a Parte 4 da norma (exemplo: espessura mínima da parede e solda) (ASME, 2021c).

A Divisão 2 traz dois métodos²¹ alternativos para avaliar a **Proteção Contra Falha Local: (1) Análise Elástica - Limite da Tensão Triaxial; (2) Análise Elastoplástica - Limite da Deformação Local** (ASME, 2021c)

A análise elástica consiste na soma algébrica das Tensões Principais Primárias de acordo com a Combinação de Carregamentos de Projeto da Tabela 5.3 da norma. Para efeito de falha local, será utilizado apenas os valores de Tensão de Membrana + Flexão obtidos no Ansys Workbench quando executado a simulação pelo método de corpos contínuos.

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4S \quad (11.4)$$

Sendo σ_1 a tensão principal 1, σ_2 a tensão principal 2 e σ_3 a tensão principal 3, onde $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ e todas são classificadas de acordo com as condições de carregamento da tabela 5.3 da norma.

Dado que o carregamento é classificado pela tabela 5.3 como gerando apenas tensões primárias, a Tensão de Pico obtida no Ansys, não deverá entrar na soma, por ser classificada como Tensão Secundária. Ajustando a equação 11.4 de acordo com a Tabela 5.3 da norma e alinhando com os resultados que se obtém no Ansys, temos:

$$membrane + bending \leq 4S \quad (11.5)$$

Observação 11.13. *Uma vez estabelecido que o Valor da soma das Tensões Principais Primárias ($P_L + P_b$) seja menor ou igual a $4S$ avaliado nas SCLs, será considerado que o componente Atende ao Requisito para **Proteção Contra Falha Local** estabelecido pela norma ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5.*

²⁰ Ver ASMe BPVC Secção VIII - Divisão 2, 5.3.1.1, p.585. 2021.

²¹ Não é objetivo desse trabalho executar análises não-lineares, portanto buscou como exemplo para este manual uma análise puramente elástica.

11.4 PROTEÇÃO CONTRA FLAMBAGEM

Em complemento com a avaliação para Proteção **Contra Colapso Plástico**, o critério para **Proteção Contra Flambagem** deve ser satisfeito para validação do componente (ASME, 2021c).

Trecho de norma 11.3 (ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, 5.4.1.1, p.856. 2021.). "*O Fator de Projeto a ser utilizado numa avaliação da estabilidade estrutural baseia-se no tipo de análise de Flambagem realizada.*"

Deve-se realizar uma análise de Flambagem a partir da análise da tensão Elástica cuja solição irá determinar a pré-tensão no componentes, devendo satisfazer um fator mínimo de projeto:

$$\phi_B \leq \frac{2}{\beta_{cr}} \quad (11.6)$$

Onde o Fator de Redução de Capacidade²² para cascos cilíndricos ou cônicos não endurecidos sujeito a pressão externa é dado por:

$$\beta_{cr} = 0,80 \quad (11.7)$$

A norma traz o fator de correção (β_{cr}) para outras situações como: vasos sujeitos a cargas axiais e outras geometrias de vasos (esféricos) e tampos (elíptico, esférico, torisférico).

Observação 11.14. *Executando a análise numérica estrutural baseada em modelos cuja condição de carregamento envolva Pressão externa e/ou Cargas axiais e a razão entre a pressão necessária para gerar a flambagem e a pressão de projeto seja igual ou superior ao Fator de Projeto (ϕ_B), será considerado que o componente **Atende ao Requisito para Proteção Contra Flambagem** estabelecido pela norma ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5.*

11.5 PROTEÇÃO CONTRA FALHA DEVIDO A CARGAS CÍCLICAS

Equipamentos que operam sob tensões repetidas ou flutuantes, mesmo que seja submetidos a tensões reais abaixo do Limite à Tração Última (S_T) ou mesmo abaixo do Limite Mínimo de Resistência ao Escoamento (S_Y) estão sujeitos a falhas catastróficas. A principal

²² Para outras geometrias e situações, ver: ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, 5.4.1.1, p.856. 2021.

características dessas falhas (falhas por fadiga) é que as tensões impostas aos equipamentos que funcionam sob um elevado número de ciclos colapsam de formas imprevisíveis (Budynas; Nisbeth, 2016).

Trecho de norma 11.4 (ASME VIII – DIVISÃO 2, Part 5, 5.5.1.1, p.587. 2021). *"Deve ser realizada uma avaliação de fadiga se o componente estiver sujeito a uma operação cíclica"*.

Observação 11.15. *A avaliação para **Proteção Contra Falha Devido a Cargas Cíclicas** consiste em determinar um **Número de Ciclos Admissível** (N_k) e avaliar se é adequado para o **Número de Ciclos** (n) especificado no **"User's Design Specification"***

Dois parâmetros devem ser avaliados nessa etapa: Falha por Fadiga e Falha por "Ratcheting"^{23,24}.

Para realização da análise de fadiga, deve-se primeiro utilizar o Critério de Triagem ("*Screening Criteria*"). Caso não seja possível enquadrar em alguma das três situações possíveis, então deve-se partir para avaliação de fadiga pela análise de um dos métodos disponíveis na norma.

Os **Critérios de Triagem** são: Baseado na experiência com algum equipamento comparável²⁵; Método A²⁶; e Método B²⁷.

Caso não se enquadre em algum dos critérios de triagem, então deve ser partir para análise de Fadiga e "*Ratcheting*" ou pelo método da Análise da Tensão Elástica ou pela Análise Elastoplástica.

A Avaliação da Fadiga pela Análise da Tensão Elástica e Tensão Equivalente²⁸ consiste em avaliar o Dano de Fadiga (D_f) através do cálculo da **Amplitude da Tensão Equivalente Total Efetiva** obtida a partir da Análise da Tensão Elástica (determinada pela MEF) (ASME, 2021c).

A norma traz um procedimento de avaliação em 9 passos que serão resumidos e simplificados nos passos da norma a seguir:

Passo da norma 11.5.1. *Determinar um histograma de cargas com base nas informações fornecidas através do "User's Design Specification" e determinar as Condições de Carregamento,*

²³ Ver Definição ASME 9.

²⁴ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.1.5, pg.588; 5.5.1.6. pg 588. 2021.

²⁵ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.2.2, pg.588. 2021.

²⁶ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.2.3, pg.588. 2021.

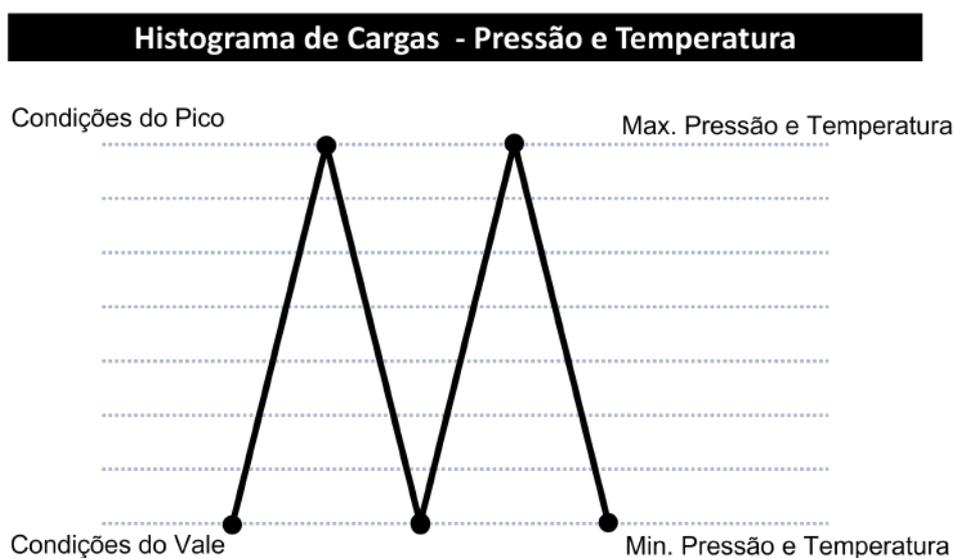
²⁷ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.2.4, pg.589. 2021.

²⁸ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.3, pg.590. 2021.

listando os Picos ("Peak") e os Vales ("Valley"), além do número de ciclos de operação do equipamento.

Observação 11.16. o **Pico** representa o valor máximo de carregamento e tensão atingido durante a operação cíclica do equipamento, enquanto **Vale** é o menor valor. Na construção do histograma deve ser levado em conta cargas mecânicas e térmicas.

Figura 11.2 – Exemplo de Histograma de Cargas



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos no modelo numérico é possível realizar os passos seguintes da Análise de Fadiga. Deve-se extrair o maior valor total obtida da Tensão Linearizada na SCL ($P_L + P_b + Q + F$).

Passo da norma 11.5.2. Calcular a **Tensão Equivalente Alternada Efetiva**²⁹ ($S_{alt,k}$) a partir das equações de **Varição da Tensão Equivalente Efetiva** ($\Delta S_{p,k}$), e **Varição da Tensão Equivalente Local Térmica** ($\Delta S_{LT,k}$).

Para obter a **Varição da Tensão Equivalente Efetiva** se utiliza os dados extraído do valor total das Tensões de Membrana Primária, mais Tensões Secundárias e de Pico obtidas a partir da Tensão Linearizada extraída da Análise Numérica.

²⁹ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.3.2, Step 3 - 4, pg.590-591. 2021.

Ao executar a simulação, devemos avaliar nas Condições de Carregamento (CC), tanto no Pico ($CC1$) como no Vale ($CC2$), bem como a Condição Local Térmica (CLT), e obter os valores das tensões geradas para calcular a variação conforme a equação 11.8.

$$\Delta S_{p,k} = CC1 - CC2 = Pico - Vale \quad (11.8)$$

Para determinar a Tensão Alternada, precisamos determinar o valor do **Fator de Resistência à Fadiga** (K_f). Deve-se utilizar as Tabelas³⁰ 5.11 e 5.12 da norma para estimar o fator de redução ([ASME, 2021c](#)).

Trecho de norma 11.5 (ASME VIII – DIVISÃO 2, Part 5, 5.5.3.2, Step 4 (a), p.591. 2021.).
"Se os efeitos de entalhe e solda forem contabilizados no modelo numérico, $K_f = 1$ ".

Um outro fator de correção também deve ser determinado, o **Fator de Penalidade à Fadiga** ($K_{e,k}$), através dos parâmetros encontrados na tabela³¹ 5.13 da norma e nas equações abaixo.

$$K_{e,k} = 1,00 \quad \text{para} \quad \Delta S_{n,k} \leq S_{PS} \quad (11.9)$$

Observação 11.17. Para determinar o valor do fator de penalidade, é necessário avaliar a *Variação da Tensão Equivalente Primária mais Secundária* ($\Delta S_{n,k}$)³², oriunda do maior valor ao longo da espessura obtida do processo de linearização (*membrana + flexão + pico*)³³ em relação a máxima tensão equivalente dessa variação (S_{PS}) ([ASME, 2021c](#)).

S_{PS} representa o limite máximo da soma entre a tensão equivalente primária mais secundária, demonstrada na figura 11.1.

Observação 11.18. A Tensão Admissível S_{PS} ³⁴ é o maior valor entre duas situações: (1) $S_{PS} = 3S$; (2) $S_{PS} = 2S_Y$, exceto quando $S_Y/S_T > 0,7$ ou o valor de S seja uma propriedade dada em função do tempo ([ASME, 2021c](#)).

³⁰ As tabelas se encontram no Anexo C.

³¹ A tabelas se encontra no Anexo C.

³² Quando $\Delta S_{n,k}$ não for menor que S_{PS} , deverá se calcular o Fator de Penalidade à Fadiga ($K_{e,k}$) através das equações 5.32 ou 5.33 da ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.3.2, Step 4(b), p.591. 2021.

³³ Maior valor obtido após a linearização sob o Path no Ansys Workbench.

³⁴ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, 5.5.6.1(d), p.597. 2021.

Uma vez determinada a **Tensão Equivalente Alternada Efetiva** ($S_{alt,k}$), deve-se determinar número máximo de ciclos suportado pelo equipamento, a partir desse valor, no próximo passo.

Passo da norma 11.5.3. *Determinar o Número de Ciclos Admissível (N_k) a partir dos dados do anexo 3-F, 3-F.1³⁵ baseado no material de construção do Vaso de Pressão.*

Para determinar o **Número de Ciclos Admissível** (N_k), pode ser feito através do Diagrama de Curva de Fadiga ou ser determinado calculando os valores da curva baseado nas equações de modelagem da Curva de Fadiga, para $N_k = 10^X$.

Observação 11.19. *Determina-se o valor do número de ciclos (N_k) pelo diagrama através do valor da Amplitude de Tensão (S_a). Porém quando houver efeito da temperatura, esse valor de tensão deve ser ajustado através das equações da Tabela 3-F.1³⁶ da norma. Calcula-se a Amplitude de Tensão Ajustada³⁷ (S_{ac}) cujo valor deverá ser utilizado no Diagrama de Curva de Fadiga.*

Exemplo 11.3. *Para executar o ajuste da Amplitude de Tensão para um Material de Construção baseado na Liga Níquel-Cromo-Molibdênio, deve-se utilizar a equação 11.10, extraída da Tabela 3-F.1 da norma.*

$$S_{ac} = 195,0E3 \left(\frac{S_a}{E_T} \right) \quad (11.10)$$

Avaliação do número de ciclos através das equações dar-se a partir da classe de materiais onde se deve determinar o valor de Y e X (para $103 \text{ MPa} (15k\text{si}) \leq S_a \leq 4881 \text{ MPa} (708k\text{si})$)³⁸, conforme a equações abaixo para o mesmo material do exemplo 11.3.

$$Y = \log \left[28,3E3 \left(\frac{S_a}{E_T} \right) \right] \quad (11.11)$$

$$X = \frac{-42,08579 + 12,514054Y}{1 - 4,3290016Y + 0,60540862Y^2} \quad \text{para} \quad 10^Y \geq 35,9 \quad (11.12)$$

³⁵ Ver ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, Anexo 3-F e 3-F.1, p.154. 2021.

³⁶ Ver ASME BPVC Seção VII - Divisão 2, Tabela 3-F.1, p.159. 2021.

³⁷ Obs.: o termo ($E3$) que aparece nas equações 11.10 e 11.11, não é o Módulo de Young (E), e sim 10^3 .

³⁸ Tensões Equivalentes S_a abaixo desses valores possuem vida infinita.

$$X = \frac{9,030556 - 8,1906623Y}{1 - 0,36077181Y - 0,47064984Y^2} \quad \text{para} \quad 10^Y < 35,9 \quad (11.13)$$

Uma vez definido o índice (X), seja pela análise do Diagrama de Curva de Fadiga ou das equações, é possível determinar o Número de Ciclos Admissíveis (N_k) pela equação 11.12 ou 11.13 .

$$N_k = 10^X \quad (11.14)$$

Observação 11.20. A equação 11.10 é modelada para serem aplicadas diretamente em MPa. As equações 11.11, 11.12 e 11.13 são modeladas em Ksi. Caso esteja analisando o projeto em MPa é preciso converter³⁹ para Ksi a equação 11.11.

Passo da norma 11.5.4. Determinar o Dano de Fadiga (D_f). O D_f é a razão entre o Número de Ciclos Especificado no Projeto (n_k).

$$D_f = \frac{n_k}{N_k} \quad (11.15)$$

Observação 11.21. Analisando o Dano de Fadiga (D_f) e estando de acordo com a relação da equação 11.16, avaliado em cada SCL analisada para as distintas condições de temperatura, será considerado que o componente **Atende ao Requisito para Proteção Contra Cargas Cíclicas** estabelecido pela norma **ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, Parte 5**, se:

$$D_f \leq 1 \quad (11.16)$$

11.5.1 Proteção contra "Ratcheting" - Método de Análise da Tensão Elástica

Será considerado que o componente **Atende ao Requisito para Proteção Contra "Ratcheting"** estabelecido pela norma **ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2** para proteção contra "Ratcheting" desde que a relação da equação 11.17 seja satisfeita⁴⁰.

$$\Delta S_{n,k} \leq S_{PS} \quad (11.17)$$

³⁹ Obs.: $1MPa = 0,14504ksi$.

⁴⁰ Uma explicação detalhada de como determinar o valor de S_{PS} pode ser revista na Observação 11.18.

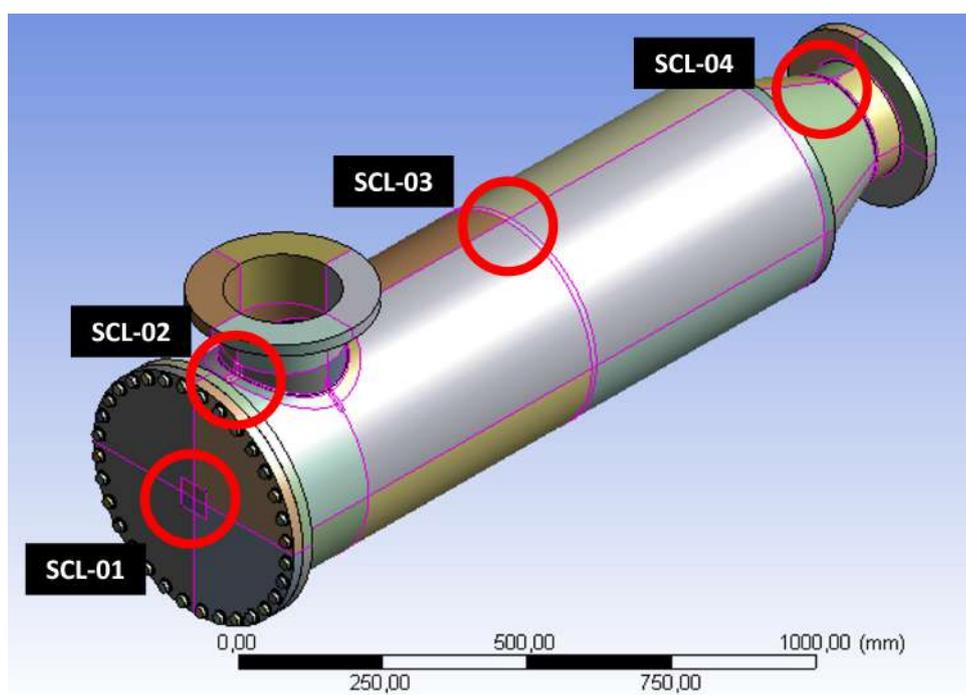
11.6 APLICAÇÃO EM FILTRO DE ÓLEO NAVAL

Após a simulação numérica via Ansys Workbench, cujos dados obtidos estão apresentados na Aplicação Em Filtro de Óleo Naval 10.2, foi possível analisar o Vaso de Pressão sob a perspectiva da Parte 5 da ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2. As avaliações estão baseadas nos métodos de Análises das Tensões Elásticas.

O componente foi avaliação para uma variação de 9 condições de carregamentos como exposto na Aplicação Em Filtro de Óleo Naval 1.6.

O componente foi analisado em 4 locais distintos: Tampo de Fechamento (SCL-01); Base do Bocal (SCL-02); Casco Cilíndrico (SCL-03); Casco Cônico (SCL-04), conforme figura 11.3

Figura 11.3 – Locais Analisados para Validação do Componente



Fonte: elaborado pelo autor.

11.6.1 Avaliação do Requisito - Proteção Contra Colapso Plástico

Determinando o tipo de carregamento conforme Tabela 5.1 e Tabela 5.2 da norma:

O Filtro de Óleo Naval está sujeito a Cargas Estacionárias, Pressão interna proveniente do fluido de trabalho e Força de Compensação devida a tubulação anexada, Restrição na Base, pré-carga dos parafusos na flange do Tampo de Fechamento;

Dessa forma de acordo com a Tabela 5.3 temos a seguinte combinação de carregamento:

$$P + P_S + D \quad (11.18)$$

Para a combinação de carregamento do componentes temos as tensões admissíveis (S)⁴¹, e (S_{PL})⁴², cujos valores estão sintetizados na tabela 11.1.

Tabela 11.1 – Tensões Admissíveis para Avaliação do Requisito - Proteção Contra Colapso Plástico

Tensões Admissíveis		
Avaliação do Requisito - Proteção Contra Colapso Plástico		
	$T = amb$	$T = 60^\circ C$
S	170,67 [MPa]	147,56 [MPa]
S_{PL}	256,00 [MPa]	221,34 [MPa]

Fonte: elaborado pelo Autor.

Observação 11.22. A Tensão Admissível S_{PL} foi estabelecida com base no critério (1) da Observação 11.11, onde $S_{PL} = 1,5S$.

Uma vez determinadas as Tensões Admissíveis, é possível avaliar o componentes para o requisito no Tampo de Fechamento (SCL-01) e demais regiões (SCL-02, SCL-03, SCL-04).

⁴¹ Ver Aplicação Em Filtro de Óleo Naval 7.3.

⁴² Ver Observação 11.11.

Tabela 11.2 – Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - SCL - 01

Avaliação Contra Falha por Colapso Plástico						
Tensão Classificada (SCL - 01) →			$P_m + P_b$ ↓			
Condições de Carregamento (Tab. 5.3) ↓			Tensão Admissível (S_{PL}) ↓			
$P + P_S + D$			$T = amb.$		$T = 60^\circ C$	
STEP (s)	Força de Compensação [N]	Pressão Interna [MPa]	$\leq 256,00$ [Mpa]		$\leq 221,34$ [Mpa]	
1	0	0	1,6735	Aceito	1,6735	Aceito
2	60.821	0,40	36,2060	Aceito	82,1020	Aceito
3	76.027	1,40	108,3500	Aceito	153,4300	Aceito
4	91.232	1,60	130,2200	Aceito	175,0300	Aceito
5	103.400	2,00	164,5500	Aceito	209,2700	Aceito
6	117.840	2,72	221,5500	Aceito	266,1300	Não-Aceito
7	129.250	3,00	246,3500	Aceito	290,8300	Não-Aceito
8	145.970	3,50	289,4400	Não-Aceito	333,7200	Não-Aceito
9	152.050	4,20	343,3500	Não-Aceito	387,5000	Não-Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Tampo de Fechamento foi analisado no centro. De acordo com a Figura 5.1⁴³ e Tabela 5.14⁴⁴, a tensão nesse ponto do componentes é Classificada como Tensão de Membrana Geral (P_m) mais Tensão de Flexão (P_b), sendo a Tensão Equivalente Computada $S_e = P_m + P_b$ e portanto é avaliada pelo Limite Admissível S_{PL} .

Da análise da Tabela 11.2, temos que o **Tampo de Fechamento** do Filtro de Óleo Naval **atende** o requisito de Proteção Contra Colapso Plástico, apenas quando aplicado uma Pressão de Projeto **não-superior** a $P = 2,00$ [MPa], operando sob a Temperatura de Projeto $T = 60^\circ C$. Entretanto, Pressões superiores a $1,60$ [MPa], não podem ser utilizada pois causará falha por Colapso Plástico nas demais regiões do Filtro de Óleo Naval.

⁴³ Ver Figura 11.1.

⁴⁴ Ver Figura B.1.

Tabela 11.3 – Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 02)

Avaliação Contra Falha por Colapso Plástico						
Tensão Classificada (SCL - 02) →			$P_L + \downarrow$			
Condições de Carregamento (Tab. 5.3) ↓			Tensão Admissível (S_{PL}) ↓			
$P + P_S + D$			$T = amb.$		$T = 60^\circ C$	
STEP (s)	Força de Compensação [N]	Pressão Interna [MPa]	$\leq 256,00$ [Mpa]		$\leq 221,34$ [Mpa]	
1	0	0	0,3740	Aceito	0,3740	Aceito
2	60.821	0,40	89,3410	Aceito	93,4600	Aceito
3	76.027	1,40	182,7000	Aceito	183,2800	Aceito
4	91.232	1,60	213,6200	Aceito	213,9400	Aceito
5	103.400	2,00	255,3100	Aceito	257,2200	Não-Aceito
6	117.840	2,72	328,4500	Não-Aceito	327,8500	Não-Aceito
7	129.250	3,00	361,6800	Não-Aceito	360,9900	Não-Aceito
8	145.970	3,50	417,3800	Não-Aceito	416,5400	Não-Aceito
9	152.050	4,20	478,9100	Não-Aceito	477,8200	Não-Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Bocal foi analisado na base. De acordo com a Figura 5.1⁴⁵ e Tabela 5.14⁴⁶, a tensão nesse ponto do componentes é Classificada como Tensão de Membrana Local (P_L), sendo a Tensão Equivalente Computada $S_e = P_L$, e portanto é avaliada pelo Limite Admissível S_{PL} .

Da análise da Tabela 11.3, temos que o **Bocal** do Filtro de Óleo Naval **atende** o requisito de Proteção Contra Colapso Plástico, apenas quando aplicado uma Pressão de Projeto **não-superior** a $P = 1,6$ [MPa], operando sob a Temperatura de Projeto $T = 60^\circ C$.

⁴⁵ Ver Figura 11.1

⁴⁶ Ver Figura B.1.

Tabela 11.4 – Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 03)

Avaliação Contra Falha por Colapso Plástico						
Tensão Classificada (SCL - 03) →			P_m ↓			
Condições de Carregamento (Tab. 5.3) ↓			Tensão Admissível (S) ↓			
$P + P_S + D$			$T = amb.$		$T = 60^\circ C$	
STEP (s)	Força de Compensação [N]	Pressão Interna [MPa]	$\leq 170,67$ [Mpa]		$\leq 147,56$, [Mpa]	
1	0	0	0,0423	Aceito	0,0423	Aceito
2	60.821	0,40	28,7670	Aceito	101,1400	Aceito
3	76.027	1,40	44,0840	Aceito	121,4700	Aceito
4	91.232	1,60	51,3340	Aceito	128,8200	Aceito
5	103.400	2,00	62,1590	Aceito	139,3300	Aceito
6	117.840	2,72	81,7210	Aceito	157,4600	Não-Aceito
7	129.250	3,00	90,0950	Aceito	165,7000	Não-Aceito
8	145.970	3,50	104,8000	Aceito	179,9100	Não-Aceito
9	152.050	4,20	125,1600	Aceito	198,0200	Não-Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Casco Cilíndrico foi analisado no topo, entre o bocal e região de transição Casco Cilíndrico-Casco Cônico, de acordo com o apresentada na figura 11.3 para a SCL-03. De acordo com a Figura 5.1⁴⁷ e Tabela 5.14⁴⁸, a tensão nesse ponto do componentes é Classificada como Tensão de Membrana Geral (P_m), sendo a Tensão Equivalente Computada $S_e = P_m$ e portanto é avaliada pelo Limite Admissível S .

Da análise da Tabela 11.4, temos que o **Casco Cilíndrico** do Filtro de Óleo Naval **atende** o requisito de Proteção Contra Colapso Plástico, apenas quando aplicado uma Pressão de Projeto **não-superior** a $P = 2,00$ [MPa], operando sob a Temperatura de Projeto $T = 60^\circ C$. Entretanto, Pressões superiores a $1,60$ [MPa], não podem ser utilizada pois causará falha por Colapso Plástico em outras regiões do Filtro de Óleo Naval.

⁴⁷ Ver Figura 11.1.

⁴⁸ Ver Figura B.1

Tabela 11.5 – Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha por Colapso Plástico - (SCL - 04)

Avaliação Contra Falha por Colapso Plástico						
Tensão Classificada (SCL - 04) →			P_L ↓			
Condições de Carregamento (Tab. 5.3) ↓			Tensão Admissível (S_{PL}) ↓			
$P + P_S + D$			$T = amb.$		$T = 60^\circ C$	
STEP (s)	Força de Compensação [N]	Pressão Interna [MPa]	$\leq 256,00$ [Mpa]		$\leq 221,34$ [Mpa]	
1	0	0	0,1467	Aceito	0,1496	Aceito
2	60.821	0,40	251,2400	Aceito	220,0800	Aceito
3	76.027	1,40	130,3600	Aceito	88,0140	Aceito
4	91.232	1,60	172,6100	Aceito	131,5300	Aceito
5	103.400	2,00	158,5600	Aceito	114,1200	Aceito
6	117.840	2,72	98,2540	Aceito	42,5250	Aceito
7	129.250	3,00	105,0100	Aceito	61,9790	Aceito
8	145.970	3,50	100,8400	Aceito	41,7090	Aceito
9	152.050	4,20	81,2290	Aceito	92,4310	Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

O Casco Cônico foi analisado na região próxima a GSD, entre o bocal e a região de transição Casco Cônico-Casco Cilíndrico-Flange, de acordo com o apresentada na figura 11.3 para a SCL-04. De acordo com a Figura 5.1⁴⁹ e Tabela 5.14⁵⁰, a tensão nesse ponto do componentes é Classificada como Tensão de Membrana Local (P_L), sendo a Tensão Equivalente Computada $S_e = P_L$ e portanto é avaliada pelo Limite Admissível S_{PL} .

Da análise da Tabela 11.5, temos que o **Casco Cônico** do Filtro de Óleo Naval **atende** o requisito de Proteção Contra Colapso Plástico, para qualquer Pressão de Projeto aplicada entre $0,40 \leq P \leq 4,20$ [MPa], operando sob a Temperatura de Projeto $T = 60^\circ C$. Entretanto, Pressões superiores a $1,60$ [MPa], não podem ser utilizada pois causará falha por Colapso Plástico nas demais regiões do Filtro de Óleo Naval.

Resultado 1. *O Filtro de Óleo Naval **atende ao requisito** Proteção Contra Colapso Plástico da Parte 5 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2 apenas para **Pressão de Projeto** $P \leq 1,60$ [MPa] sob **Temperatura de Projeto** $T = 60^\circ C$.*

O Apêndice B traz um gráfico onde mostra a Tensão Equivalente resultante do efeito das diferentes pressões em cada SCL analisada em comparação com a devida tensão admissível.

⁴⁹ Ver Figura 11.1

⁵⁰ Ver Figura B.1

11.6.2 Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Local

Em complemento a verificação para Proteção Contra Colapso Plástico, foi realizado a avaliação Contra Falha Local. Para cada SCL, foi aplicado o método da Análise Elástica do limite de tensão triaxial e comparado com relação a quatro vezes a Tensão Admissível ($4S$).

Dos valores da Tensão Admissível (S) determinado na Aplicação de Filtro de Óleo Naval 7.3, temos o limite para validação do Requisito de Proteção Contra Falha Local.

Tabela 11.6 – Tensões Admissíveis para Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Local

Tensões Admissíveis		
Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Local		
	$T = amb$	$T = 60^{\circ}C$
$4S$	682, 68 [MPa]	590, 24 [MPa]

Fonte: elaborado pelo Autor.

De acordo com as condições de carregamento da Tabela 5.3 da norma, temos que:

$$P_L + P_b \leq 4S \quad \text{ou} \quad P_m + P_b \leq 4S \quad (11.19)$$

Sendo assim, o Apêndice C traz um comparativo das tensões equivalente (na forma de gráfico e tabela) para cada valor de Pressão de Projeto analisado com o Limite Admissível para Proteção Contra Falha Local ($4S$), com $T = amb$:

Resultado 2. *O Filtro de Óleo Naval atende ao requisito Proteção Contra Falha Local da Parte 5 da ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2 para qualquer valor de Pressão de Projeto sob Temperatura de Projeto $T = 60^{\circ}C$.*

11.6.3 Avaliação do Requisito - Proteção Contra Flambagem

Considerando que:

- O Vaso é Horizontal;
- A pressão interna é maior ou igual a pressão externa e está sujeito apenas à pressão atmosférica ($\cong 103[MPa]$) externamente;
- Não está sujeito a carregamentos axiais consideráveis;

- Vaso de dimensões pequenas: comprimento máximo inferior a 1500 [mm]; altura máxima inferior a 600 [mm]; diâmetro do casco cilíndrico igual a 420 [mm];
- Não há longas tubulações apoiadas diretamente sobre o vaso;

Observação 11.23. *Dadas as condições consideradas, não é aplicável um modelo de flambagem.*

Resultado 3. *O Filtro de Óleo Naval atende ao requisito Proteção Contra Flambagem da Parte 5 da ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, uma vez que não está sujeito a carregamentos que possam provocar flambagem.*

11.6.4 Avaliação do Requisito - Proteção Contra Falha Devido a Cargas Cíclicas

Apesar de não haver dados fornecidos através do "User's Design Specification" acerca de cargas cíclicas, foi considerado que haverá paradas para manutenção, e com isso, variações no carregamento.

Considerando que:

- O Equipamento irá operar em valores discretos e estacionário de pressão;
- Durante a operação não há variações relevantes nas Condições de Carregamento;
- Não há pontos de calor, ou gradientes de temperatura relevantes no equipamento;
- Variações de cargas ocorrem apenas quando há paradas para manutenção;
- As cargas variam entre valores fixos de pressão de projeto e zero;

Tabela 11.7 – Avaliação Cargas Cíclicas - Histograma de Cargas

Histograma de Cargas - Pressão e Temperatura				
Situação	CC - Vale		CC - Pico	
	Pressão [MPa]	Temperatura [°C]	Pressão [MPa]	Temperatura [°C]
1	0,00	25	0,40	60
2	0,00	25	1,40	60
3	0,00	25	1,60	60
4	0,00	25	2,00	60

Fonte: elaborado pelo Autor.

Dos resultados obtidos com a tensão linearizada avaliado no modelo numérico via Ansys Workbench com carga térmica à ($T = 60^{\circ}C$), utiliza-se o valor **Total**⁵¹ da tensão linearizada para determinar a Variação da Tensão Equivalente Primária mais Secundária ($\Delta S_{n,k}$).

Da coluna **Total** das tabelas 10.5, 10.6, 10.7, 10.5, aplicando na equação 11.8 nas situações da tabela 11.7, obtemos a **Variação da Tensão Equivalente Efetiva** ($\Delta S_{p,k}$).

Como os efeitos de solda e entalhe foram computados no modelo CAD, de acordo com o Trecho da Norma 11.5, $K_f = 1,00$.

Dado que $\Delta S_{n,k} \leq S_{PS}$ ⁵², o Fator de Penalidade à Fadiga, $K_{e,k} = 1,00$.

Com isso, foi possível determinar a **Tensão Equivalente Alternada Efetiva** ($S_{alt,k}$) para cada situação da tabela 11.7 nas 4 SCLs.

Observação 11.24.

Determinou-se o Número Ciclos Admissível⁵³ (N_k) a partir das equações 11.10 até 11.13.

Tabela 11.8 – Avaliação do requisito - Análise de Fadiga

Situação	P [MPa]	Número de Ciclos Admissíveis (N_k^X)			
		SCL - 01	SCL - 02	SCL - 03	SCL - 04
1	0,40	$10^{7,74}$	<i>Vida Inf.</i>	<i>Vida Inf.</i>	$10^{5,21}$
2	1,40	<i>Vida Inf.</i>	$10^{6,24}$	<i>Vida Inf.</i>	$10^{6,17}$
3	1,60	<i>Vida Inf.</i>	$10^{5,93}$	<i>Vida Inf.</i>	$10^{5,60}$
4	2,00	<i>Vida Inf.</i>	$10^{5,70}$	<i>Vida Inf.</i>	$10^{5,70}$

Fonte: elaborado pelo Autor.

Como não foi estabelecido um número de ciclo nas especificações do projeto, o resulta indica que deve-se atentar a $n \leq N_k$, tendo como referência a SCL-04, uma vez que apresentou o menor número de ciclos.

Também foi avaliado a possibilidade do componentes sofrer "*Ratcheting*". O componente está dentro dos requisitos quando $\Delta S_{n,k} \leq S_{PS}$.

⁵¹ Ver Aplicação de Filtro Naval 10.2.1.

⁵² Ver Observação 11.18.

⁵³ O resultados dos cálculos podem ser observados no Apêndice D

Tabela 11.9 – Resultados - Avaliação Para Proteção Contra "Ratcheting"

Proteção Contra "Ratcheting"					
$S_{PS} = 3S = 442,68 [MPa]$					
Situação	$P [MPa]$	SCL - 01	SCL - 02	SCL - 03	SCL - 04
		$\Delta S_{n,k} [MPa]$	$\Delta S_{n,k} [MPa]$	$\Delta S_{n,k} [MPa]$	$\Delta S_{n,k} [MPa]$
1	0,40	80,79	169,69	126,34	80,78
2	1,40	152,29	259,71	134,06	152,29
3	1,60	173,92	296,10	143,41	173,92
4	2,00	208,21	341,13	151,49	208,21

Fonte: elaborado pelo Autor.

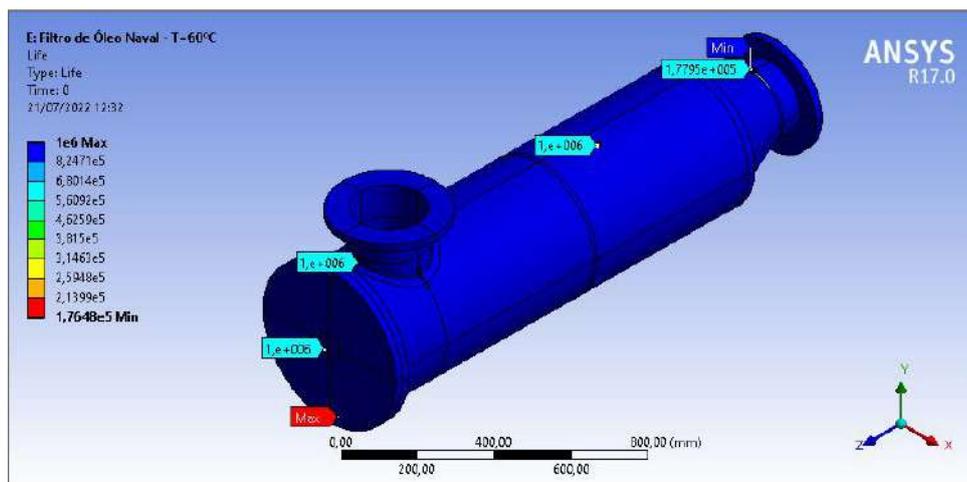
Resultado 4. O Filtro de Óleo Naval *atende ao requisito* para Proteção Contra Cargas Cíclicas da Parte 5 da ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, operando sob uma **Pressão de Projeto**, $P = 1,60 [MPa]$, e sob **Temperatura de Projeto**, $T = 60^{\circ}C$, e não atinja um ciclo de operação⁵⁴ $n \leq N_k = 10^{5,21}$; O componentes não apresenta risco de sofrer o fenômeno de "Ratcheting".

No Apêndice D pode ser visto o resultados para a avaliação contra cargas cíclicas com valores das demais pressões.

Observação 11.25. A figura 11.4 apresenta o resultado de vida da Análise de Fadiga realizado no Ansys Mechanical. Pode-se observar que o resultado do tempo de vida, observado à $P = 0,4 [MPa]$, é semelhante ao obtido pelo método fornecido pelo norma da ASME.

Observação 11.26. Na figura 11.4, na região da SCL-04, obteve-se um valor de $N_k = 176.480,00$ ciclos para uma pressão de projeto $P = 0,4 [MPa]$. Quando comparamos a análise ANSYS com o valor obtido pela norma na Tabela 11.8, onde $N_k = 162.181,10$ ciclos, diferença de $\cong 8,82\%$ entre os resultados.

⁵⁴ A análise na SCL-04 apresentou os menores números de ciclos admissíveis, portando deve ser a referência.

Figura 11.4 – Resultado da Análise de Fadiga pelo ANSYS Mechanical - *Static Structural*

Fonte: elaborado pelo autor.

12 CONCLUSÃO

Ao utilizar a ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, Parte 5 (Análise por Requisito), tomando por bases os métodos sustentado na Teoria da Tensão Elástica, é necessário entender que se trata de metodologia conservadora e aproximada. Outro fator importante, é que a interpretação da norma exige um bom conhecimento tanto da própria norma, como dos conceitos de Vasos de Pressão.

O Filtro de Óleo Naval foi avaliado segundo a Secção VIII - Div. 2 para proteção contra falha em quatro requisitos: Colapso Plástico, Falha Local, Flambagem e Cargas Cíclicas.

De acordo com o analisado nesse manual, o Filtro de Óleo Naval está **apto** a operar em segurança e em conformidade com os requisitos para uma Pressão de Projeto de até $P = 1,60 \text{ [MPa]}$ e Temperatura de Projeto $T = 60^\circ\text{C}$.

Considerando efeitos de carregamento cíclicos a partir de paradas totais no equipamento, o mesmo está apto operar até um ciclo de $n_k = 10^{21}$ *ciclos*.

Para a Pressão de Projeto especificada de $P = 1,6 \text{ [MPa]}$, operando a Temperatura de Projeto de $T = 60^\circ\text{C}$ o Filtro de Óleo Naval avaliado Segundo os requisitos da norma ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2:

- **Colapso Plástico:** não irá falhar pois o maior valor de Tensão Equivalente encontrado foi na SCL-02, de magnitude $S_e = 213,94$, inferior ao valor da Tensão Admissível ($S_{PL} = 221,34 \text{ [MPa]}$);
- **Falha Local:** não irá falhar pois o maior valor de Tensão Equivalente encontrado foi na SCL-02, de magnitude $S_e = 296,79$, inferior ao valor da Tensão Admissível ($4S = 590,24 \text{ [MPa]}$);
- **Flambagem:** não irá falhar pois o Filtro não está sujeito a carregamentos que possam leva-lo a sofrer flambagem;
- **Cargas cíclicas:** não irá falhar caso opere com um número de ciclos inferior a $n_k = 10^{21} = 162.181,01$ *ciclos*, tendo um Número de Ciclos Admissível de menor magnitude na região da SCL-04, operando a $P = 0,4 \text{ [MPa]}$.
- **"Ractching":** o vaso não corre risco de falha por trincas provocadas pelo fenômeno de "Ractching" em nenhuma das situações testadas.

Portanto, conclui-se também que esse manual irá auxiliar o leitor a compreender as bases teóricas para utilização da norma, através de um exemplo prático da sua aplicação, de forma que consiga desenvolver e aplicar a ASME BPVC Seção VIII - Divisão 2, Parte 5 em problemas semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ALUTAL. **Torres de Destilação**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.alutal.com.br/br/industrias-e-aplicacoes/quimica/torres-de-destilacao>>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- Annaratone, D. **Pressure Vessel Design**. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 9783540491446.
- ANSYS. **ANSYS Documentation: Mechanical user's guide**. [S.l.], 2015.
- Ansys. **What is Ansys Workbench**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.ansys.com/en-in/products/ansys-workbench>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **History of ASME Standards**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/history-of-asme-standards>>. Acesso em: 16 abr. 2022.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Standards and Certification Chronology**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/history-of-asme-standards/codes-and-standards-chronology>>. Acesso em: 17 abr. 2022.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section II, Materials Part A, Ferrous Materials Specifications**. [S.l.]: ASME, 2021. ISBN 9780791874035.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section II, Materials Part D, Properties-Metric**. [S.l.]: ASME, 2021. ISBN 9780791874080.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels: Division 2 - Alternative Rules**. [S.l.]: ASME, 2021. ISBN 9780791874240.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1**. [S.l.]: ASME, 2021. ISBN 9780791874233.
- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 3 - Rules for Construction of High Pressure Vessels**. [S.l.]: ASME, 2021. ISBN 9780791874257.
- Bickell, M.; Ruiz, C. **Pressure Vessel Design and Analysis**. Macmillan Education UK, 1967. ISBN 9781349001293.
- Budynas, R.; Nisbeth, J. **Elementos de Máquinas de Shigley - 10 ed**. McGraw Hill Brasil, 2016. ISBN 9788580555554.
- Burgos, D.; Vejar, M.; Pozo, F. **Pattern Recognition Applications in Engineering**. IGI Global, 2019. (Advances in Computer and Electrical Engineering). ISBN 9781799818410.

CBIE. CENTRO BRASILEIRO DE INFRA ESTRUTURA. **COMO FUNCIONA O MERCADO GLOBAL DE GNL?** [S.l.], 2019. Disponível em: <<http://cbie.com.br/wp-content/uploads/2019/07/vc-sabia-img-2-1.png>>. Acesso em: 08 jun. 2022.

CNI. CN Co. **Product:** Spherical tank. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://i2.wp.com/cnipvc.com/wp-content/uploads/2019/05/1.jpg?resize=800%2C400&ssl=1>>. Acesso em: 09 jun. 2022.

Corrosionpedia. **Handhole:** What does handhole mean? [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.corrosionpedia.com/definition/615/handhole>>. Acesso em: 20 fev. 2022.

DeWolf, J.; Mazurek, D.; P. Beer, F.; Johnston JR., E. **Mecânica dos Materiais - 8.ed.** McGraw Hill Brasil, 2021. ISBN 9786558040095.

ESSS. Engineering Simulation and Scientific Software. **ANÁLISE DE LIGAÇÕES PARAFUSADAS NO ANSYS MECHANICAL.** [S.l.]: ESSS, 201-. ISBN 9780791874080.

Farr J.R. e Jawad, M. **Guidebook for the Design of ASME Section VIII Pressure Vessels.** [S.l.]: ASME, 2010. ISBN 9780791859520.

GASWIDE. **Linha Ar Respirável:** Alumínio. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.gaswide.com/img/linha-ar-respiravel-aluminio.png>>. Acesso em: 09 jun. 2022.

Groover, M.; Zimmers, E. **CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing.** [S.l.]: Pearson Education, 1984. ISBN 9780132440813.

Horner, J.; Abbey, S. **Dictionary of Terms Used in the Theory and Practice of Mechanical Engineering: Originally Compiled by J.G. Horner.** Technical Press, 1960.

HURST BOILER. **Hurst Series 200.** [S.l.], 2011. Disponível em: <https://www.hurstboiler.com/boilers/scotch_marine/series_200>. Acesso em: 09 jun. 2022.

Lee, H.-H. **Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021.** [S.l.]: SDC Publications, 2021.

Lee, K. **Principles of CAD/CAM/CAE Systems.** [S.l.]: Addison-Wesley, 1999. ISBN 9780130258694.

Oliveira Marques, H. de. **Dicionário técnico ilustrado inglês-português.** Sociedade Editora Publitécnica, 1959.

Matthews, C. **Engineers' Guide to Pressure Equipment: The Pocket Reference.** Wiley, 2000. ISBN 9781860582981.

Sarkar, J. **Computer Aided Design: A Conceptual Approach.** Taylor & Francis, 2014. ISBN 9781482208795.

Silva Telles, P. da. **Vasos de Pressão.** LTC, 1996. ISBN 9788521612940.

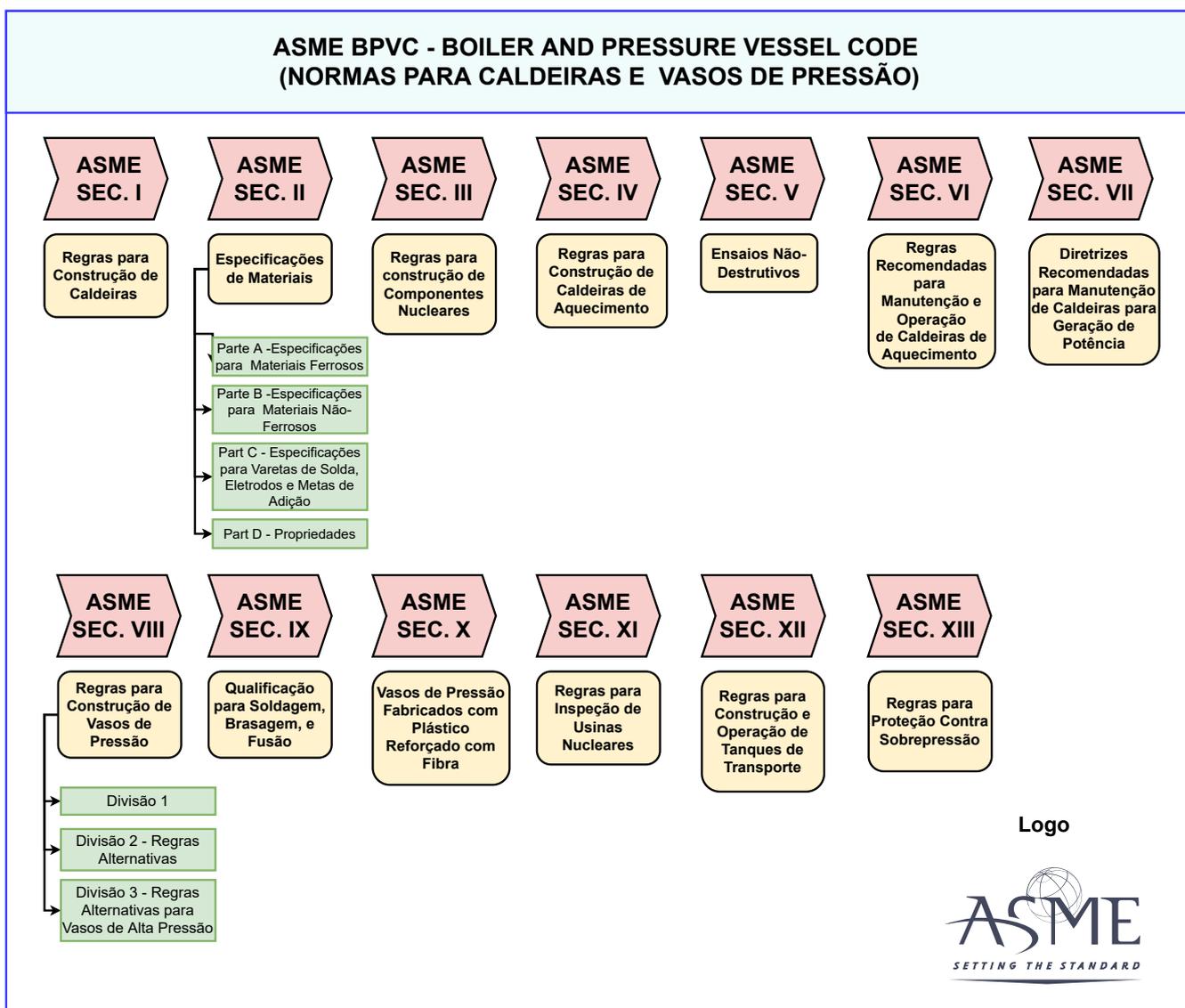
Ugural, A. **Mecânica Dos Materiais.** Grupo Gen - LTC, 2015. ISBN 9788521625483.

Ultraz. **GLP industrial:** Ultraz oferece soluções sob medida. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://ultrazempresas.com.br/wp-content/uploads/2019/11/img-solu%C3%A7%C3%B5es-sob-medida-ind%C3%BAstria.png>>. Acesso em: 08 jun. 2022.

Apêndices

APÊNDICE A – BPVC - SECÇÕES DO CÓDIGO ASME PARA VASOS DE PRESSÃO E CALDEIRAS

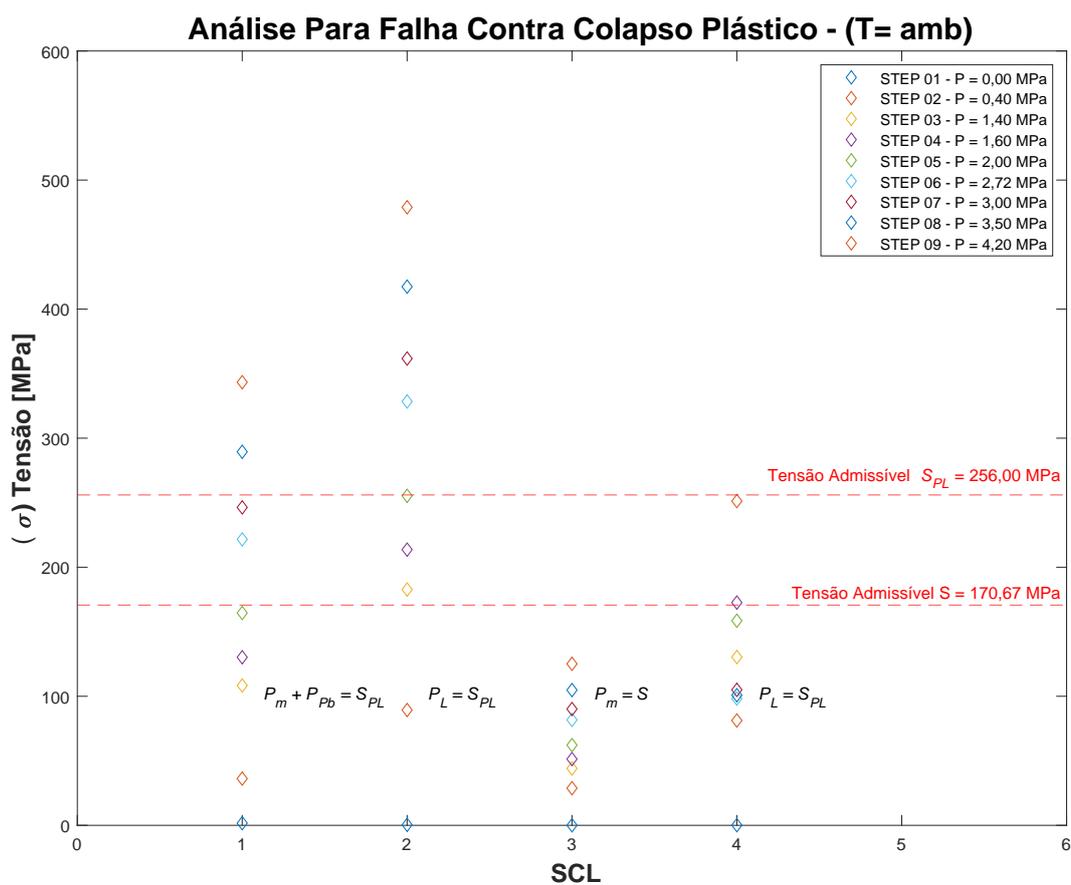
Figura A.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local



Fonte: elaborado pelo autor.

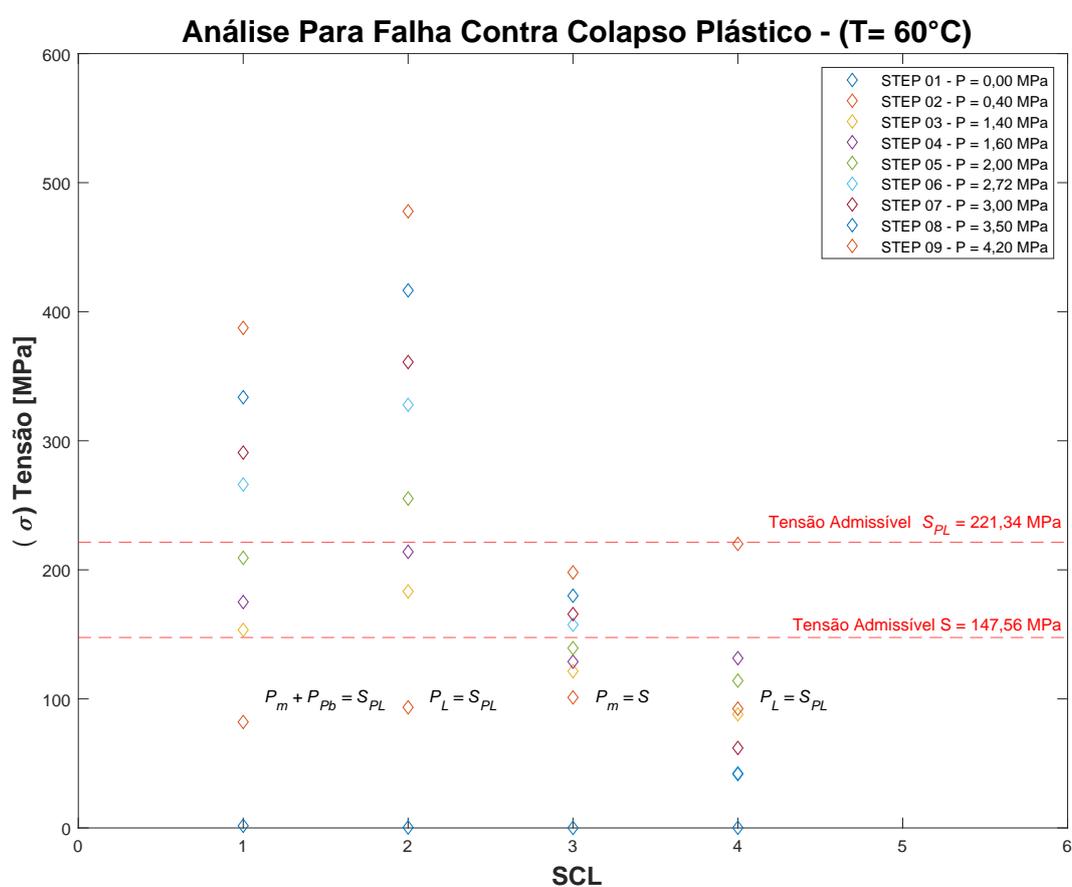
APÊNDICE B – RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO - PROTEÇÃO CONTRA COLAPSO PLÁSTICO

Figura B.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Colapso Plástico



Fonte: elaborado pelo autor.

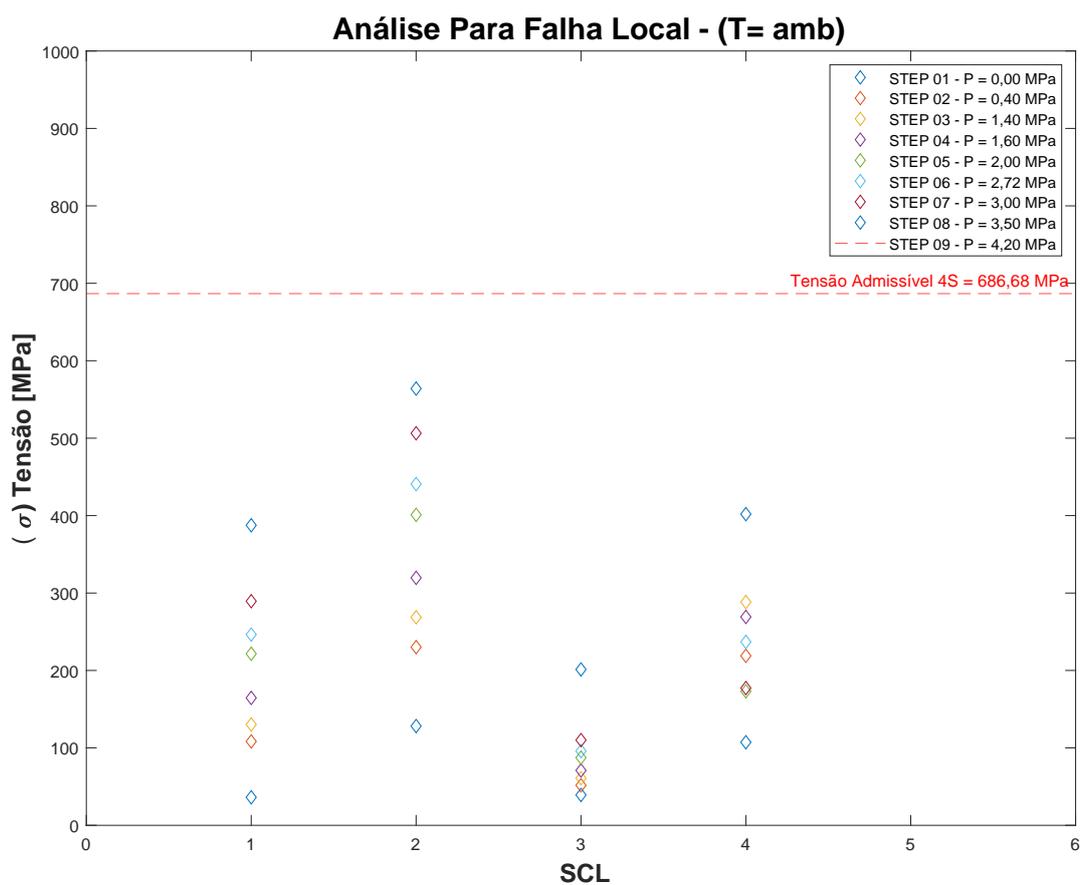
Figura B.2 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Colapso Plástico



Fonte: elaborado pelo autor.

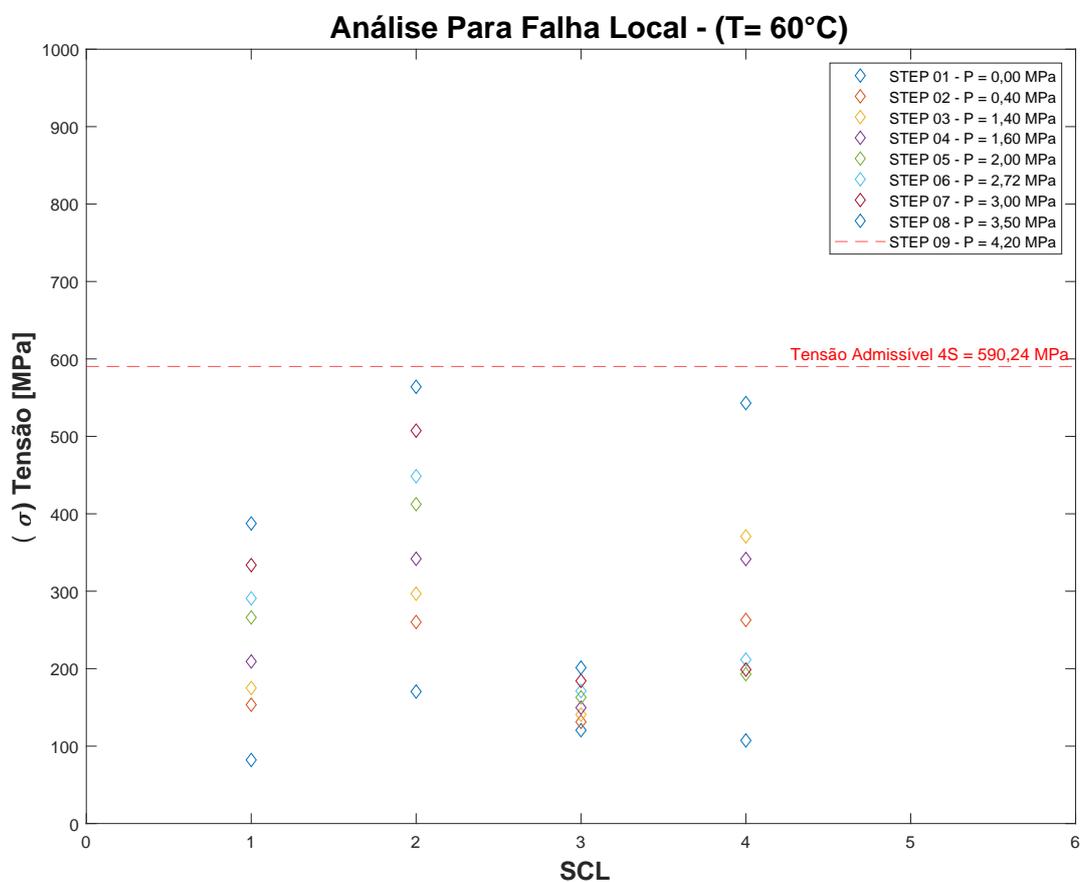
APÊNDICE C – RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO - PROTEÇÃO FALHA LOCAL

Figura C.1 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura C.2 – Gráfico com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela C.1 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local- SCL-01

Avaliação Contra Falha Local				
(SCL) - 01				
[TensoAdmissvel(4S\$)]				
	$T = amb.$		$T = 60 \text{ } ^\circ C$	
STEP (s)	$\leq 686,68 [Mpa]$		$\leq 590,24 [Mpa]$	
1	1,6735	Aceito	1,6735	Aceito
2	36,2060	Aceito	82,1020	Aceito
3	108,3500	Aceito	153,4300	Aceito
4	130,2200	Aceito	175,0300	Aceito
5	164,5500	Aceito	209,2700	Aceito
6	221,5500	Aceito	266,1300	Aceito
7	246,3500	Aceito	290,8300	Aceito
8	289,4400	Aceito	333,7200	Aceito
9	343,3500	Aceito	387,5000	Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela C.2 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-02

Avaliação Contra Falha Local				
(SCL) - 02				
[TensoAdmissvel(4S\$)]				
	$T = amb.$		$T = 60 \circ C$	
STEP (s)	$\leq 686,68 [Mpa]$		$\leq 590,24 [Mpa]$	
1	1,2921	Aceito	1,2921	Aceito
2	128,2100	Aceito	170,4100	Aceito
3	230,1500	Aceito	260,2500	Aceito
4	268,7400	Aceito	296,7900	Aceito
5	319,6000	Aceito	341,8900	Aceito
6	400,9800	Aceito	412,3700	Aceito
7	440,6700	Aceito	448,5100	Aceito
8	506,3200	Aceito	507,3700	Aceito
9	574,6700	Aceito	564,0100	Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela C.3 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-03

Avaliação Contra Falha Local				
(SCL) - 03				
[TensoAdmissvel(4S\$)]				
	$T = amb.$		$T = 60 \circ C$	
STEP (s)	$\leq 686,68 [Mpa]$		$\leq 590,24 [Mpa]$	
1	0,0438	Aceito	0,0438	Aceito
2	039,2230	Aceito	120,5100	Aceito
3	51,7290	Aceito	131,3300	Aceito
4	60,8260	Aceito	140,7000	Aceito
5	70,8700	Aceito	149,5900	Aceito
6	87,3830	Aceito	162,9800	Aceito
7	95,9020	Aceito	171,1500	Aceito
8	110,0700	Aceito	184,2500	Aceito
9	126,5400	Aceito	201,3200	Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela C.4 – Tabela com Resultados da Análise - Proteção Contra Falha Local - SCL-04

Avaliação Contra Falha Local				
(SCL) - 04				
Tensão Admissível (4S)				
	$T = amb.$		$T = 60 \circ C$	
STEP (s)	$\leq 686,68 [Mpa]$		$\leq 590,24 [Mpa]$	
1	0,2097	Aceito	0,0438	Aceito
2	401,8700	Aceito	120,5100	Aceito
3	218,9100	Aceito	131,3300	Aceito
4	288,3700	Aceito	140,7000	Aceito
5	269,1000	Aceito	149,5900	Aceito
6	173,1100	Aceito	162,9800	Aceito
7	236,8600	Aceito	171,1500	Aceito
8	177,2600	Aceito	184,2500	Aceito
9	84,5740	Aceito	201,3200	Aceito

Fonte: elaborado pelo Autor.

APÊNDICE D – RESULTADOS DA ANÁLISE DO REQUISITO – PROTEÇÃO CONTRA CARGAS CÍCLICAS

Tabela D.1 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 01

Memorial de Cálculo - Análise de Fadiga (SCL-03)											
Situação	$\Delta S_{n,k}$ [MPa]	$\Delta S_{p,k}$ [MPa]	$S_{alt,k}$ [MPa]	S_a [MPa]	$S_{alt,k}$ [ksi]	S_a [ksi]	$103 [Mpa] (15 [ksi]) \leq S_a \leq 4881 [MPa] (708 [ksi])$				
							Y	Y ¹⁰	X (10 ^Y < 35, 9)	X (10 ^Y ≥ 35, 9)	N _k ^X Ciclos
	1,6738										
1	80,7870	79,1132	39,5566	40,1747	5,7372	5,8268					
2	152,2900	150,6162	75,3081	76,4848	10,9225	11,0932					
3	173,9200	172,2462	86,1231	87,4688	12,4911	12,6863					
4	208,2100	206,5362	103,2681	104,8817	14,9778	15,2118	1,1822	15,2118	7,7418	8,3421	5,52E+07
*	265,1500	263,4762	131,7381	133,7965	19,1070	19,4055	1,2879	19,4055	6,1890	7,2717	1,55E+06
*	289,8700	288,1962	144,0981	146,3496	20,8997	21,2262	1,3269	21,2262	5,9788	6,9277	9,52E+05
*	332,7900	331,1162	165,5581	168,1449	24,0122	24,3874	1,3872	24,3874	5,7408	6,4391	5,50E+05
*	386,6100	384,9362	192,4681	195,4754	27,9151	28,3513	1,4526	28,3513	5,5443	5,9610	3,50E+05

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela D.2 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 02

Memorial de Cálculo - Análise de Fadiga (SCL-02)											
Situação	$\Delta S_{n,k}$ [MPa]	$\Delta S_{p,k}$ [MPa]	$S_{alt,k}$ [MPa]	S_a [MPa]	$S_{alt,k}$ [ksi]	S_a [ksi]	$103 [Mpa] (15 [ksi]) \leq S_a \leq 4881 [MPa] (708 [ksi])$				
							Y	Y ¹⁰	X (10 ^Y < 35, 9)	X (10 ^Y ≥ 35, 9)	N _k ^X Ciclos
	1,3000										
1	169,6900	168,3900	84,1950	85,5105	12,2115	12,4023					
2	259,7100	258,4100	129,2050	131,2238	18,7396	19,0324	1,2795	19,0324	6,2443	7,3494	1,75E+06
3	296,1000	294,8000	147,4000	149,7031	21,3786	21,7126	1,3367	21,7126	5,9343	6,8445	8,60E+05
4	341,1300	339,8300	169,9150	172,5699	24,6441	25,0292	1,3984	25,0292	5,7034	6,3530	5,05E+05
*	411,5700	410,2700	205,1350	208,3402	29,7523	30,2172	1,4803	30,2172	5,4727	5,7729	2,97E+05
*	447,5900	446,2900	223,1450	226,6316	32,3644	32,8701	1,5168	32,8701	5,3855	5,5361	2,43E+05
*	506,3100	505,0100	252,5050	256,4504	36,6228	37,1950	1,5705	37,1950	5,2691	5,2103	1,62E+05
*	562,9600	561,6600	280,8300	285,2180	40,7309	41,3674	1,6167	41,3674	5,1774	4,9488	8,89E+04

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela D.3 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 03

Memorial de Cálculo - Análise de Fadiga (SCL-03)											
Situação	$\Delta S_{n,k}$ [MPa]	$\Delta S_{p,k}$ [MPa]	$S_{alt,k}$ [MPa]	S_a [MPa]	$S_{alt,k}$ [ksi]	S_a [ksi]	$103 [Mpa] (15 [ksi]) \leq S_a \leq 4881 [MPa] (708 [ksi])$				
							Y	Y ¹⁰	X (10 ^Y < 35, 9)	X (10 ^Y ≥ 35, 9)	N _k ^X Ciclos
	0,0438										
1	126,3400	126,2962	63,1481	64,1348	9,1589	9,3020					
2	134,0600	134,0162	67,0081	68,0551	9,7187	9,8706					
3	143,4100	143,3662	71,6831	72,8032	10,3968	10,5592					
4	151,4900	151,4462	75,7231	76,9063	10,9827	11,1543					
*	163,2500	163,2062	81,6031	82,8782	11,8355	12,0205					
*	171,1300	171,0862	85,5431	86,8797	12,4070	12,6008					
*	183,6200	183,5762	91,7881	93,2223	13,3127	13,5208					
*	201,4100	201,3662	100,6831	102,2563	14,6028	14,8310					

Fonte: elaborado pelo Autor.

Tabela D.4 – Tabela com Resultados da Análise de Fadiga - SCL - 04

Memorial de Cálculo - Análise de Fadiga (SCL-04)											
Situação	$\Delta S_{n,k}$ [MPa]	$\Delta S_{p,k}$ [MPa]	$S_{alt,k}$ [MPa]	S_a [MPa]	$S_{alt,k}$ [ksi]	S_a [ksi]	103 [MPa] (15 [ksi]) $\leq S_a \leq 4881$ [MPa] (708 [ksi])				
							Y	Y ¹⁰	X ($10^Y < 35,9$)	X ($10^Y \geq 35,9$)	N _k ^X Ciclos
	0,3122										
1	539,3000	538,9878	269,4939	273,7047	39,0868	39,6975	1,5988	39,6975	5,2121	5,0482	1,12E+05
2	265,4400	265,1278	132,5639	134,6352	19,2268	19,5272	1,2906	19,5272	6,1721	7,2469	1,49E+06
3	370,5700	370,2578	185,1289	188,0215	26,8507	27,2702	1,4357	27,2702	5,5909	6,0797	3,90E+05
4	341,7600	341,4478	170,7239	173,3915	24,7614	25,1483	1,4005	25,1483	5,6968	6,3374	4,97E+05
*	195,2900	194,9778	97,4889	99,0122	14,1396	14,3605	1,1572	14,3605	9,3813	8,6300	2,41E+09
*	213,4900	213,1778	106,5889	108,2544	15,4594	15,7010	1,1959	15,7010	7,3125	8,1901	2,05E+07
*	200,1200	199,8078	99,9039	101,4649	14,4898	14,7162	1,1678	14,7162	8,4627	8,5058	2,90E+08
*	105,9000	105,5878	52,7939	53,6188	7,6571	7,7768	0,8908	7,7768	5,6834	13,0219	4,82E+05

Fonte: elaborado pelo Autor.

Anexos

ANEXO A – TABELAS ASME BPVC SECÇÃO II - PARTE D -
TABELA DE TENSÃO ADMISSÍVEL (S) (S)

Figura A.1 – Tabela 2A Tensão Admissível Máxima para Vasos de Pressão pela Secção VIII, Divisão 2, em vasos de Classe 1.

ASME BPVC.II.D.M-2021										
(21) Table 2A Section III, Division 1, Classes 1, MC, and CS; Section III, Division 3; and Section III, Division 5 Design Stress Intensity Values, S_m , and Section VIII, Division 2, Class 1 Maximum Allowable Stress Values, S , for Ferrous Materials										
Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/ Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/ Thickness, mm	P-No.	Group No.	
1	Carbon steel	Bar, shapes	SA-675	45	...	...	...	1	1	
2	Carbon steel	Plate	SA-285	A	K01700	...	...	1	1	
3	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	A45	K01700	...	...	1	1	
4	Carbon steel	Wld. pipe	SA-53	E/A	K02504	...	...	1	1	
5	Carbon steel	Smls. pipe	SA-53	S/A	K02504	...	...	1	1	
6	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	A	K02501	...	...	1	1	
7	Carbon steel	Bar, shapes	SA-675	50	...	...	...	1	1	
8	Carbon steel	Plate	SA-283	B	...	...	...	1	1	
9	Carbon steel	Plate	SA-285	B	K02200	...	≤50	1	1	
10	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	A50	K02200	...	...	1	1	

ASME BPVC.II.D.M-2021										
(21) Table 2A Section III, Division 1, Classes 1, MC, and CS; Section III, Division 3; and Section III, Division 5 Design Stress Intensity Values, S_m , and Section VIII, Division 2, Class 1 Maximum Allowable Stress Values, S , for Ferrous Materials										
Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)		External Pressure Chart No.	Notes				
			III	VIII-2						
1	310	155	NP	371	CS-6	...				
2	310	165	371	371	CS-1	...				
3	310	165	371	NP	CS-1	G1, G4				
4	330	205	371 (SPT)	NP	CS-2	E2				
5	330	205	371 (SPT)	NP	CS-2	E2				
6	330	205	371	371	CS-2	E2				
7	345	170	371 (SPT)	371	CS-1	...				
8	345	185	NP	371	CS-1	E2				
9	345	185	371	371	CS-1	E2				
10	345	185	371	NP	CS-1	E2, G1, G4				

ASME BPVC.II.D.M-2021																
(21) Table 2A Section III, Division 1, Classes 1, MC, and CS; Section III, Division 3; and Section III, Division 5 Design Stress Intensity Values, S_m , and Section VIII, Division 2, Class 1 Maximum Allowable Stress Values, S , for Ferrous Materials																
Line No.	Design Stress Intensity or 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	500
1	103	97.3	94.1	92.8	91.6	88.6	84.9	80.7	78.4	75.9	73.4	...	...	...	...	...
2	103	103	101	99.4	97.8	94.8	90.5	86.2	83.9	81.4	78.9	...	...	...	...	...
3	103	103	101	99.4	97.8	94.8	90.5	86.2	83.9	81.4	78.9	...	...	...	...	...
4	110	110	110	110	110	110	110	108	104	100	99.1	...	...	...	...	...
5	110	110	110	110	110	110	110	108	104	100	99.1	...	...	...	...	...
6	110	110	110	110	110	110	110	108	104	100	99.1	...	...	...	...	...
7	115	110	105	103	101	98.2	94.6	89.8	87.4	84.7	81.6	...	...	...	...	...
8	115	115	113	112	110	106	102	97.1	93.9	91.1	89.4	...	...	...	...	...
9	115	115	113	112	110	106	102	97.1	93.9	91.1	89.4	...	...	...	...	...
10	115	115	113	112	110	106	102	97.1	93.9	91.1	89.4	...	...	...	...	...

Fonte: ASME, 2021b, p.298 (com adaptações).

ANEXO B – TABELAS 5.6 DA ASME BPVC SECÇÃO II - DIVISÃO 2 - EXEMPLO DE CLASSIFICAÇÃO DE TENSÃO

Figura B.1 – Tabela 5.6 - Exemplo de Classificação das Tensões Primárias

Tabela 5.6 Exemplos de Classificação de Tensão				
Componentes do Vaso	Localização	Origem da Tensão	Tipo de Tensão	Classificação
Qualquer casco incluindo cilindros, cones, esferas e tampos conformados	* Casco construído com chapas em regiões longes de descontinuidades *	Pressão Interna *	Membrana Geral *	P_m *
			Membrana	Q
		Gradiente térmico axial	Flexão	
	Perto de bocais ou outras aberturas *	Força axial na secção líquida e/ou momento de flexão aplicado ao bocal e/ou pressão interna *	Membrana Local *	P_L *
			Flexão	Q
			Pico (filetes ou cantos)	F
	Qualquer Localização	Diferença de temperatura entre casco e tampo	Membrana	Q
			Flexão	
	Distorções do casco, tais como deformações e entalhes	Pressão Interna	Membrana	P_m
			Flexão	Q
Cascos cilíndricos ou cónicos *	Qualquer secção ao longo do vaso *	Força axial na secção líquida e/ou momento de flexão aplicado ao cilindro ou cone, e/ou pressão interna *	Tensão de membrana média através da espessura, longe de descontinuidade; Componentes perpendicular da tensão para secção transversal *	P_m *
			Tensão de flexão através da espessura; Componentes perpendicular da tensão para secção transversal	P_b
	Junções com tampos ou flanges *	Pressão Interna *	Membrana *	P_L *
Flexão			Q	
Tampos de fechamento planos ("Flat head") *	Região Central *	Pressão Interna *	Membrana *	P_m *
			Flexão *	P_b *
	Junção com o casco	Pressão Interna	Membrana	P_L
			Flexão	Q
Bocais [NOTA (1)] *	Parede do bocal *	Descontinuidades Estrutural Abruptas *	Membrana *	P_L *
			Flexão	Q
			Pico	F

Nota (1). Ver ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2, 5.6, p.598. 2021.

Fonte: Adaptado da Tabela 5.6, p.611 (ASME, 2021c).

Legenda: * indicam o caminho utilizado para classificação e determinação do tipo de tensão.

ANEXO C – TABELAS ASME BPVC SECÇÃO VIII - DIVISÃO 2 - AVALIAÇÃO PARA PROTEÇÃO CONTRA FALHA POR CARGAS CÍCLICAS

Figura C.1 – Tabela 5.11 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2

		Quality Levels (See Table 5.12)						
		1	2	3	4	5	6	7
Weld Condition	Surface Condition							
Full penetration	Machined	1.0	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
	As-welded	1.2	1.6	1.7	2.0	2.5	3.0	4.0
Partial penetration	Final surface machined	NA	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
	Final surface as-welded	NA	1.6	1.7	2.0	2.5	3.0	4.0
	Root	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4.0
Fillet	Toe machined	NA	NA	1.5	NA	2.5	3.0	4.0
	Toe as-welded	NA	NA	1.7	NA	2.5	3.0	4.0
	Root	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4.0

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura C.2 – Tabela 5.12 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2

Table 5.12 Weld Surface Fatigue-Strength-Reduction Factors		
Fatigue-Strength-Reduction Factor	Quality Level	Definition
1.0	1	Machined or ground weld that receives a full volumetric examination, and a surface that receives MT/PT examination and a VT examination
1.2	1	As-welded weld that receives a full volumetric examination, and a surface that receives MT/PT and VT examination
1.5	2	Machined or ground weld that receives a partial volumetric examination, and a surface that receives MT/PT examination and VT examination
1.6	2	As-welded weld that receives a partial volumetric examination, and a surface that receives MT/PT and VT examination
1.5	3	Machined or ground weld surface that receives MT/PT examination and a VT examination (visual), but the weld receives no volumetric examination inspection
1.7	3	As-welded surface that receives MT/PT examination and a VT examination (visual), but the weld receives no volumetric examination inspection
2.0	4	Weld has received a partial or full volumetric examination, and the surface has received VT examination, but no MT/PT examination
2.5	5	VT examination only of the surface; no volumetric examination nor MT/PT examination
3.0	6	Volumetric examination only
4.0	7	Weld backsides that are nondefinable and/or receive no examination

GENERAL NOTES:
 (a) Volumetric examination is RT or UT in accordance with Part 7.
 (b) MT/PT examination is magnetic particle or liquid penetrant examination in accordance with Part 7.
 (c) VT examination is visual examination in accordance with Part 7.
 (d) See WRC Bulletin 432 for further information.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura C.3 – Tabela 5.13 da ASME BPVC Secção VIII - Divisão 2

Table 5.13				
Fatigue Penalty Factors for Fatigue Analysis				
Material	K_e [Note (1)]		T_{max} [Note (2)]	
	m	n	°C	°F
Low alloy steel	2.0	0.2	371	700
Martensitic stainless steel	2.0	0.2	371	700
Carbon steel	3.0	0.2	371	700
Austenitic stainless steel	1.7	0.3	427	800
Nickel-chromium-iron	1.7	0.3	427	800
Nickel-copper	1.7	0.3	427	800

NOTES:

(1) Fatigue penalty factor.

(2) The fatigue penalty factor should be used only if all of the following are satisfied:

- The component is not subject to thermal ratcheting.
- The maximum temperature in the cycle is within the value in the table for the material.

Fonte: elaborado pelo autor.