

UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

RODRIGO PEREIRA DA SILVA
WILLIAN SOARES PEIXOTO

INSPEÇÃO EM VASO DE PRESSÃO NR-13

Rio de Janeiro

2019.2

RODRIGO PEREIRA DA SILVA
WILLIAN SOARES PEIXOTO

INSPEÇÃO EM VASO DE PRESSÃO NR-13

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO
À UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ COMO REQUISITO
PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA. ORIENTADOR (A):
PROFESSOR Me. MÁRIO BITTENCOURT QUIRINO DE
ALMEIDA.

Rio de Janeiro
2019.2

RODRIGO PEREIRA DA SILVA
WILLIAN SOARES PEIXOTO

INSPEÇÃO EM VASO DE PRESSÃO NR-13

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO
À UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ COMO REQUISITO
PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM
ENGENHARIA MECÂNICA. ORIENTADOR (A):
PROFESSOR Me. MÁRIO BITTENCOURT QUIRINO DE
ALMEIDA.

Aprovada em Rio de Janeiro, _____ de _____ de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Professora MSc Sônia Regina dos Santos Almeida.
UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

Professor Me Mário Bittencourt Quirino de Almeida.
UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

Professor <Incluir Titulação e Nome do Prof. Convidado>.
UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

Professor <Incluir Titulação e Nome do Prof. Convidado>.
UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

Professor <Incluir Titulação e Nome do Prof. Convidado>.
UNIVERSIDADE ESTÁCIO DE SÁ

AGRADECIMENTOS

DEDICATÓRIA

“Todos veem o que você parece ser, mas poucos sabem o que você realmente é.”

(Maquiavel).

RESUMO

Vasos de pressão são equipamentos que trabalham com pressões internas ou externas que fazem parte de instalações industriais. Nas indústrias de processamento química e petroquímica, estes equipamentos são encontrados na forma de trocadores de calor, caldeiras, condensadores, vasos acumuladores entre outros. Devido ao fato de trabalharem sob pressões consideráveis, os mesmos apresentam um potencial de risco significativo. Por esta razão foi criada a Norma Regulamentadora NR-13, que trata da segurança na manutenção, operação e inspeção desta classe de equipamentos. No processo de adequação de vasos de pressão às exigências da NR-13, um problema comumente encontrado é a falta de documentação devido a extravio, deterioração ou mesmo falta de fornecimento por parte dos fabricantes por ocasião da entrega do equipamento. Neste caso, a norma determina que a documentação seja reconstituída pelo proprietário do equipamento sob responsabilidade de um profissional habilitado em Engenharia. Este trabalho apresenta uma metodologia aplicada a um estudo de caso de adequação de um vaso de pressão de 1979, que foi inspecionado em campo, realizando ensaios não destrutivos, onde foi constatado perda da “margem de corrosão” de projeto, com a aplicação dos cálculos e conceitos do código ASME Seção VIII, divisão 1 foi possível reconstituir o prontuário do equipamento conforme os critérios da norma NR-13 e garantir sua operação segura.

Palavras-chave: Vaso de pressão, Norma regulamentadora Nr-13, Equipamentos.

ABSTRACT

Pressure vessels are equipment that work with internal or external pressures that are part of industrial installations. In the chemical and petrochemical processing industries, these equipments are found in the form of heat exchangers, boilers, condensers, accumulator vessels among others. Because they work under considerable pressure, they present a significant risk potential. For this reason the Regulatory Standard NR-13 was created, which deals with the safety in the maintenance, operation and inspection of this equipment class. In the process of adjusting pressure vessels to the requirements of NR-13, a commonly encountered problem is the lack of documentation due to loss, deterioration or even a lack of supply from manufacturers when the equipment is delivered. In this case, the standard requires that the documentation be reconstituted by the owner of the equipment under the responsibility of a qualified engineering professional. This work presents a methodology applied to a case study of adequacy of a pressure vessel from 1979, which was inspected in the field, performing non-destructive tests, where it was found loss of design "corrosion margin", with the application of the calculations. and concepts of ASME code Section VIII, division 1, it was possible to reconstitute the medical record according to the criteria of NR-13 and ensure its safe operation.

Keywords: Pressure Vessel, Regulatory Standard Nr-13, Equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - The Brockton, Massachusetts shoe factory (58 mortos e 117 feridos)	19
Figura 2 - The Brockton, Massachusetts shoe factory (58 mortos e 117 feridos)	19
Figura 3 - Vasos de pressões e suas características	28
Figura 4 - Estampas do código ASME	32
Figura 5 - Estampas do código ASME	33
Figura 6 - Subdivisão do ASME Seção VIII – Divisão 2.....	38
Figura 7 - Subdivisão do ASME Seção VIII – Divisão 3.....	39
Figura 8 - Tensões Circunferenciais atuantes em um vaso de pressão.	52
Figura 9 - Tensões Circunferenciais atuantes em um vaso de pressão.	53
Figura 10 - Composição da espessura de parede de um vaso de pressão	54
Figura 11 - Relação entre a tensão admissível e o limite de escoamento do material.	56
Figura 12 - Juntas soldadas aceitas pelo código ASME para uniões casco/casco ou casco/tampos.....	60
Figura 13 - Juntas soldadas aceitas pelo código ASME para a atracação de bocais.	61
Figura 14 - Categorias de junta, conforme o código ASME.....	63
Figura 15 -	73
Figura 16 - Determinação de “S” e “C”	83
Figura 17 - Placa de identificação do vaso de pressão	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do fluido	22
Tabela 2 - Classificação dos fluidos	22
Tabela 3 - Grupo de potencial de risco	22
Tabela 4 – Prazo de inspeção para quem não possui SPIE.....	24
Tabela 5 – Prazo de inspeção para quem tem SPIE.....	24
Tabela 6 - Subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1.....	35
Tabela 7 - Subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1.....	36
Tabela 8 - Detalhamento de subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1	37
Tabela 9 - Representação de pressões do equipamento	44
Tabela 10 - Condições de ajuste de PSVs	45
Tabela 11 - Critérios de projeto do ASME seção VIII divisão 1	48
Tabela 12 - Critérios de projeto do ASME seção VIII divisão 1	49
Tabela 13 - Resumo simplificado da Tabela UW-12 do código ASME.	62
Tabela 14 - Correlação entre categoria de junta e tipo de junta, conforme o código ASME.....	64
Tabela 15 - Requisitos de radiografia para vasos de pressão, conforme código ASME.....	65
Tabela 16 – Resultado medições do vaso de pressão	73
Tabela 17 - Temperaturas limite usadas para definir a faixa de fluência	81
Tabela 18 - Critério de aceitação para perda de espessura	83
Tabela 19 - Valores medidos em campo	84
Tabela 20 - Categorias de vaso de pressão Nr-13	87

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1.1 PROBLEMA DO TCC.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.3 ABRANGÊNCIA	16
1.4 JUSTIFICATIVA.....	16
1.5 ESTRUTURA DO TCC.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 RELAÇÃO ENTRE ACIDENTES E REGULAMENTAÇÃO DE LEIS	18
2.2 CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO NO BRASIL	20
2.3 TÓPICOS DA NR-13 REFERENTE A VASO DE PRESSÃO	21
2.4 FISCALIZAÇÃO E PENALIDADES	25
2.5 INTERVALOS DE INSPEÇÃO	26
2.6 VASOS DE PRESSÃO.....	27
2.6.1 Principais Códigos de Construção.....	28
2.7 CÓDIGO ASME - THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS	29
2.7.1 Limitações do Código Asme Seção VIII.....	30
2.7.2 ASME STAMPS	32
2.7.3 ASME Seção VIII - Divisão 1	33
2.7.4 ASME Seção VIII - Divisão 2.....	37
2.7.5 ASME Seção VIII - Divisão 3.....	38
2.7.6 Comparação entre Divisão 1 e 2 Seção do Código ASME	39
2.7.7 Pressões	40
2.7.7.1 Pressão de Operação	41
2.7.7.2 Pressão de Projeto.....	41
2.7.7.3 Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA)	42
2.7.7.4 Pressão de Teste Hidrostático	42

2.7.7.5 Pressão de Ajuste do Dispositivo de Alívio de Pressão	43
2.7.8 Temperatura	46
2.7.8.1 Temperatura de Operação ou de Trabalho	46
2.7.8.2 Temperatura de Projeto	46
2.7.9 Tensões Admissíveis	47
2.7.9.1 Tipos de Tensões que Atuam nos Vasos de Pressão	49
2.7.9.2 Tensões Primárias	50
2.7.9.3 Tensões Secundárias.....	51
2.7.9.4 Tensões Circunferenciais	51
2.7.9.5 Tensões Longitudinais	52
2.7.10 Composição da Espessura de um Vaso de Pressão	53
2.7.10.1 Principais Fatores que Interferem no Cálculo de Espessura	55
2.7.10.2 Espessura Mínima Requerida	56
2.7.11 Materiais	58
2.7.12 Tipos de Juntas Soldadas	59
2.7.12.1 Eficiência de Junta (e)	61
2.7.12.2 Categoria de Juntas	62
2.7.12.3 Requisitos de Radiografia de uma Junta Soldada	64
3. METODOLOGIA.....	66
3.1 COLETA DE DADOS PARA O CÁLCULO DA PMTA	66
3.2 CÁLCULO DO COSTADO PELA PRESSÃO INTERNA.....	67
3.3 CÁLCULO DOS TAMPOS TORIESFÉRICOS 2:1 PELA PRESSÃO INTERNA .	68
3.4 CÁLCULO DA PMTA	69
3.5 CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO	70
4. ESTUDO DE CASO	71
4.1 DESENVOLVIMENTO	72
4.1.1 Inspeção de Campo	72
4.1.2 Medição de Espessura no Equipamento	73

4.1.3 Cálculos Conforme Código ASME VIII DIV.1	73
4.1.4 Determinação das Espessuras Mínimas Requeridas.	74
4.1.5 Determinação das Pressões Máximas Admissíveis	77
4.1.6 Pressão de Teste Hidrostático	78
4.1.7 Tensões Atuantes nos Componentes.....	78
4.1.8 Análise de Área com Redução de Espessura pelo API RP 579	80
4.1.8.1 Dados Requeridos para Análise.....	82
4.1.8.2 Resultado das Medições de Campo.....	84
4.1.8.3 Espessuras	85
4.1.8.4 Cálculo do COV	85
4.1.8.5 Critério de Aceitação	85
4.1.9 Enquadramento Pela NR-13	86
5. CONCLUSÃO	91
6. REFERÊNCIAS	92
ANEXO I	93
ANEXO II	103
ANEXO III.....	108

INTRODUÇÃO

Norma Regulamentadora 13 emitida pela Secretária de Segurança do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) do Brasil define vasos de pressão como equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa, diferente da atmosférica.

O documento mais usado no continente americano como referência para projeto, construção, inspeção e montagem de Vasos de Pressão é o Código emitido pela American Society of Mechanical Engineering (ASME) que adota como definição de vasos de pressão a seguinte descrição:

“Vaso de Pressão são reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidades, não sujeitos a chama, que contenham qualquer fluido, projetado para resistir com segurança uma pressão interna superior a 15 psi ou inferior à pressão atmosférica; ou submetidos à pressão externa”.

Essa definição não é apenas um conceito de vasos de pressão, mas um requisito necessário para que os critérios e fórmulas descritas no código possam ser empregados com segurança quando do projeto de um novo vaso de pressão.

Para minimizar os riscos de acidente com os vasos de pressão, tem-se a norma regulamentadora NR-13, onde seus anexos trazem itens de segurança para: a instalação, inspeção, enquadramento e segurança na operação e na manutenção de vasos de pressão, sendo que todas as atividades descritas sobre manutenção e inspeção devem ser realizadas por profissional habilitado.

A construção de um vaso de pressão envolve uma série de cuidados especiais relacionados com o seu projeto, fabricação, montagem, inspeção e testes. Pois a falha de um vaso de pressão, além de provocar perda de produto e parada de produção, pode gerar vazamento de produtos inflamáveis, tóxicos, quentes ou muito frio que podem levar a grandes catástrofes, com incêndio, explosão, contaminação do meio ambiente e perdas de vida. Por esse motivo vasos de pressão são considerados equipamentos de grande risco.

Em maio de 2018 foi registrado, pelo jornal norte fluminense, um acidente com um vaso de pressão que explodiu no complexo logístico do Açú, em São João da Barra,

onde deixou 2 trabalhadores gravemente feridos e os mesmos foram hospitalizados com lesões graves (O JORNAL DO NORTE FLUMINENSE, 2018).

Acidentes com vaso de pressão têm grande proporção e geralmente vítimas fatais. Baseado nesses fatos foi elaborado um estudo para avaliar as condições dos vasos de ar comprimido de uma empresa de fabricação de aditivos para óleos lubrificantes, com a aplicação de uma inspeção de segurança conforme a NR-13.

1.1 PROBLEMA DO TCC

A operação de vasos de pressão em instalações industriais sem a devida segurança, podem causar acidentes com graves consequências, para os trabalhadores, a população ao entorno e as instalações da empresa. Neste contexto, este TCC vem apresentar um estudo de caso de um vaso de pressão fabricado em 1979, que perdeu a margem de corrosão estabelecida pelo projeto e sua documentação não estava conforme os critérios da NR-13.

1.2 OBJETIVOS

Com o presente trabalho teve-se por objetivo identificar as condições de instalação, operação, segurança e disposição geral dos vasos de pressão de uma empresa na região de Belford Roxo no Rio de Janeiro que produz aditivos para lubrificantes. Recalcular uma nova pressão máxima de trabalho admissível. Reconstituir o prontuário conforme os requisitos da Nr-13 e apontar as não conformidades encontradas durante a inspeção de segurança.

1.3 ABRANGÊNCIA

Dentre as várias limitações impostas ao vaso de pressão calculado, explicitadas no decorrer deste trabalho, é válido informar que o equipamento deverá ter pressão interna, tampo toro-esférico, casco cilíndrico, posição de montagem vertical e armazenar fluidos com propriedades e características descritas nesse trabalho. Para evidenciar a veracidade dos cálculos aqui apresentados, tomaremos um vaso de pressão, com suas devidas especificações técnicas, como um estudo de caso. Ao final de todo o estudo proposto será apresentado a memória de cálculo utilizada.

1.4 JUSTIFICATIVA

A importância na segurança dos funcionários e instalações da empresa de aditivos para lubrificantes reforça a necessidade da inspeção de segurança de integridade dos vasos de pressão minimizando os riscos de acidentes, desta forma o estudo das condições e não conformidades encontradas irá contribuir para a redução de acidentes.

1.5 ESTRUTURA DO TCC

Este TCC está estruturado em cinco capítulos principais, além da introdução, anexos e de um capítulo dedicado às referências bibliográficas e fontes consultadas, conforme discriminado a seguir:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Nesse capítulo são abordados os assuntos importantes para a compreensão do trabalho como vasos de pressão, código ASME e aspectos legais envolvidos.

Capítulo 3 – Metodologia: Descrição dos aspectos a serem considerados e o passo a passo, como coleta de dados e cálculos envolvidos, para alcançar o objetivo esperado nesse TCC.

Capítulo 4 – Estudo de Caso: É mostrado o estudo de caso de um vaso de pressão onde a metodologia descrita no capítulo anterior foi aplicada.

Capítulo 5 – Considerações e Perspectivas: Conclusão sobre o trabalho desenvolvido e a perspectivas desejadas com a adoção e implementação das medidas sugeridas neste trabalho.

Capítulo 6 - Referências: São listadas as bibliografias consultadas, bem como outras fontes de consulta utilizadas na elaboração dessa dissertação.

Capítulo 7 – Listados os anexos que compõem e complementam o trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreensão deste trabalho, neste capítulo serão apresentados os aspectos legais envolvendo a segurança de vasos de pressão e os conceitos técnicos envolvidos.

2.1 RELAÇÃO ENTRE ACIDENTES E REGULAMENTAÇÃO DE LEIS

No início do Século XIX, com o advento de diversos acidentes com caldeiras relacionado a Revolução Industrial, já havia uma necessidade de regulamentar o projeto da construção de vasos de pressão. Em 1851, ocorreu uma explosão catastrófica em Londres, onde uma investigação preliminar concluiu pela má qualidade de fabricação e pela utilização de materiais inadequados para trabalhos em altas pressões. Recomendou-se na ocasião a fabricação de caldeiras com ampla utilização de materiais forjados, uso de tampos hemisféricos e a proteção do equipamento através de 2(duas) válvulas de segurança simultâneas.

Entre 1870 e 1910, pelo menos 10.000 explosões em caldeiras foram registradas na América do Norte. Após 1910, a taxa se elevou para 1.300 a 1.400 falhas ao ano.

Em 1905, ocorreu uma explosão de caldeira em uma fábrica de sapatos em Brockton, Massachusetts (EUA), que motivou a criação de norma regulatória, denominada *Massachusetts Rules*, sobre o projeto e construção de caldeiras, emitida em 1907.

O Comitê de Caldeiras do ASME foi criado em 1911, com publicação da primeira edição do código em 1914-1915, exclusivamente para Caldeiras Estacionárias (Seção I). Em 1924, seria publicada a Seção VIII, referente a vasos de pressão não sujeitos a chama. Nesta época já existiam normas europeias para caldeiras e vasos de pressão.

Figura 1 - The Brockton, Massachusetts shoe factory (58 mortos e 117 feridos)



Fonte: Livro de inspeção de equipamento IBP

Figura 2 - The Brockton, Massachusetts shoe factory (58 mortos e 117 feridos)



Fonte: Livro de inspeção de equipamento IBP

Com a redução do nível de insegurança na definição do comportamento estrutural dos equipamentos, permitiu-se o estabelecimento de fatores de segurança mais adequados. O ASME Seção III, editado em 1963, foi o primeiro código a utilizar tais desenvolvimentos.

As normas e códigos de projeto foram estabelecidos não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo e projeto dos vasos de pressão, como principalmente garantir condições mínimas de segurança para a sua operação. A experiência comprovou que a observância dessas normas torna muito baixa a probabilidade de ocorrência de acidentes graves. Por essa razão, embora muitas vezes não sejam de uso legal obrigatório, nem eximam de qualquer responsabilidade o projetista, são em geral exigidas como requisito mínimo de segurança por quase todos os projetistas e usuários de vasos de pressão.(IBP,2017)

2.2 CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO NO BRASIL

Quando da criação da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), em 1º de maio de 1943, publicada no Decreto-lei nº5.452, Capítulo V – Seção XII, consolidando as leis trabalhistas quanto às atividades com caldeiras, fornos e recipientes sob pressão, até a criação da Norma Regulamentadora 13 (NR-13), que trata de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, a CLT passou por inúmeras atualizações para adequar-se às atividades.

Em 1977 foi assinada a Lei nº6514, alterando o capítulo V do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativa à segurança e medicina do trabalho. Dentre as várias seções da lei pode ser acessada a Seção XIII que trata de Caldeiras, Fornos e Recipientes Sob Pressão.

Em 1978 o Ministério do Trabalho aprovou as Normas Regulamentadoras (NR), previstas na Lei 6514, visando detalhar as disposições daquela lei. Dentre as 35 Normas Regulamentadoras existentes, destacamos a NR-13 aplicada a vasos de

pressão e a NR-14 aplicada a Fornos. Apesar do título, a NR-13 tratava apenas de caldeiras e era simplesmente uma cópia da antiga portaria nº20, com todos os seus problemas.

Em 1983 o Ministério do Trabalho resolveu estender a NR-13 a outros vasos de pressão, como: compressores, tanques de ar comprimido, vasos de ar comprimido, reservatórios em geral de ar comprimido e outros com autoclaves, que são tão perigosos quanto as caldeiras.

Em 1984 e 1985 a NR-13 sofreu algumas alterações, continuando com vários problemas que praticamente inviabilizavam a sua utilização para vasos de pressão em geral.

Em 1995 a NR-13 sofreu novas alterações, agora com a participação de técnicos de indústrias e foi totalmente modificada, sendo introduzida nesta, conceitos existentes em Normas Europeias. A atual NR-13 categoriza os vasos de pressão em função do tipo de fluido e dados de projeto, em função dessa categorização é estabelecida uma frequência de inspeção. Além disso, a norma relaciona uma série de requisitos a serem seguidos em prol da segurança.

Atualmente no Brasil as Normas Regulamentadoras são instrumentos legais que exigem inspeção em vasos de pressão e por sua natureza tem força de lei.

A NR-1 descreve que as Normas Regulamentadoras são de observância obrigatória pelas empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos poderes legislativo e judiciário, que possuam empregados regidos pela Consolidação das Leis Trabalhistas (CLT).

2.3 TÓPICOS DA NR-13 REFERENTE A VASO DE PRESSÃO

A principal modificação introduzida na NR-13 é a adoção da classificação dos vasos de pressão em categorias de inspeção, em função do: tipo de fluido armazenado,

produto da pressão máxima de operação do vaso e seu volume geométrico e o grupo potencial de risco do vaso.

Tabela 1 - Características do fluido

Características do Fluido	Classe do Fluido
- Fluidos Inflamáveis e Combustíveis com $T \geq 200$ °C; - Tóxico com $LT \leq 20$ ppm - Hidrogênio e Acetileno	A
- Fluidos Combustíveis com $T < 200$ °C; - Tóxico com $LT > 20$ ppm	B
- Vapor de água; Gases asfixiantes simples; Ar comprimido	C
- Outros Fluidos	D

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Classificação dos fluidos

Grupo	Produto P (Mpa) x V (m^3)
1	> 100
2	≥ 30 e < 100
3	$\geq 2,5$ e < 30
4	≥ 1 e $< 2,5$
5	< 1

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 - Grupo de potencial de risco

Classe do Fluido	Potencial de risco P (Mpa) x V (m^3)				
	1: $PV \geq 100$	2: $30 \leq PV < 100$	3: $2,5 \leq PV < 30$	4: $1 \leq PV < 2,5$	5: $PV < 1$
CATEGORIAS					
A	I	I	II	III	III
B	I	II	III	IV	IV
C	I	II	III	IV	V
D	II	III	IV	V	V

Fonte: Autoria própria

As categorias de inspeção variam de I a V, sendo mais rigorosa quanto MENOR for sua categoria. Assim um vaso enquadrado na categoria I é aquele que estará submetido aos maiores rigores da Norma.

A Norma NR-13, na parte referente a vasos de pressão aplica-se, basicamente, a vasos de pressão, estacionários, não sujeitos a chama, cujo produto da pressão máxima de operação (KPa) e seu volume geométrico (m³) seja superior a 8 ou que armazene fluido classe A. (IBP,2017)

Independente da categoria, todo vaso de pressão deve possuir:

- a) Placa de identificação: placa fixada no vaso, em local visível que deve conter algumas informações, referentes às condições de projeto do vaso, selecionadas pela Norma.
- b) Prontuário: são os dados de projeto do vaso.
- c) Registro de Segurança: registro de todas as ocorrências que possam influir na segurança do vaso.
- d) Projeto de Instalação: características das instalações onde o vaso está localizado.
- e) Projeto de Alterações ou Reparos: registro dos reparos realizados no vaso que possam interferir na sua segurança e do procedimento de reparo utilizado.
- f) Relatórios de Inspeção: registro de alterações do vaso que estejam em desacordo com sua placa de identificação.

Todo vaso enquadrado nas categorias I e II, deve possuir um manual de operação que contenha os procedimentos específicos adotados para o vaso em manobras operacionais, como: paradas, partidas, emergências, etc. Além disso, os operadores devem ser treinados, conforme os requisitos especificados na Norma.

Todos os reparos ou alterações devem respeitar o respectivo código de projeto e construção do vaso. A critério do Profissional Habilitado, podem ser utilizadas tecnologias de cálculo ou procedimentos mais avançados em substituição aos previstos pelos códigos de projeto e construção.

A periodicidade de inspeção exigida pela Norma, depende da categoria do vaso e se a empresa possui Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos. As tabelas 1 e 2 mostram os prazos de inspeção e exigências para os vasos de pressão.

Para estabelecimento que não possuem serviço próprio de inspeção de equipamentos (SPIE). (Tabela 4).

Tabela 4 – Prazo de inspeção para quem não possui SPIE.

Categoria do vaso	Exame externo	Exame interno
I	1 ano	3 anos
II	2 anos	4 anos
III	3 anos	6 anos
IV	4 anos	8 anos
V	5 anos	10 anos

Fonte: Autoria própria

Para estabelecimento que possuam o serviço próprio de inspeção de equipamentos (SPIE). (Tabela 5).

Tabela 5 – Prazo de inspeção para quem tem SPIE.

Categoria do vaso	Exame externo	Exame interno
I	3 anos	6 anos
II	4 anos	8 anos
III	5 anos	10 anos
IV	6 anos	12 anos
V	7 anos	A critério

Fonte: Autoria própria

As válvulas de segurança devem ser desmontadas, inspecionadas e recalibradas durante o exame interno do vaso.

Em situações que possam alterar as condições iniciais do vaso este deve ser submetido a uma inspeção de segurança extraordinária. Por exemplo: quando houver alteração de local do vaso.

Após a inspeção deve ser emitido relatório de inspeção contendo no mínimo o seguinte:

- a) Identificação do vaso;
- b) Fluido de serviço e categoria do vaso;
- c) Tipo do vaso;
- d) Data de início e término da inspeção;
- e) Tipo de inspeção executada;
- f) Descrição dos exames e testes executados;
- g) Resultados das inspeções e intervenções executadas;
- h) Conclusões;
- i) Recomendações e providências necessárias;
- j) Data prevista para a próxima inspeção;
- k) Nome e assinatura do profissional habilitado;
- l) Nome e assinatura dos técnicos que participaram da inspeção.

2.4 FISCALIZAÇÃO E PENALIDADES

As delegacias Regionais do Trabalho (DRT) cabem executar as atividades relacionadas com a segurança e medicina do trabalho e a fiscalização do cumprimento dos preceitos legais e regulamentares sobre a segurança e higiene do trabalho.

A fiscalização quanto ao cumprimento dos requisitos da NR 13 pode ser feita pelos empregados da empresa ou seus sindicatos de classe, mediante solicitação formal a empresa, ou através de denúncia ao ministério público.

Cabe, portanto, às DRT's impor penalidades, embargar, interditar etc. em função da inobservância das Normas Regulamentadoras.

A NR-1 estabelece também que cabe ao empregador cumprir e fazer cumprir as disposições legais e regulamentares, sob pena de aplicação das penalidades previstas na legislação pertinente.

Ao empregado cabe cumprir essas disposições. A recusa injustificada constitui ato faltoso.

Merece destaque o não cumprimento dos itens da NR 13 considerados como risco grave e iminente, nesses casos a empresa está sujeita a interdição total ou parcial de suas atividades enquanto esses itens não forem atendidos. Os critérios de interdição

para embarco de obras ou interdição de unidades operacionais estão descritos na Norma Regulamentadora NR 3.

A interdição e embargo poderão ser requeridos pelo Setor de Segurança e Medicina do Trabalho da DRT ou por entidade sindical.

As penalidades que as empresas e profissionais habilitados estão sujeitos por não atendimento aos requisitos da Norma Regulamentadora NR-13 estão descritas na Norma Regulamentadora NR-28.

São exemplos de risco grave e emitente a falta de dispositivos de segurança, de indicadores de pressão, etc. (IBP, 2017)

2.5 INTERVALOS DE INSPEÇÃO

Em todo território brasileiro os prazos máximos de inspeção interna e externa para os vasos de pressão devem ser os estipulados na Norma Regulamentadora NR-13, já descritos. Entretanto é necessário que se verifique tecnicamente se o vaso não necessita uma intervenção antes do prazo máximo estipulado pela NR-13. Essa verificação é feita conhecendo-se o mecanismo de deterioração preponderante no vaso e pelo cálculo da vida remanescente das partes do vaso. Na maioria das vezes a vida remanescente das partes de um vaso é estabelecida com base em medições de espessura realizadas periodicamente em pontos pré-definidos pelo Profissional Habilitado responsável pelo equipamento.

A frequência com que um vaso de pressão deve ser inspecionado depende de vários fatores, sendo os mais importantes os seguintes:

- a) Taxa de desgaste e/ou deterioração;
- b) Sobre espessura para corrosão;
- c) Condições de operação;
- d) Natureza dos fluidos contidos no vaso;
- e) Flexibilidade operacional do vaso em relação ao restante da unidade;
- f) Atendimento aos requisitos das Leis vigentes no país.

2.6 VASOS DE PRESSÃO

Vasos de pressão são todos os reservatórios destinados ao armazenamento e processamento de líquidos e gases sob pressão ou sujeitos a vácuo total ou parcial. O código ASME define vasos de pressão como sendo todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidade, não sujeitos a chama, que contenham qualquer fluido em pressão manométrica igual ou superior a 1,02 kgf/cm² ou submetidos à pressão externa.

Os vasos de pressão são largamente empregados no armazenamento e processamento de gases sob pressão para que se possa ter um grande peso num volume relativamente pequeno e em processos de transformação que precisam ser efetuados sob pressão.

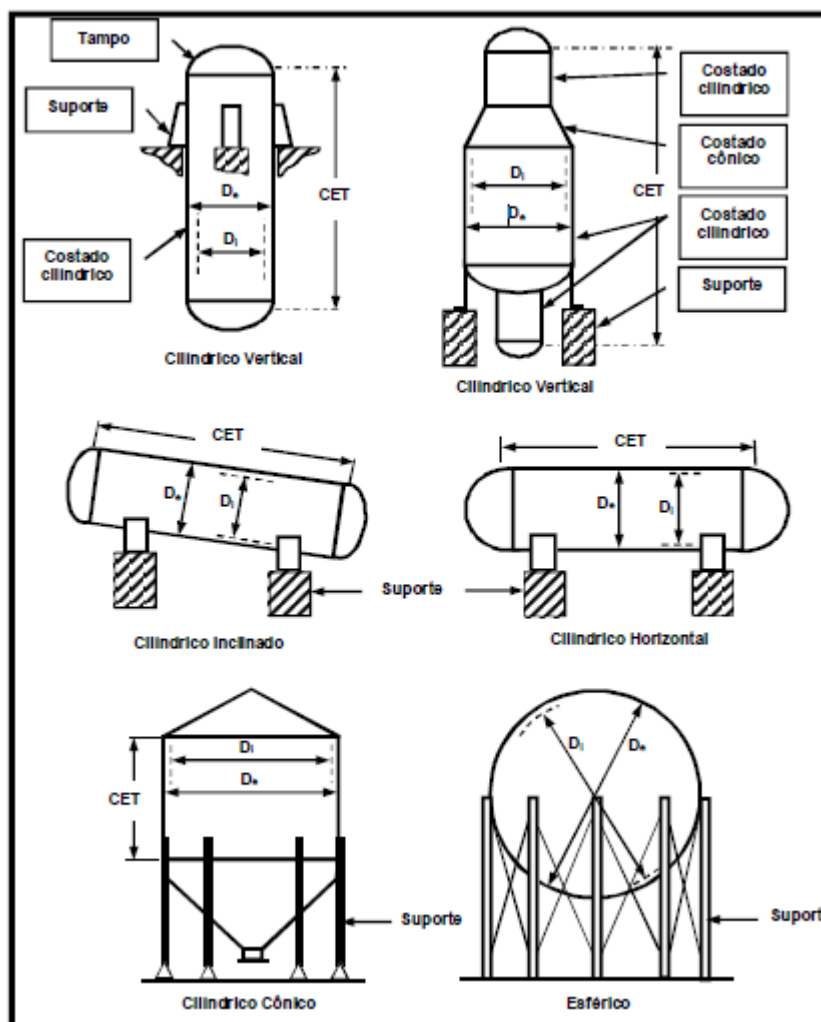
Um vaso de pressão é constituído basicamente de dois elementos: o corpo e os tampos. O corpo de um vaso de pressão, genericamente denominado costado ou casco (*shell*), é normalmente cilíndrico, sendo também toricônico, esférico ou combinações dessas formas. Os tampos, também chamados de calotas (*heads*), fazem o fechamento do corpo. Esses são de variadas formas e geometrias, desde os semi-esféricos e toriesféricos aos planos e flangeados.

As necessidades operacionais, intimamente ligadas ao volume do vaso, determinam suas dimensões. Duas dimensões principais designam diversos parâmetros para a escolha do tipo de vaso: o comprimento entre tangentes (CET) e o diâmetro interno (DI).

O comprimento entre tangentes é o comprimento total do corpo cilíndrico, ou a soma dos comprimentos dos corpos cilíndricos e cônicos sucessivos. As linhas de tangência, que limitam o comprimento entre tangentes, são linhas traçadas próximo a ambos os extremos do casco, na tangência entre o corpo cilíndrico e os tampos de fechamento.

A figura a seguir apresenta alguns vasos de pressão típicos e suas dimensões características.

Figura 3 - Vasos de pressões e suas características



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP 2017

2.6.1 Principais Códigos de Construção

As normas e códigos de projeto foram estabelecidas não só com a finalidade de padronizar e simplificar o cálculo e projeto dos vasos de pressão, mas principalmente para garantir condições mínimas de segurança para a sua operação.

A prática tem comprovado que a observância dessas normas torna muito baixa a probabilidade de ocorrência de acidentes graves. Por essa razão, embora muitas vezes não sejam de uso legal obrigatório, nem eximam de qualquer responsabilidade

o projetista, são em geral adotadas como requisito mínimo de segurança por quase todos os projetistas e usuários dos vasos de pressão.

Um código ou norma de projeto representa um conjunto coerente de premissas que são características do documento, relacionando critérios de cálculo, coeficientes de segurança, padronização e especificação de materiais, detalhes de fabricação e inspeção, extensão mínima dos exames não destrutivos e critérios de aceitação a serem adotados para os materiais e juntas soldadas. Esses itens não devem ser desvinculados, ou seja, não se deve aplicar apenas parte do documento, mas sim o documento como um todo.

Podemos dividir os códigos de projeto de vasos de pressão em dois grandes grupos a partir da filosofia de projeto neles implícita.

A grande maioria dos códigos de projetos estabelece ou limita as tensões de membranas nas diversas partes de um vaso de pressão a uma fração *arbitrária* do limite de resistência ou escoamento do material em que o vaso foi fabricado e incluem regras, baseadas na experiência adquirida ao longo dos anos, para o dimensionamento de componentes especiais como tampos e bocais. Este é o projeto tradicional ou convencional dos vasos de pressão, bastante utilizado.

Seguem esta filosofia, o A.D.Merkblatt; SNCT; ASME VIII Divisão 1 e a B.S.5500 (Projeto Simplificado).

O outro grupo, mais recentemente desenvolvido, tem por filosofia a adoção de maiores tensões de projeto, associadas a uma rigorosa e criteriosa análise de tensões dos equipamentos. O projeto conforme esta filosofia desenvolveu-se bastante com a indústria nuclear e com a introdução de técnicas computacionais que passaram a facilitar a análise de tensões em descontinuidades, bocais, etc. Seguem esta linha de projeto o ASME VIII Divisão 2 e a B.S.5500 (Projeto baseado em análise de tensões).

2.7 CÓDIGO ASME - THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

A American Society of Mechanical Engineers é um comitê organizado em 1911 com a finalidade de padronizar regras para a construção de caldeiras a vapor e outros vasos

de pressão. Este comitê atualmente é chamado de Boiler and Pressure Vessel Cominittee.

Hoje a função desse comitê é estabelecer regras para que os métodos de projetos, fabricação, montagem, inspeção e testes utilizados possam oferecer condições operacionais mais seguras e com menor taxa de deterioração.

O código ASME, pode ser considerado um código dinâmico, pois o comitê de Vasos de Pressão e Caldeiras reúne-se regularmente para discutir propostas adicionais e executar as revisões que se fizerem necessárias.

Este código é dividido em várias seções:

Seção I -Caldeiras

Seção II -Especificação de Materiais

Seção III -Vasos Nucleares (Div. 1 e 2)

Seção IV -Caldeiras para Aquecimento

Seção V -Ensaio Não-Destrutivo

Seção VI -Recomendação quanto a segurança e Operação de Caldeiras para Aquecimento

Seção VII -Recomendações quanto a segurança e Operação de caldeiras

Seção VIII - Vasos de Pressão

Divisão 1 - Projeto Padrão

Divisão 2 - Projeto Alternativo

Seção IX - Qualificação de Soldadores, Operadores de Solda e de Diversos Processos de Soldagem.

Seção X -Vasos de Pressão em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro.

Seção XI -Recomendações para a Inspeção em Serviço de Reatores Nucleares.

2.7.1 Limitações do Código Asme Seção VIII

Os seguintes tipos de vasos de pressão não se encontram no escopo do ASME-Seção VIII-Divisão 1 e Divisão 2:



















- Os cobertos por outras seções do ASME;
- Aquecedores flamo-tubulares;
- Recipientes pressurizados que componham, em parte ou no todo, equipamentos rotativos ou alternativos;
- Componentes de tubulação, como tubos, flanges, parafusos, juntas, válvulas, etc.
- Vasos para armazenamento de água com pressão de projeto menor do que 300 psig (21,0 Kgf/cm²) ou temperatura de projeto menor do que 210 F (99° C);
- Vasos para armazenamento de água, aquecida por vapor ou outro meio indireto, quando nenhuma das seguintes limitações for excedida:
 - a) aquecimento de 200.000 BTU/hora
 - b) temperatura de 210°F (99° C);
 - c) capacidade de 120 gal. (454 litros);
- Vasos com uma pressão de operação interna ou externa menor que 15 psi;
- Vasos com o diâmetro interno, largura, altura ou diagonal da seção transversal inferior a 6".

Os limites físicos de projeto, seja na Divisão 1 ou Divisão 2, são:

- a) quando uma tubulação é ligada externamente ao vaso:
 - Primeira junta circunferencial de uma ligação soldada;
 - Primeira rosca de uma união roscada;
 - Face do primeiro flange de uma ligação flangeada.
- b) quando partes não pressurizadas são soldadas diretamente ao equipamento o limite é a junta soldas de ligação desta parte não pressurizada ao vaso.









2.7.2 ASME STAMPS

Figura 4 - Estampas do código ASME

Power Boilers – Section I					
	S	Power Boilers		M	Miniature Boilers
	A	Power Boiler Assemblies		PP	Pressure Piping
	E	Electric Boilers		V**	Power Boiler Safety Valves
Heating Boilers – Section IV					
	H*	Cast Iron Heating Boilers		HLW	Lined Potable Water Heaters
	H	Heating Boilers, other		HV**	Heating Boilers Safety Valves
Pressure Vessel – Section VIII Division 1					
	U	Pressure Vessels		UV**	Pressure Vessels Safety Valves
	UM*	Miniature Vessels		UD**	Pressure Vessels Rupture Discs
Pressure Vessel – Section VIII Division 2			Reinforced Plastic Vessels – Section X		
	U2	Alternative Rules for Pressure Vessels		RP	Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels
Pressure Vessel – Section VIII Division 3					
	U3	High Pressure Vessels		UV3**	Safety Valves for High Pressure Vessels

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

Figura 5 - Estampas do código ASME

Transport Tanks – Section XII					
	T	Transport Tanks		TD**	Transport Tanks Pressure Relief Devices
	TV	Transport Tanks Safety Valves			
Nuclear Stamps					
	N	Nuclear Components		NV	Nuclear Safety and Safety Relief Valves
	NPT	Nuclear Partials		N3	Storage and Transport Containment of Nuclear Fuel
	NA	Nuclear Installation and Shop Assembly			
Nuclear Certificates of Accreditation			National Board Inspection Code		
	NS	Nuclear Supports		R	Repair and Alteration
	QSC	Material Organization		VR	Repair of Safety Valves

* Components not subject to Authorized Inspection, annual audit by the AIA

** Components not subject to Authorized Inspection, triennial audit by ASME

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

2.7.3 ASME Seção VIII - Divisão 1

O escopo do código ASME Seção VIII – Divisão 1 se refere ao seguinte:

- Equipamentos não sujeitos à chama;
- Equipamentos que não façam parte de componentes rotativos ou alternativos, tubulações ou transporte de produtos;
- Equipamentos com pressão interna igual ou superior a 15,0 psi (1,02 kgf/cm²) e inferior a 3.000,0 psi (211,0 kgf/cm²);
- Equipamentos com diâmetro interno igual ou maior do que 6” (152,0 mm);
- Equipamentos não destinados a ocupação humana.

É o projeto convencional dos vasos de pressão. A filosofia de projeto da Divisão 1 está bem explícita no parágrafo UG-23 (c), do código, onde se lê:

“A espessura de parede de um vaso de pressão dimensionado de acordo com as regras estabelecidas nesta divisão deve ser tal que a tensão máxima primária geral de membrana, resultante dos carregamentos a que esteja sujeito o equipamento durante sua operação normal, não exceda os limites de tensão admissível do material do vaso e que, excetuando-se alguns casos especiais os carregamentos a que esteja sujeito o vaso, não provoquem uma tensão primária de membrana mais flexão superior a $1 \frac{1}{2}$ da tensão máxima admissível do material do vaso”.

É sabido que podem ocorrer elevadas tensões nas descontinuidades nos vasos de pressão, mas as regras de projeto e de fabricação desta divisão foram estabelecidas de modo a limitar tais tensões a um nível seguro consistente com a experiência adquirida. Embora seja dito que os vasos de pressão devam resistir a todos os esforços solicitantes (pressão interna ou externa, pesos, sobrecargas, reações de apoio, ação de vento, impactos, esforços de dilatação, etc,...), o código só fornece fórmulas para o cálculo em função da pressão interna ou externa, ficando o cálculo para os demais esforços inteiramente a critério do projetista.

As regras da Divisão 1 foram formuladas a partir de considerações de projeto e princípios de construção aplicáveis a vasos projetados para pressões não superiores a 3.000 psig e vasos sujeitos a pressão externa. A Divisão 1 está dividida da seguinte forma:

Tabela 6 - Subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1

Subsection A: General Requirements - Requisitos gerais, aplicáveis a todos os vasos de pressão.

Part UG: General Requirements for All Methods of Construction and All Materials:

Scope / Materials / Design / Openings and Reinforcements / Braced and Stayed Surfaces / Ligaments / Fabrication / Inspection and Tests / Marking and Reports / Pressure Relief Devices

Subsection B: Requirements Pertaining to Methods of Fabrication of Pressure Vessels - Requisitos específicos, aplicáveis em função do método de fabricação.

Part UW: Requirements for Pressure Vessels Fabricated by Welding

Part UF: Requirements for Pressure Vessels Fabricated by Forging

Part UB: Requirements for Pressure Vessels Fabricated by Brazing

Subsection C: Requirements Pertaining to Classes of Materials - Requisitos específicos, aplicáveis em função do tipo de material utilizado na fabricação.

Part UCS: Requirements for Pressure Vessels Constructed of Carbon and Low Alloy Steels

Part UNF: Requirements for Pressure Vessels Constructed of Nonferrous Materials

Part UHA: Requirements for Pressure Vessels Constructed of High Alloy Steel

Part UCI: Requirements for Pressure Vessels Constructed of Cast Iron

Part UCL: Requirements for Welded Pressure Vessels Constructed of Material With Corrosion Resistant Integral Cladding, Weld Metal Overlay Cladding or With Applied Linings

Part UCD: Requirements for Pressure Vessels Constructed of Cast Ductile Iron

Part UHT: Requirements for Pressure Vessels Constructed of Ferritic Steels With Tensile Properties Enhanced by Heat Treatment

Part ULW: Requirements for Pressure Vessels Fabricated by Layered Construction

Part ULT: Alternative Rules for Pressure Vessels Constructed Having Higher Allowable Stresses at Low Temperature

Part UHX: Rules for Shell-and-Tube Heat Exchangers

Fonte: Código ASME, 2017

Tabela 7 - Subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

Exemplo: Vaso projetado segundo critérios do código ASME Seção VIII – Divisão 1 Ed. 1995, Construção soldada c/ material base aço carbono.
Seções a consultar: U - UG - UW – UCS.

Tabela 8 - Detalhamento de subseções do ASME Seção VIII – Divisão 1

UG	UW	UCS
<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos gerais para chapas, forjados, tubos, etc,... com procedimentos de fabricação e fornecimento • Certificação de materiais • Pré-fabricação de componentes • Construções especiais • Definição de temperatura e pressão de projeto • Carregamentos • Indicação de onde retirar os valores de tensões máximas admissíveis • Corrosão • Dimensionamento a pressão interna e externa • Aberturas e reforços • Resistência de reforços de abertura • Múltiplas aberturas • "Standards" para flanges e tubos • Ligamentos • Tolerâncias de fabricação • Requisitos para teste de impacto • Teste hidrostático • Teste pneumático • "Proof test" para estabelecimento de pressões máximas admissíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Categorias de juntas • Projeto de juntas soldadas • Exames de Radiografia e ultra-som • Detalhes de solda permitidos • Detalhes de bocais permitidos • Plug welds • Soldas de filete • Requisitos para procedimentos de soldagem • Requisitos para qualificação de procedimentos • Tolerâncias de alinhamento de soldas • Reparo de soldas • Procedimentos para tratamento térmico após soldagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais • Procedimentos para tratamento térmico após soldagem • Operação em baixa temperatura

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

2.7.4 ASME Seção VIII - Divisão 2

O código ASME - Seção VIII - Divisão 2 se baseia em um projeto alternativo de vasos de pressão. Na Divisão 2 as regras são mais restritivas quanto ao tipo de material a ser utilizado, mas permite-se a utilização de maiores valores de intensificação de

tensões de projeto na faixa de temperaturas na qual este valor é limitado pelo limite de resistência ou escoamento: procedimentos mais precisos de cálculo são necessários; os procedimentos permissíveis de fabricação são especificamente delineados e mais completos métodos de inspeção e teste são exigidos.

A Divisão 2 está dividida da seguinte forma:

Figura 6 - Subdivisão do ASME Seção VIII – Divisão 2

<p>Part 1 - General Requirements</p> <p>Part 2 – Responsibilities and Duties</p> <p>Part 3 – Materials Requirements</p> <p>Part 4 – Design by Rules Requirements</p> <p>Part 5 – Design by Analysis Requirements</p> <p>Part 6 – Fabrication Requirements</p> <p>Part 7 – Inspection and Examination Requirements</p> <p>Part 8 – Pressure Testing Requirements</p> <p>Part 9 – Pressure Vessel Overpressure Protection</p>
--

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

A filosofia de projeto da Divisão 2 estabelece regras específicas para o caso do projeto de vasos mais comuns, assim como a Divisão 1. Quando isto não ocorre uma completa análise de tensões é necessária e pode ser feita de acordo com os procedimentos estabelecidos pelo código.

2.7.5 ASME Seção VIII - Divisão 3

O código ASME - Seção VIII - Divisão 3 complementa as regras da Divisão 2, definindo critérios adicionais para equipamentos de altas pressões de trabalho. Além de requisitos de material, são previstos critérios para a utilização da mecânica da fratura no projeto.

A Divisão 3 está dividida da seguinte forma:

Figura 7 - Subdivisão do ASME Seção VIII – Divisão 3

Part KG - General Requirements
Part KM – Materials Requirements
Part KD – Design by Rules Requirements
Part KF – Fabrication Requirements
Part KR – Pressure Relief Devices
Part KE – Examination Requirements
Part KT – Testing Requirements
Part KS – Marking, Stamping, Reports and Records

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

2.7.6 Comparação entre Divisão 1 e 2 Seção do Código ASME

As PRINCIPAIS diferenças entre as duas divisões do código ASME, são as seguintes:

a) Espessura mínima de parede

A divisão 1 utiliza fórmulas de cálculo simplificadas.

A divisão 2 exige uma análise de todas as tensões atuantes em cada parte do vaso.

(Apêndice 4)

b) Critério de resistência mecânica

A divisão 1 usa como critério a maior tensão normal devido a Lamé ou a Rankine: “A maior tensão de tração e a maior tensão de compressão não devem ultrapassar as tensões limites obtidas respectivamente nos ensaios de tração e compressão convencionais.”

A divisão 2 usa como critério a maior tensão de cisalhamento devido a Saint-Venant e a Tresca: “A maior tensão de cisalhamento não deve ultrapassar a metade da tensão limite de tração, determinada no ensaio de tração convencional.”

c) Análise de Fadiga

A divisão 2 considera a possibilidade de falha por fadiga e dá regras para esta análise. (apêndice 5)

d) Escolha de materiais

A divisão 2 faz exigências adicionais para a certificação do material a ser utilizado na fabricação do equipamento. (parte AM)

Exemplo: Maior número de corpos de prova nos exames destrutivos exigidos ou maior quantidade de exames não destrutivos (requisitos adicionais AM-2 a AM-5).

A divisão 2 é mais restrita na escolha de materiais, porém permite que sejam atingidas tensões admissíveis mais elevadas.

e) Processo de fabricação

A divisão 2 exige requisitos adicionais referentes a procedimentos de soldagem, tratamento térmico, etc (artigos AF-1 a AF-8).

f) Inspeção e testes

Embora os critérios de aceitação sejam os mesmos para as duas divisões, a divisão 2 não aceita as limitações de abrangência de exames não destrutivos permitidas na divisão 1.

Exemplo: A divisão 2 não admite radiografia parcial (spot) em juntas soldadas.

g) Geral

A divisão 2 não limita a pressão máxima de operação, enquanto a divisão 1 a limita em 3.000psi (212 Kgf/cm²).

2.7.7 Pressões

Os vasos de pressão são projetados de acordo com a pressão a qual serão impostos. Sendo que esse é o dado inicial, fornecido pela engenharia de processo, e um dos mais importantes nos cálculos químicos do fluido contido no vaso.

A pressão, força aplicada sobre área, impõe não só o vaso a grandes esforços como também os diversos elementos e partes internas do equipamento. O ASME especifica quatro tipos de pressão que fazem parte do dimensionamento do vaso, pressão de operação, pressão de projeto, pressão de trabalho admissível e pressão de teste.

2.7.7.1 Pressão de Operação

A pressão de operação, ou pressão normal de trabalho, é aquela na qual o vaso de pressão trabalha em suas condições normais, para uma determinada temperatura de operação. Nos processos ocorridos dentro do equipamento, o fluido trabalha constantemente sob esta pressão.

2.7.7.2 Pressão de Projeto

Cada componente do vaso de pressão deve ser calculado para a condição mais severa de pressão e temperatura em condição normal. Esta condição mais severa de pressão é a pressão de projeto. Vale ressaltar que o vaso de pressão não trabalha sob a pressão de projeto e sim sob a pressão de operação.

Esta condição de pressão, que em muitas vezes pode exceder o dobro da pressão de operação, é a determinante nos cálculos de espessuras do costado, tampos, bocais, tipos de solda, pressão de trabalho admissível, etc. A engenharia de processos informa o seu valor, para que o engenheiro mecânico dimensione o equipamento.

Um vaso de pressão nasce a partir da pressão de projeto. Portanto o seu valor deve ser cuidadosamente observado ao ser inserido nos cálculos. Se o valor de pressão de projeto inserido nos cálculos for menor que o estabelecido, o vaso será dimensionado

com espessuras menores do que as necessárias para suportar um aumento de pressão, podendo acarretar em falha do equipamento. No entanto, se este valor for maior que o estabelecido, acarreta em um vaso com espessuras maiores que o necessário para suportar os possíveis aumentos de pressão, sendo assim mais oneroso.

A parte do ASME que nos fornece informação sobre esta pressão é a UG 21.

2.7.7.3 Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA)

Após o cálculo da espessura mínima requerida pela pressão de projeto, adota-se uma espessura nominal, que é maior que a mínima requerida. Para esta espessura maior, calcula-se o valor máximo da pressão suportada, obtendo-se a PMTA.

A pressão máxima de trabalho admissível, PMTA (ou MAWP: *Maximum Allowable Working Pressure*), é a pressão máxima suportada pelo vaso de pressão e seus componentes em sua posição normal de operação (ASME;, 2014).

A PMTA é considerada de duas maneiras na qual o vaso se encontra: na condição quente/corroída (em campo) e na fria / nova (em fábrica). Esta pressão acarreta no componente mais solicitado uma tensão com o mesmo valor da tensão admissível do material da peça, na temperatura que está sendo considerada, corrigido pela eficiência das juntas de solda.

A parte do ASME que nos fornece informação sobre esta pressão é a UG 98.

2.7.7.4 Pressão de Teste Hidrostático

A pressão de teste hidrostático é calculada para todos os vasos de pressão regidos pelo código ASME. Esta pressão é maior que a pressão de operação, de projeto e máxima de trabalho admissível.

Este teste tem a finalidade de garantir a total integridade da fabricação do equipamento e assegurar que o vaso de pressão está em perfeito estado para o início de seu trabalho.

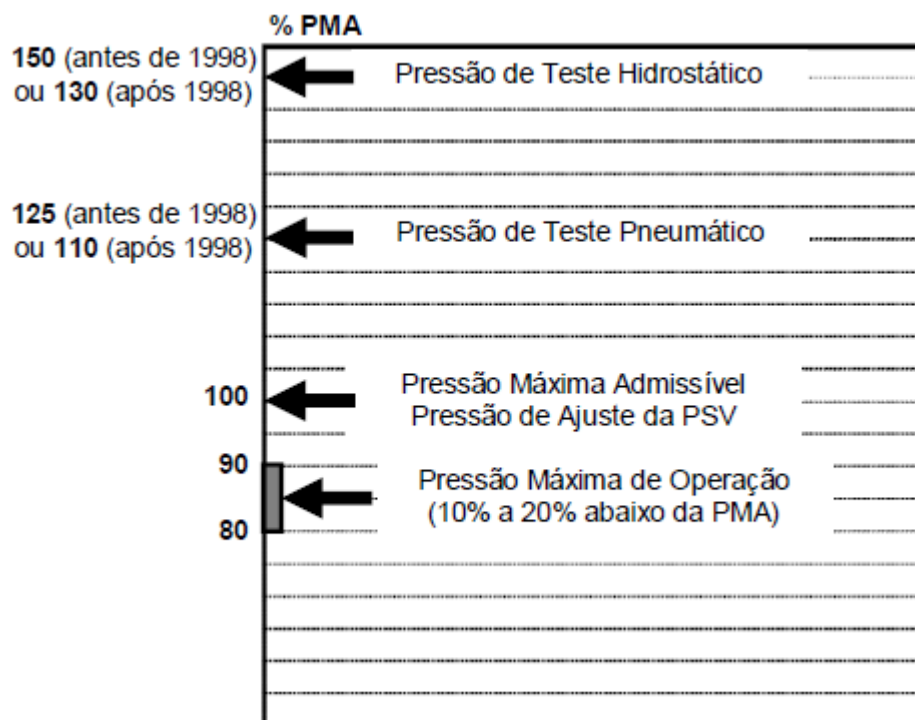
A parte do ASME que nos fornece informação sobre esta pressão é a UG 98.

2.7.7.5 Pressão de Ajuste do Dispositivo de Alívio de Pressão

O código ASME Seção VIII, Divisão 1 aborda os requisitos para dispositivos de alívio de pressão, em sua parte UG, parágrafos UG-125 a UG-136 e em seu Apêndice 11. Num vaso de pressão instalamos dispositivos de alívio de pressão para proteção contra condições anormais de operação e contra o excesso de pressão provocado por fogo.

Para condições anormais de operação, o dispositivo de alívio de pressão, quando 1 (um) só dispositivo é utilizado, deve ter sua pressão de ajuste não superior a pressão máxima admissível de trabalho do equipamento, nem inferior a sua pressão de projeto.

Tabela 9 - Representação de pressões do equipamento



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP 2017

Estes dispositivos de alívio de pressão são geralmente válvulas calibradas (PSV – Pressure Safety Valves) que devem ser ajustadas de modo a se abrirem a uma determinada pressão (pressão de Início de Abertura ou “SET” da Válvula) e a estarem completamente abertas (Abertura Plena) quando a pressão atinge um determinado limite permitido pelo Código, para cada condição anormal prevista para o equipamento.

A tabela a seguir apresenta os valores máximos da pressão de ajuste, permitidos pelo Código (conforme UG-125 e UG-134), para cada condição anormal, com relação aos seguintes tipos de válvula:

- a) Válvulas Operacionais – utilizadas para atender a condições anormais de operação;

- b) Válvulas para Condição de Fogo – utilizadas para atender a condição de pressão excessiva provocada por fogo externo ao equipamento (quando requerido pelo Projeto Básico).

Tabela 10 - Condições de ajuste de PSVs

Válvulas de Alívio	Válvulas para Condição de Fogo				
	Válvulas Operacionais	Produtos que não o GLP não refrigerado		GLP não refrigerado	
INÍCIO DE ABERTURA (SET ou Pressão de Ajuste) <u>Valores máximos</u>	1 Válvula Operacional UG-134(a): 100% PMA_{oq}	2 ou + Válvulas Operacionais UG-134(a) 1ª. Válvula Operacional: 100% PMA_{oq}	1 ÚNICA VÁLVULA para Fogo e Operação UG-134(b) 100% PMA_{oq}	1 Válvula de Fogo complementar a 2 ou mais operacionais UG-134(b) 110% PMA_{oq}	VÁLVULA ESPECÍFICA PARA FOGO – <u>não complementar as Válvulas Operacionais</u> UG-125(c)(3)(b) 100% PMA_{oq} (Com tolerância de +10% da PMA _{ca} por UG-134(d)(2))
		2ª. ou mais Válvulas Operacionais: 105% PMA_{oq(Max)}	1 Válvula de Fogo complementar a 1 operacional UG-134(b) 110% PMA_{oq}		
ABERTURA PLENA <u>Valores máximos</u>	1 Válvula Operacional UG-125(c) Maior valor entre: 110% PMA_{oq} PMA_{oq} + 3 psi	2 ou mais Válvulas Operacionais UG-125(c)(1) Maior valor entre: 116% PMA_{oq} PMA_{oq} + 4 psi (Valor a ser adotado para todas as Válvulas Operacionais)	1 ÚNICA VÁLVULA para Fogo e Operação UG-125(c)(2) 121% PMA_{oq} (Válvula deve atender as vazões de operação e fogo)	1 Válvula de Fogo complementar a 2 ou mais operacionais UG-125(c)(2) 121% PMA_{oq} (Vazão deve complementar a das válvulas operacionais)	VÁLVULA ESPECÍFICA PARA FOGO – <u>não complementar as Válvulas Operacionais</u> UG-125(c)(3)(a) 120% PMA_{oq}
			1 Válvula de Fogo complementar a 1 operacional UG-125(c)(2) 121% PMA_{oq} (Vazão deve complementar a da válvula operacional)		

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP 2017

2.7.8 Temperatura

A faixa de variação de pressões e de temperatura de trabalho dos vasos de pressão é muito extensa. Existem vasos de pressão trabalhando desde o vácuo absoluto até cerca de 4.000Kg/cm (~400Mpa), e desde próximo zero absoluto até temperaturas da ordem de 1500°C. Os vasos de pressão podem ter grandes dimensões e pesos, havendo alguns com mais de 60m de comprimento de outros com mais de 200 toneladas.

2.7.8.1 Temperatura de Operação ou de Trabalho

A temperatura de operação é a temperatura da parede do vaso quando sujeito as condições normais de operação. Quando em um equipamento existirem zonas com diferentes temperaturas de operação, podemos estabelecer condições de projeto distintas para cada uma dessas zonas.

2.7.8.2 Temperatura de Projeto

A temperatura de projeto é a temperatura da parede do vaso correspondente a pressão de projeto. O Código ASME estabelece que esta temperatura não deverá ser menor que a temperatura média da superfície metálica nas condições normais de operação.

Vasos com possibilidade de operação em condições distintas de operação devem ter inicialmente suas condições de projeto estabelecidas para cada condição de operação. Posteriormente, será adotada a condição mais crítica de projeto, a partir das relações entre a pressão de projeto e tensão admissível na temperatura de projeto.

2.7.9 Tensões Admissíveis

Tensões admissíveis de um determinado material são as tensões utilizadas para o dimensionamento dos diversos componentes de um vaso de pressão.

As tensões admissíveis estão relacionadas com a tensão de escoamento ou de ruptura.

Denomina-se coeficiente de segurança (C.S.) à relação entre as tensões de escoamento ou ruptura e a admissível (S_{adm}) de um determinado material, como mostra a equação 1

$$C.S = \frac{\text{Limite de Escoamento ou Limite de Ruptura}}{\text{Tensão Admissível}} \quad (\text{equação 1})$$

Inúmeros são os fatores que afetam a fixação dos valores das tensões admissíveis de um código. Os principais são:

- a) Tipo de Material: para os materiais frágeis adota-se um coeficiente de segurança maior do que o adotado para os materiais dúcteis.
- b) Critério de Cálculo: uma tensão admissível só deverá ser aplicada em combinação com o critério de cálculo para o qual foi estabelecida. Cálculos grosseiros e grandes aproximações exigem a adoção de elevados coeficientes de segurança.

- c) Tipo de Carregamento: a consideração de esforços cíclicos e alternados, choques e vibrações exige uma redução sensível no valor da tensão admissível determinada para esforços estáticos.
- d) Temperatura: a resistência mecânica de um material diminui com o aumento da temperatura e conseqüentemente, a tensão admissível também diminuirá.
- e) Distribuição de Tensões: defeitos de fabricação como ovalização, decorrente da calandragem incorreta de chapas; redução da espessura dos tampos em consequência de sua prensagem ou martelamento; desalinhamento de solda, etc., resultam numa distribuição real de tensões diferente da teórica.
- f) Segurança: equipamentos de grande periculosidade, envolvendo sério risco humano e material, exigem elevados coeficientes de segurança.

O critério de projeto adotado pelo código ASME seção VIII divisão 1, estabelece como tensão admissível, para chapas de materiais ferrosos, o menor valor entre os especificados na Tabela 11, em função da temperatura de projeto.

Tabela 11 - Critérios de projeto do ASME seção VIII divisão 1

Temperatura de Projeto (°C)	Tensão Admissível – O menor valor entre as opções abaixo	Motivos da Limitação
Menor ou Igual a 370	$\frac{\textit{Limite de ruptura}}{3,5}$ $\frac{2 \times \textit{Limite de escoamento}}{3}$	1) Imprecisões no levantamento de cargas atuantes 2) Heterogeneidades das propriedades mecânicas dos materiais
Acima de 370	Tensão que provoca uma deformação de 1% após 100 horas na temperatura de projeto 67% da tensão média de ruptura na temperatura de projeto 80% da menor tensão de ruptura após 100.000 horas na temperatura de projeto	Redução da resistência mecânica dos materiais devido ao fenômeno da fluência

Fonte: Autoria própria

Para a divisão 2 o critério de projeto adotado é um pouco menos conservativo, estabelece como tensão admissível, para chapas de materiais ferrosos, o menor valor entre os especificados na Tabela 12, em função da temperatura de projeto.

Tabela 12 - Critérios de projeto do ASME seção VIII divisão 1

Temperatura de Projeto (°C)	Tensão Admissível – O menor valor entre as opções abaixo	Motivos da Limitação
Menor ou Igual a 370	$\frac{\textit{Limite de ruptura}}{3}$ $\frac{2 \times \textit{Limite de escoamento}}{3}$	3) Imprecisões no levantamento de cargas atuantes 4) Heterogeneidades das propriedades mecânicas dos materiais
Acima de 370	Tensão que provoca uma deformação de 1% após 100 horas na temperatura de projeto 67% da tensão média de ruptura na temperatura de projeto 80% da menor tensão de ruptura após 100.000 horas na temperatura de projeto	Redução da resistência mecânica dos materiais devido ao fenômeno da fluência

Fonte: Autoria própria

2.7.9.1 Tipos de Tensões que Atuam nos Vasos de Pressão

As tensões que podem estar atuando nas paredes de um vaso, quando este estiver sobre pressão são classificadas em três tipos: tensões primárias, secundárias e localizadas. As tensões primárias são, normalmente, as únicas a serem consideradas no cálculo da espessura dos vasos, pela maioria dos códigos de construção utilizados, as outras duas são consideradas apenas em casos específicos.

2.7.9.2 Tensões Primárias

São chamadas de tensões primárias aquelas decorrentes das cargas atuantes nas paredes do vaso e necessárias para satisfazer a condição de equilíbrio estático entre forças e momentos. Essas tensões podem ser de tração, compressão ou cisalhamento.

São exemplos de tensões primárias aquelas decorrentes de cargas do tipo: pressão interna ou externa, pesos, ação do vento, etc.

As tensões primárias normais podem ser de membrana ou de flexão. A tensão de membrana é a componente da tensão primária mais significativa e supostamente constante ao longo de toda a espessura da parede do vaso.

A tensão primária seria igual a tensão de membrana se a espessura de parede fosse nula, como a espessura não é nula teremos como tensão primária a soma das tensões membrana e flexão.

A tensão de membrana devido apenas a pressão interna será sempre uma tração, porque a parede do vaso tende a aumentar de dimensão. As tensões de flexão aparecem porque o raio de curvatura da parede aumenta, como consequência da pressão interna. A tensão de flexão varia ao longo da espessura de parede, sendo máxima de tração na superfície interna e máxima de compressão na superfície externa.

Assim, a tensão primária resultante na superfície interna será a tensão de membrana mais a tensão de flexão e na superfície externa a tensão de membrana menos a tensão de flexão. As tensões de flexão serão tanto maiores quanto maior for a espessura do vaso. Quando o diâmetro do vaso for muito maior do que a espessura, as tensões de flexão serão pequenas e podem ser desconsideradas na determinação da tensão resultante.

2.7.9.3 Tensões Secundárias

As tensões secundárias são aquelas resultantes não de cargas aplicadas, mas devido as restrições geométricas do próprio vaso, ou devido a restrições causadas por estruturas ligadas ao vaso. Essas tensões são consequência de os vasos não serem livres para se deformar ou dilatar.

2.7.9.4 Tensões Circunferenciais

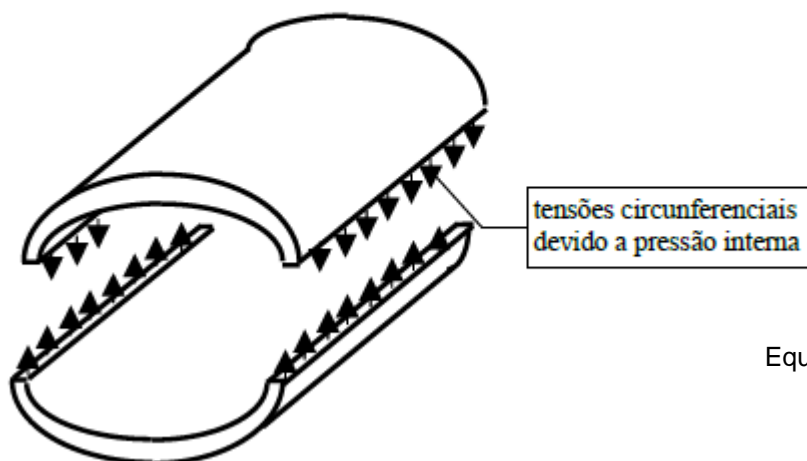
No cálculo da espessura para vasos de pressão são consideradas basicamente as tensões primárias circunferenciais e longitudinais, sendo desprezadas as tensões radiais.

As tensões radiais causadas pela pressão interna são esforços de compressão na parede do vaso e para a grande maioria das condições operacionais (pressões inferiores a 212 Kgf/cm²) são desprezíveis.

As tensões circunferenciais são aquelas que tendem a romper o vaso segundo a sua geratriz quando este estiver sobre pressão interna. (Figura 14). Em geral são as mais críticas e são calculadas conforme a equação 2.

Figura 8 - Tensões Circunferenciais atuantes em um vaso de pressão.

$$\text{Tensão Circunferencial} = \frac{(\text{Pressão Interna}) \times (\text{Raio Médio})}{\text{Espessura}}$$



Equação 2

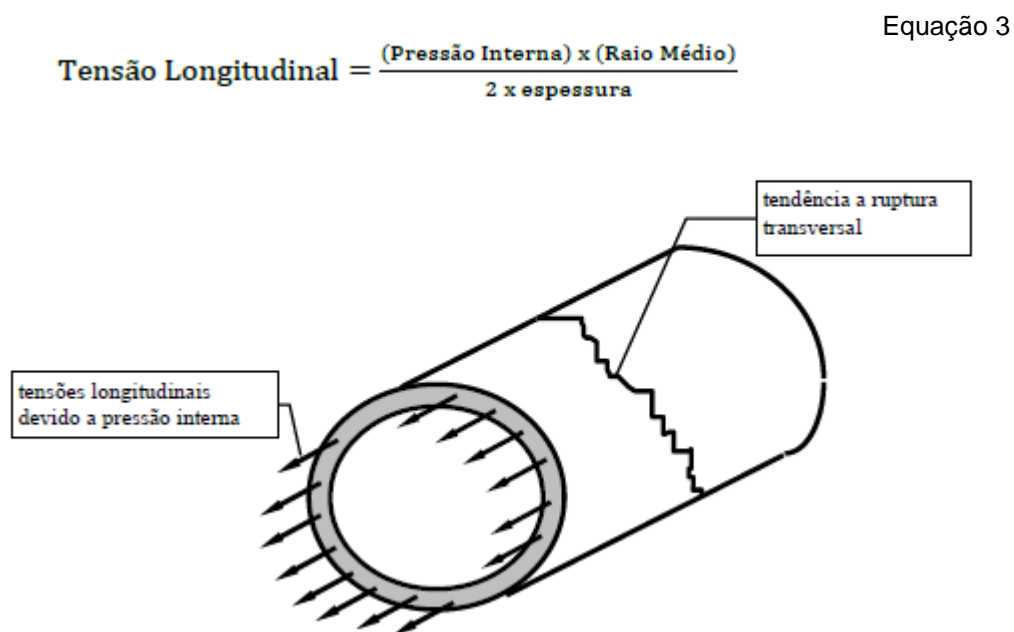
Fonte:

2.7.9.5 Tensões Longitudinais

As tensões longitudinais são aquelas que tendem a romper o vaso segundo a sua seção transversal quando este estiver sobre pressão interna. (Figura 8)

Em geral são menos críticas e são calculadas conforme pela equação 3.

Figura 9 - Tensões Circunferenciais atuantes em um vaso de pressão.

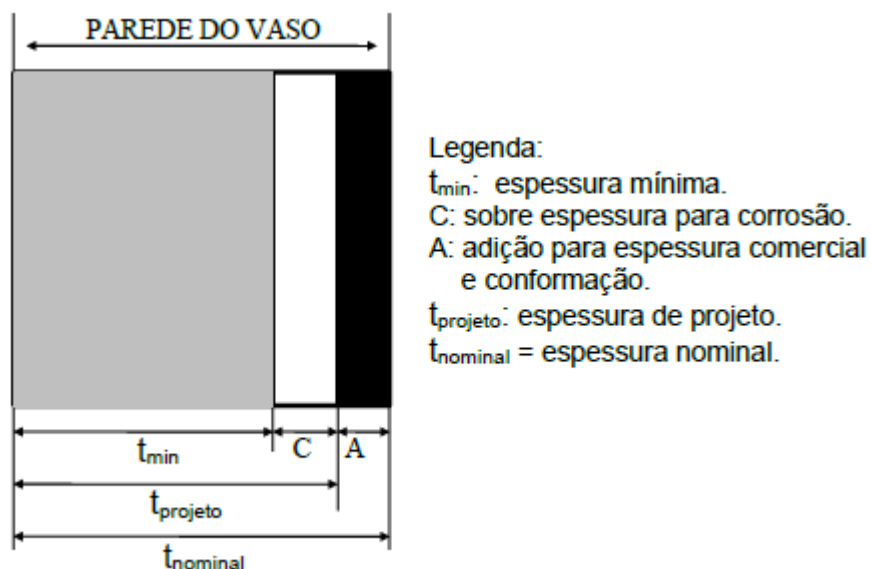


Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

2.7.10 Composição da Espessura de um Vaso de Pressão

A Figura 9 representa esquematicamente a composição da espessura nominal das partes de um vaso de pressão.

Figura 10 - Composição da espessura de parede de um vaso de pressão



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

A sobre espessura de corrosão (C) é o valor determinado com base na corrosão prevista e na vida útil especificada no projeto do vaso. Como regra geral, quando a taxa de corrosão prevista for superior a 0,3 mm/ano, ou quando a sobre espessura para corrosão prevista for maior do que 6 mm, recomenda-se que seja usado outro material de maior resistência à corrosão.

Quando não for possível estabelecer valores confiáveis para a taxa de desgaste para aço carbono ou baixa liga recomenda-se a utilização dos valores descritos a seguir em função da agressividade do meio:

- a) Serviços com água ou hidrocarbonetos: C = 3 mm;
- b) Potes de acumulação (botas) para hidrocarbonetos: C = 6 mm;
- c) Serviços com vapor e ar: C = 1,5 mm;
- d) Armazenamento de gases: C = 1,5 mm;
- e) Serviço com meios aquoso ácidos ou alcalinos: C = 6 mm.

A sobre espessura de corrosão pode ser dispensada apenas nos casos em que o desgaste por corrosão, erosão ou outro processo for reconhecidamente desprezível ou for aplicado revestimento interno anticorrosivo ou antierosivo. É importante lembrar que a sobre espessura de corrosão de nada adianta contra alguns processos de deterioração que não ocorrem com perda de material, como a corrosão sob tensão, corrosão intergranular, fadiga, fluência, grafitização, etc.

A espessura mínima calculada usando-se as fórmulas do código de construção adotado, adicionada a sobre espessura de corrosão é chamada de espessura de projeto ($t_{projeto}$).

A espessura final adotada para as partes de um vaso de pressão, usualmente chamada de espessura nominal ($t_{nominal}$), é o valor da espessura de projeto adicionado a quantia necessária para compensar as perdas na conformação e para ajustar a espessura de projeto a uma espessura normal de mercado. Assim, a espessura nominal sempre será maior ou igual a espessura de projeto.

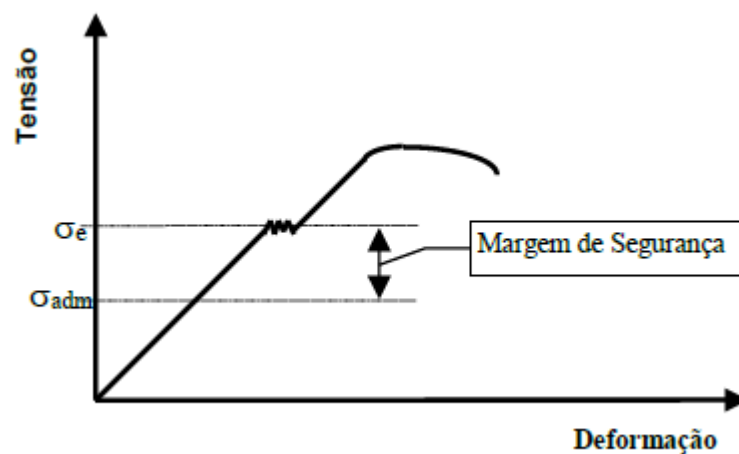
2.7.10.1 Principais Fatores que Interferem no Cálculo de Espessura

O fator de maior preocupação dos projetistas no cálculo da espessura mínima das partes de um vaso de pressão é a influência do estado de tensões ao qual o material será submetido, na resistência mecânica dos materiais. Pois os cálculos baseiam-se em informações determinadas em testes onde os corpos de prova são carregados em uma só direção, como no ensaio de tração, e nas utilizações práticas os materiais estarão submetidos a esforços combinados, resultando num estado bi ou tri axial de tensões.

Além do problema descrito acima o projetista também deverá considerar outros fatores como: imprecisões no levantamento de todas as cargas atuantes, imprecisões quanto a homogeneidade das propriedades mecânicas do material e os desvios de fabricação em relação ao projeto.

Devido aos problemas e incertezas descritos acima os códigos de construção utilizam para o cálculo da espessura a tensão admissível do material com o intuito de garantir que o material trabalhe dentro do regime elástico e relativamente longe do limite de escoamento (σ_e). A Figura 11 mostra esquematicamente o descrito.

Figura 11 - Relação entre a tensão admissível e o limite de escoamento do material.



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

2.7.10.2 Espessura Mínima Requerida

O parágrafo UG 16 (b) do código ASME seção VIII divisão 1 estabelece que a espessura mínima adotada para as partes de um vaso de pressão, após sua produção final, deve ser maior ou igual a 1,6 mm, sem considerar o valor da sobre espessura de corrosão, com as seguintes exceções:

- a) essa espessura não se aplica a espelhos de trocadores de calor;
- b) essa espessura não se aplica a tubulações internas ou externas ao vaso;
- c) para tubulões de caldeira ou coletores de caldeira não sujeitos a chama a espessura mínima é de 6,4 mm, sem considerar a sobre espessura de corrosão.

d) para os vasos em serviço com ar comprimido, vapor ou água a espessura mínima é de 2,4 mm, sem considerar a sobre espessura de corrosão.

O parágrafo UG 22 do código ASME seção VIII divisão 1, estabelece que no cálculo da espessura mínima requerida para as partes de um vaso de pressão devem ser considerados os seguintes carregamentos:

- a) pressão de projeto interna ou externa do vaso;
- b) peso do vaso nas condições normais de operação ou condições de teste;
- c) reações estáticas de outros equipamentos, tubulações ou estruturas ligadas ao vaso;
- d) a existência de internos no vaso e o tipo de apoio ou suportação adotada;
- e) a possibilidade do vaso ou seus bocais estarem sujeitos a carregamento cíclico;
- f) à ação do vento;
- g) reações de impacto devido a choque de fluídos;
- h) gradientes de temperatura e diferencial térmico de expansão.

Devido a essas exigências do código e com o intuito de facilitar a definição da espessura mínima estrutural os projetista adotam como valor mínimo o maior valor entre 4,0 mm e o calculado pela expressão matemática: $e = 2,5 + 0,001 \cdot D_i + C$

ONDE: e = espessura mínima estrutural, em mm.

D_i = diâmetro interno da parte considerada, em mm.

C = sobre espessura de corrosão da parte considerada, em mm.

Para vasos de pequeno diâmetro ou pressões de projeto muito baixas a espessura mínima calculada devido a pressão interna ou externa são menores que o valor obtido com o critério descrito acima. Assim, por facilidade, muitas vezes é adotado o valor da espessura mínima estrutural como espessura mínima requerida para o vaso. Isso poderia ser evitado com a utilização de reforços localizados apenas nas regiões do vaso onde necessário.

2.7.11 Materiais

A escolha dos materiais segue a ASME Seção VIII Divisão 1 Subseção C, que abrange os requisitos aplicáveis as várias classes de materiais utilizados na fabricação de vasos de pressão.

Os cálculos apresentados neste TCC seguiram as regras da parte UCS, aplicáveis aos vasos e seus componentes que são construídas em aços carbono e baixa liga e são usados em conjunto com os requisitos gerais da subseção A, que abrange os requisitos gerais aplicados aos vasos de pressão e o da subseção B que abrange os requisitos específicos para construção dos vasos de pressão.

Todos os aços carbono e de baixa liga, materiais sujeitos a tensão devido a altas pressões são limitados aos listados na Tabela UCS-23, salvo disposição em contrário na UG-10 e UG-11. Onde UG-10 e UG-11 referem-se aos materiais produzidos com especificações não permitidas ou materiais não identificados totalmente segundo os pré-requisitos da ASME Sec. VIII Div.1.

A escolha dos materiais utilizados na construção de cada parte do vaso de pressão segue alguns fatores, como: condições de serviço do equipamento, como por exemplo, pressão e temperatura de operação; nível e natureza das tensões atuantes; natureza, concentração e impurezas, por exemplo, dos fluidos em contato com o vaso; custo do material e segurança; facilidade de fabricação, montagem e manutenção; tempo de vida previsto para o equipamento; disponibilidade; experiência prévia.

2.7.12 Tipos de Juntas Soldadas

A escolha da junta soldada a ser usada na fabricação ou montagem de um vaso de pressão depende basicamente dos seguintes fatores:

- a) Resistência mecânica esperada da junta soldada em relação a resistência do metal de base (eficiência de junta).
- b) Condições operacionais: juntas que serão expostas a fluidos que provoquem corrosão ou erosão, depois de soldadas, não podem conter irregularidades, frestas ou outros problemas que facilitem a deterioração da solda.
- c) Grau de restrição: o tipo de junta pode ajudar a minimizar as distorções e a ocorrência de trincas devido as contrações da solda.
- d) Facilidade de soldagem: algumas juntas estão limitadas pelo acesso.
- e) Dimensões do metal soldado: pequenas aberturas de raiz e pequenos ângulos requerem menor deposição de metal, mas a eficiência de junta deve ser respeitada.
- f) Tipo de carregamento: certos tipos de juntas são adequados apenas para tensões aplicadas numa única direção. Similarmente, tensões estáticas e dinâmicas exigem juntas diferentes.

Esses fatores apresentados acima, são suficientes para mostrar a responsabilidade e a dificuldade na escolha do tipo de junta

Segundo a seção VIII do código ASME os tipos de juntas mais comuns em vasos de pressão são:

- Juntas de Topo

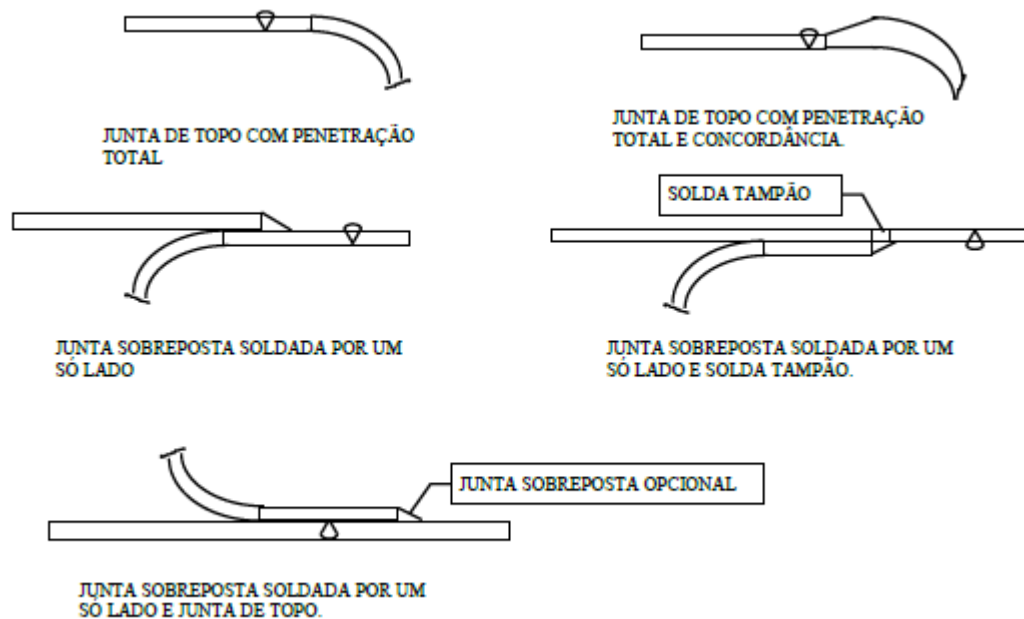
De maneira geral, é o tipo de junta mais usual quando a principal necessidade é resistência mecânica. Entretanto, exigem maior deposição de metal, o que pode acarretar maiores problemas devido as tensões de contração, bem como, maior custo.

- Juntas Sobrepostas

As juntas sobrepostas são unidas por soldas de filete e/ou, soldas "plug", por isso tem menor volume de metal depositado do que as juntas de topo. Assim, são preferidas por motivos econômicos e de facilidade de preparação, quando e onde o código utilizado permitir.

A Figura 11 mostra os tipos de juntas mais recomendados pelo código ASME, para as soldas de união casco/calotas.

Figura 12 - Juntas soldadas aceitas pelo código ASME para uniões casco/casco ou casco/tampos.

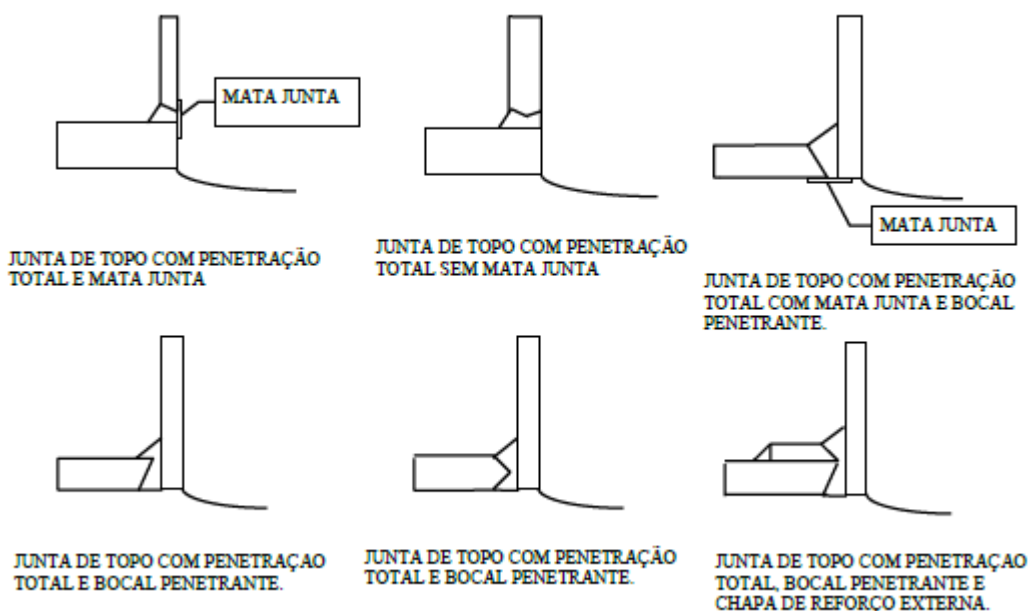


Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

À atracação de bocais, bocas de visita, suportes e acessórios num vaso de pressão exige tipos de juntas diferentes que devem ser analisadas separadamente. A Figura 12 mostra exemplos de juntas deste tipo aceitas pela seção VIII do código ASME. A distância entre duas soldas, em qualquer caso, não deve ser menor do que 4 vezes a espessura da chapa mais fina, com o mínimo de 30 milímetros.

Todas as soldas submetidas aos esforços de pressão, no casco e nos tampos, devem ser de topo, com penetração total, feitas pelos dois lados e radiografáveis. Quando a solda interna for impraticável, pode ser feita apenas a externa, adotando-se um procedimento que garanta a qualidade da raiz da solda.

Figura 13 - Juntas soldadas aceitas pelo código ASME para a atracação de bocais.



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

2.7.12.1 Eficiência de Junta (e)

A Norma Brasileira (NB-109), define eficiência de junta como o cociente entre as resistências à tração do metal depositado e metal base, ou seja,

$$\text{EFICIÊNCIA DE JUNTA} = \frac{\text{RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO METAL DEPOSITADO}}{\text{RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO METAL BASE}}$$

O código ASME, usa o termo eficiência de junta para definir o grau de inspeção a ser adotado após soldagem, levando em consideração o tipo de junta adotada. Essa correlação está definida no parágrafo UW-12 da seção VIII e resumida na Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo simplificado da Tabela UW-12 do código ASME.

Tipo de Junta	Limitações	Categoria da Junta	Grau do Exame Radiográfico		
			Total	Parcial	Sem
Junta de Topo soldada por ambos os lados ou soldada por um lado com qualidade similar a primeira, sem mata junta que permaneça após a soldagem	Nenhuma	A, B, C, D	1,00	0,85	0,70
Junta de Topo soldada por um lado, com mata junta que permaneça após a soldagem	Junta circunferencial com espessura até 15,8 mm e quando o diâmetro externo do vaso for menor do que 24 polegadas	A, B, C	NA	NA	0,60
Junta Sobreposta soldada de ambos os lados	Junta Longitudinal com espessura até 9,5 mm.	A, B, C	NA	NA	0,55
	Junta Circunferencial com espessura até 15,8 mm				
Junta Sobreposta com solda simples e solda tipo plug	Junta Circunferencial de união casco/tampo, onde o diâmetro externo do tampo não seja superior a 24 polegadas e a espessura do casco até 12,7 mm	B, C	NA	NA	0,50
	Junta Circunferencial para atracção de revestimento no casco, quando a espessura do revestimento for menor ou igual a 15,8 mm e a distância entre os plugs de solda seja inferior a 1,5 vezes o diâmetro do plug				
Junta Sobreposta com solda simples, sem solda do tipo plug	Atracção de tampos em casco onde a espessura requerida do filete seja inferior a 15,8 mm	A, B	NA	NA	0,45
	Atracção de tampos em casco com diâmetro menor do que 24 polegadas e espessura requerida do filete até 6,3 mm				

Fonte: Apostila de vasos de pressão IBP, 2017

2.7.12.2 Categoria de Juntas

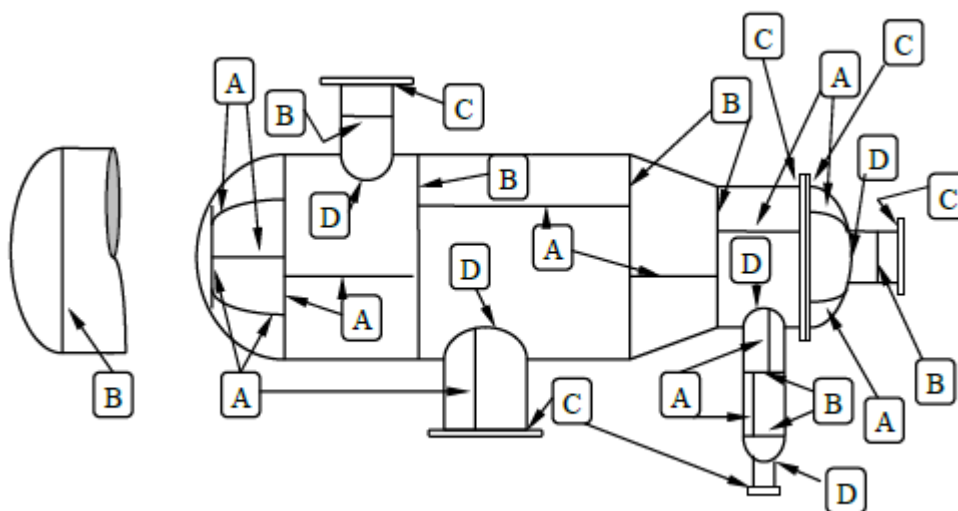
O termo categoria da junta é usado pelo código ASME para agrupar as soldas de um vaso de pressão que estarão sujeitas a níveis de tensões similares, quando em operação, levando em consideração apenas a localização da junta (Figura 13). Deve

ser ressaltado, que juntas de mesma categoria podem ser de tipos diferentes, bem como ter requisitos de radiografia diferentes, pois estas variáveis dependem mais de outros fatores do que da localização da junta no vaso.

O parágrafo UW-2 da seção VIII do código ASME usa uma correlação especial entre categoria de junta, tipo de junta e grau de inspeção nos seguintes casos:

- a) Vasos que operam com substâncias letais;
- b) Vasos que operam com temperaturas abaixo de -30°C ;
- c) Caldeiras não sujeitas a chama, com pressão de projeto acima de 345 KPa;
- d) Vasos sujeitos ao fogo direto.


Figura 14 - Categorias de junta, conforme o código ASME.



Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

Analisando a figura 13 podemos fazer uma correlação entre tipo e categoria de juntas soldadas num vaso de pressão, como mostra a Tabela 12.

Tabela 14 - Correlação entre categoria de junta e tipo de junta, conforme o código ASME.

Categoria da Junta	Tipo de Junta	Resistência Mecânica desejada
A	Todas as Juntas Longitudinais	<p style="text-align: center;">Maior</p>  <p style="text-align: center;">Menor</p>
	Todas as Juntas da esfera	
B	Juntas Circunferenciais casco/tampo, localizadas antes da linha de tangência	
	Juntas Circunferenciais de um cilindro	
C	Juntas Circunferenciais casco/tampo, localizadas após a linha de tangência	
	Juntas Circunferenciais bocal/flange	
D	União casco/bocal	

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP, 2017

O agrupamento de tipos de junta e a correlação com a categoria de junta feito pelo código visa o seguinte:

- Agrupar juntas com exigências de tensão similares quando o vaso estiver em operação;
- Generalizar exigências cujo estado de tensões tenham influência;
- Definir exigências mínimas por grupos de juntas;
- Definir uma eficiência de junta mínima, em função da extensão de solda radiografada.

2.7.12.3 Requisitos de Radiografia de uma Junta Soldada

Levando em consideração a categoria de junta, tipo de junta, produto a ser armazenado e as condições de projeto do vaso, o parágrafo UW-11 do código ASME defini os requisitos mínimos de radiografia para uma junta soldada de um vaso novo,

que deve ser satisfeito antes que o vaso entre em operação. A Tabela 13 faz um resumo desses requisitos mínimos.

Tabela 15 - Requisitos de radiografia para vasos de pressão, conforme código ASME.

Tipo de Radiografia	Extensão a ser Radiografada	Tipo de Junta	Critério de Aceitação	Uso Obrigatório
Total	toda a junta soldada	Topo	UW 51	Armazenamento de substâncias Letais
				Quando Exigido pela Tabela UCS-57
				Quando Pressão de Projeto acima de 345 KPa (3,5 Kgf/cm ²)
Parcial	150 mm + as intersecções com juntas categoria A	Topo	UW 51	Juntas Categoria B, C, D
				Junta de bocais com diâmetro acima de 10 mm ou espessura acima de 20 mm.
Por Amostragem	UW 52	Topo e Ângulo	UW 52	Quando for exigido pela Tabela UW-12 (ASME)

Fonte: Apostila vasos de pressão IBP,2017

3. METODOLOGIA

NR-13 requer que todo vaso de pressão possua, no estabelecimento de instalação, documentação devidamente atualizada, contemplando o “Prontuário do Vaso de Pressão”, e contendo os procedimentos utilizados na fabricação, montagem e inspeção final e determinação da PMTA.

Ainda é comum encontrar na indústria equipamentos que não atendem totalmente a norma NR-13, desde casos de adequação das instalações no campo como pintar a tag (identificação) e a categoria do equipamento, até a reconstituição de seu memorial de cálculo e demais documentos exigidos pela norma.

Quando inexistente ou extraviado, o "Prontuário do Vaso de Pressão" deve ser reconstituído pelo proprietário, com responsabilidade técnica do fabricante ou de um profissional habilitado em Engenharia. Veremos a seguir, aspectos a serem considerados em casos de necessidade de elaboração de cálculos da PMTA de vasos de pressão, de forma a possibilitar a classificação e categorização aplicável a NR-13.

3.1 COLETA DE DADOS PARA O CÁLCULO DA PMTA

Para viabilizar este processo, é necessário obter-se informações mediante inspeções e ensaios realizados no campo em busca de dimensões, geometrias, materiais etc., que auxiliem na elaboração dos cálculos mecânicos do equipamento. Dentre as informações que se pode extrair do equipamento no campo para reconstituição de sua documentação estão:

- a) Condições de serviço atuais (obtidas com a equipe de operação);

- b) Espessuras de parede atuais (facilmente obtidas com o uso de aparelhos de ultrassom para medição de espessuras);
- c) Dimensões externas (obtidas com o auxílio de trenas, paquímetros e outros).

3.2 CÁLCULO DO COSTADO PELA PRESSÃO INTERNA

O cálculo do costado do vaso de pressão nos fornecerá a espessura mínima resistente a uma dada pressão. Essa espessura mínima não será a adotada no equipamento e sim servirá para a escolha de uma chapa, de espessura comercial, que seja maior que a mínima calculada.

De acordo com o “parágrafo UG-27”, denominando de “grande espessura” os cascos para os quais se tenha: $t > \frac{1}{2} R$, ou $P > 0,385 S.E$

- 1) Espessura mínima, cascos cilíndricos de pequena espessura

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

t = espessura mínima do anel do costado (mm)

P = pressão total (MPa)

R = raio interno do cilindro (mm)

S = tensão admissível do material em função da temperatura de projeto

3.3 CÁLCULO DOS TAMPOS TORIESFÉRICOS 2:1 PELA PRESSÃO INTERNA

Para o cálculo do tampo devemos atentar para algo importante. Na conformação mecânica a chapa sofrerá estrição, ou seja, sua espessura diminuirá. Sendo assim, é preciso consultar os catálogos dos fabricantes que informam essa perda de espessura e diminuir da espessura mínima calculada.

De acordo com a parte **UG-32** (d), temos:

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

$$M = \frac{3 + \frac{\sqrt{L}}{r}}{4}$$

Onde: t = espessura mínima requerida do tampo

P = pressão de projeto

L = raio maior do perfil toriesférico, $L = 0,904 \times D$

r = raio menor do perfil toriesférico, $r = 0,173 \times D$

M = fator de forma para o tampo toriesférico.

S = tensão admissível do material em função da temperatura de projeto

E = coeficiente de eficiência de solda

3.4 CÁLCULO DA PMTA

A pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) é a pressão máxima, no topo do vaso, em posição de operação normal, que acarreta no componente mais solicitado do equipamento, uma tensão igual a tensão admissível do material, na temperatura considerada, corrigida pelo valor da eficiência de junta adotada no projeto do equipamento.

A) PMTA para o casco cilíndrico:

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R + 0,6.t}$$

B) PMTA para o tampo toriesférico 2:1:

$$PMTA = \frac{2.S.E.t}{L.M + 0,2.t}$$

S = tensão admissível do material em função da temperatura de projeto

t = espessura atual

E = coeficiente de eficiência de solda

R = raio interno do costado

L = raio da calota esférica

M = fator de forma para o tampo toriesférico

3.5 CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO

A fim de garantir a integridade do vaso, deve-se submeter o equipamento a uma pressão de teste, como informado na UG-99:

$$P_t = 1,3 \cdot P_w \left(\frac{S_a}{S} \right)$$

P_t = Pressão de Teste Hidrostático

P_w = PMTA

S_a = tensão admissível do material a temperatura ambiente

S = tensão admissível do material em função da temperatura de projeto

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresenta um cenário com um vaso de pressão que opera desde 1979 com a finalidade de armazenamento de ar comprimido, numa planta de aditivos para lubrificantes cujo prontuário foi extraviado e que se deseja avaliar o enquadramento pela NR-13.

Entretanto, alguns dados de construção e das condições de serviço e operação atuais foram resgatados com as equipes de operação e manutenção.

De forma a obter informações mínimas para reconstituição do prontuário do vaso de pressão foram necessárias inspeções dimensionais e ensaios por medição de espessura por ultrassom realizado em campo.

A seguir está apresentado a utilização da metodologia simplificada do código ASME Seção VIII Divisão 1 para cálculo de vasos de pressão em regime de pressão constante.

Especificações do Vaso de Pressão

- a) Fluido: Ar comprimido
- b) Pressão interna de projeto: 0,98 Mpa
- c) Pressão interna de operação: 0,59 Mpa
- d) Pressão máxima de trabalho admissível: 0,98 Mpa
- e) Volume: 3 m³
- f) Temperatura interna de projeto: 24 °C
- g) Temperatura de operação: 24 °C
- h) Espessura de projeto casco / tampo: 7,9 mm
- i) Sobre espessura de corrosão costado / tampos: 1,5 mm
- j) Eficiência de junta soldada do corpo: 0,7

- k) Eficiência de junta soldada do tampo: 0,7
- l) Tipo de tampo: Toriesférico 2:1
- m) Material corpo / tampo: A-283 Gr. C 2
- n) Material do pescoço / bocal: A-53 Gr. B
- o) A-283 Gr. C: Tensão admissível (-30°C a 93°C): 207 MPa
- p) Altura cilíndrica: 3000 mm
- q) Diâmetro interno: 1200 mm
- r) Diâmetro externo: 1216 mm

4.1 DESENVOLVIMENTO

4.1.1 Inspeção de Campo

Foi realizado uma inspeção no equipamento, para identificar possíveis anomalias e confrontar o desenho técnico com o equipamento físico, durante a inspeção foram verificados os seguintes itens:

- a) Estado do revestimento;
- b) Corrosão no casco, tampo e conexões;
- c) Deformação no casco;
- d) Deformação nos tampos;
- e) Base do equipamento;
- f) Instrumentos instalados;
- g) Medição de espessura do casco e tampos;
- h) Localização no Layout da planta;
- i) Iluminação de emergência.

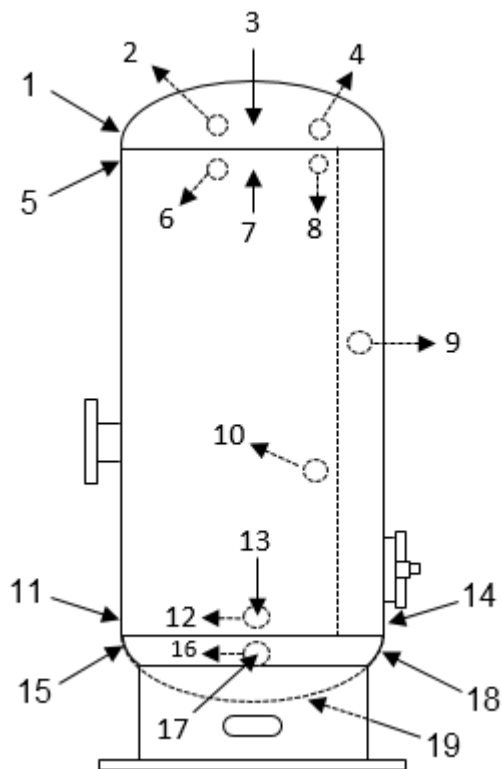
4.1.2 Medição de Espessura no Equipamento

As espessuras atuais de parede dos componentes foram obtidas através de medição de espessura por ultrassom. As espessuras encontradas estão relacionadas na figura XX e foram consideradas as medidas mínimas para efeito de cálculos.

Tabela 16 – Resultado medições do vaso de pressão

Local Medido	Espessura Projeto mm	Espessura Medida mm
1	7,9	6,3
2	7,9	6,4
3	7,9	6,8
4	7,9	6,7
5	7,9	8,7
6	7,9	8,7
7	7,9	8,7
8	7,9	8,7
9	7,9	8,8
10	7,9	8,7
11	7,9	8,4
12	7,9	8,5
13	7,9	8,6
14	7,9	8,5
15	7,9	6,5
16	7,9	6,5
17	7,9	6,5
18	7,9	6,9
19	7,9	6,8

Figura 15 – Croqui do vaso de pressão



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Cálculos Conforme Código ASME VIII DIV.1

- a) Determinação das espessuras mínimas requeridas;
- b) Pressões máximas admissíveis do equipamento;
- c) Pressão de ajuste de PSV máxima do equipamento;
- d) Pressão de teste hidrostático padrão;
- E) Verificação dos componentes a partir da tensão admissível do material;

4.1.4 Determinação das Espessuras Mínimas Requeridas.

➤ Casco cilíndrico

Espessura mínima para pressão interna:

$$t = \frac{P.R}{(S.E - 0,6.P)}$$

$$t = \frac{0,98 \times 600}{(207 \times 0,7 - 0,6 \times 0,98)} = 4,07 \text{ mm}$$

Menor espessura encontrada no casco cilíndrico = 8,5 mm

$$t_{\text{atual}} - t = 8,5 - 4,07 = 4,43 \text{ mm}$$

➤ Tambo Superior Toriesférico 2:1

Determinação de (L):

$$L = 0,904 \times D \text{ (mm)}$$

$$L = 0,904 \times 1200 = 1084,80 \text{ mm}$$

Determinação de (r):

$$r = 0,173 \times D \text{ (mm)}$$

$$r = 0,173 \times 1200 = 207,6 \text{ mm}$$

Determinação de (M):

$$M = \frac{3 + \frac{\sqrt{L}}{r}}{4}$$

$$M = \left(\frac{1}{4}\right) \times \left[3 + \left(\frac{1084,8}{207,6}\right) \times \frac{1}{2}\right] = 1,32$$

Espessura mínima para pressão interna:

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

$$t = \frac{0,98 \times 1085 \times 1,32}{2 \times 207 \times 0,7 - 0,2 \times 0,98} = 4,85 \text{ mm}$$

Menor espessura encontrada no tampo superior = 6,3 mm

$$t_{\text{atual}} - t = 6,3 - 4,85 = 1,45 \text{ mm}$$

➤ Tampo Inferior Toriesférico 2:1

Espessura mínima para pressão interna:

$$t = \frac{P.L.M}{2.S.E - 0,2.P}$$

$$t = \frac{0,98 \times 1085 \times 1,32}{2 \times 207 \times 0,7 - 0,2 \times 0,98} = 4,85 \text{ mm}$$

Menor espessura encontrada no tampo inferior = 6,4 mm

$$t_{\text{atual}} - t = 6,4 - 4,85 = 1,55 \text{ mm}$$

4.1.5 Determinação das Pressões Máximas Admissíveis

➤ Casco Cilíndrico

Pressão máxima admissível com espessura atual (corroído)

$$PMTA = \frac{S.E.t}{R + 0,6.t}$$

$$PMTA = \frac{207 \times 0,7 \times 8,4}{600 + 0,6 \times 8,4} = 2,01 \text{ MPa}$$

PMTA adotada pelo projeto do vaso de pressão 0,98 Mpa.

➤ Tampo Superior Toriesférico 2:1

Pressão máxima admissível com a espessura atual (corroído)

$$PMTA = \frac{2.S.E.t}{L.M + 0,2.t}$$

$$PMTA = \frac{2 \times 207 \times 0,7 \times 6,3}{1085 \times 1,32 + 0,2 \times 6,3} = 1,27 \text{ MPa}$$

PMTA adotada pelo projeto do vaso de pressão 0,98 Mpa.

➤ Tampo Inferior Toriesférico 2:1

Pressão máxima admissível com a espessura atual (corroído)

$$PMTA = \frac{2.S.E.e}{L.M + 0,2.e}$$

$$PMTA = \frac{2 \times 207 \times 0,7 \times 6,4}{1085 \times 1,32 + 0,2 \times 6,4} = 1,29 \text{ MPa}$$

PMTA adotada pelo projeto do vaso de pressão 0,98 Mpa.

4.1.6 Pressão de Teste Hidrostático

$$Pt = 1,3 \cdot Pw \left(\frac{Sa}{S} \right)$$

$$Pt = 0,98 \times 1,3 \times \left(\frac{208}{208} \right) = 1,27 \text{ MPa}$$

4.1.7 Tensões Atuantes nos Componentes

A pressão de teste hidrostático atual a ser aplicada deverá corresponder ao valor máximo calculado.

➤ Casco cilíndrico

Tensões circunferências

$$S = \frac{P(R + 0,6.t)}{t.E}$$

$$S = \frac{1,27(600 + 0,6 \times 8,4)}{8,4 \times 0,7} = 130,7 \text{ MPa}$$

Tensões longitudinais

$$S = \frac{P(R - 0,4.t)}{2.t.E}$$

$$S = \frac{1,27(600 - 0,4 \times 8,4)}{2 \times 8,4 \times 0,7} = 64,4 \text{ MPa}$$

➤ Tampo Superior Toriesférico 2:1

$$S = \frac{P(L.M + 0,2.t)}{2 \times t \times E}$$

$$S = \frac{1,27(1085 \times 1,32 + 0,2 \times 6,3)}{2 \times 6,3 \times 0,7} = 206,4 \text{ MPa}$$

➤ Tampo Inferior Toriesférico 2:1

$$S = \frac{P(L.M + 0,2.t)}{2 \times t \times E}$$

$$S = \frac{1,27(1085 \times 1,32 + 0,2 \times 6,4)}{2 \times 6,4 \times 0,7} = 203,19 \text{ MPa}$$

4.1.8 Análise de Área com Redução de Espessura pelo API RP 579

A análise pode ser aplicada para áreas com perda de espessura uniforme ou localizada ou ainda para os casos em que a perda de espessura prevista, com base na taxa de corrosão medida, irá exceder o valor admissível de perda por corrosão. A perda de espessura pode ser devido a deterioração da superfície interna ou externa do componente.

Para realizar a análise utilizando-se os critérios do nível 1 ou 2 é necessário que o componente a ser avaliado atenda aos seguintes requisitos de fabricação, montagem e inspeção:

- a) O componente tem que ter sido projetado, montado e inspecionado de acordo com os requisitos de um código de construção reconhecido internacionalmente;
- b) O componente não opere sobre condições de fluência, ou seja, a temperatura de projeto deverá ser menor ou igual aos valores mostrados na tabela 17;
- c) A região a ser analisada tem contornos suaves, sem entalhes (isto é não existem pontos de concentrações de tensões);

- d) O componente não está sujeito a serviços cíclicos, ou seja o componente está sujeito a menos do que 150 ciclos de pressão e/ou temperatura, incluindo paradas e partidas, considerando seu histórico de operação e previsões futuras;
- e) O componente não contém descontinuidades do tipo trinca;
- f) O componente foi projetado considerando todas as cargas que atuam sobre ele na condição de operação;
- g) A análise pelo nível 1 se aplica aos seguintes componentes:
- g.1) Seções cilíndricas, esféricas e cônicas de vasos de pressão;
- g.2) Tanques de estocagem;
- g.3) Tampos nas formas: esféricos, elípticos e toriesferico;
- g.4) Trechos retos de tubulações;
- g.5) Curvas ou tubos curvados, onde não tenha suportaçãõ.
- h) A análise pelo nível 2 se aplica aos seguintes casos:
- h.1) Bocais de vasos de pressão, tanques e derivações de tubulações;
- h.2) Transições cônicas e regiões com reforço;
- h.3) Tampos planos de cilindros;
- h.4) Flanges;
- h.5) Os componentes não aprovados no nível 1.

Tabela 17 - Temperaturas limite usadas para definir a faixa de fluência

MATERIAL	TEMPERATURA LIMITE °C
Aço carbono, carbono ½ molibdênio e aços inoxidáveis ferríticos	400°C
Aços baixa liga tipo Cromo e Molibdênio	455°C
Aços inoxidáveis Austeníticos	510°C
Ligas de alumínio	90°C

Fonte: Apostila vasos de pressão, IBP 2017

4.1.8.1 Dados Requeridos para Análise

Para realizar a análise são necessárias informações sobre os dados de projeto, histórico de inspeção e medidas da região a ser analisada.

A análise pode ser feita com valores de medida de espessura pontuais ou através de perfil de espessura. Deverá ser feita pelo menos 15 leituras de espessura na região a ser analisada (distância entre os pontos = 2 x espessura nominal), caso o coeficiente de variação das medidas (COV) menos a perda de espessura prevista até a próxima inspeção for maior do que 10% da espessura mínima medida deverá ser usado o perfil de espessura para a definição da espessura mínima medida da região a ser analisada.

$$COV = \frac{\text{desvio padrão das medidas realizadas}}{\text{média das espessuras medidas}}$$

$$\text{Desvio padrão das medidas} = \sqrt{\frac{N \cdot \sum (t_{MM})^2 - (\sum t_{MM})^2}{N \cdot (N - 1)}}$$

N= número de medidas realizadas

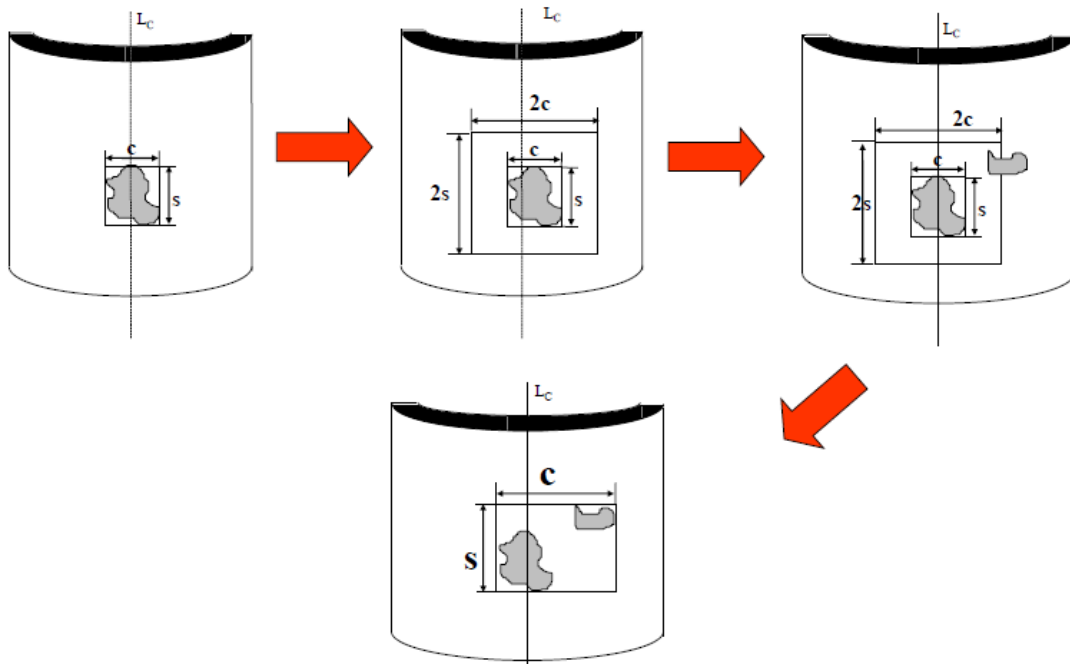
COV – FCA > 0,10 – traçar perfil de espessura

COV – FCA < 0,10 – usar menor espessura medida

FCA = perda de espessura prevista até a próxima inspeção = (taxa de corrosão) x (tempo até a próxima inspeção).

Determinar as dimensões da área com redução de espessura – valores de “S” e “C”.

Figura 16 - Determinação de "S" e "C"



Fonte: Apostila vaso de pressão, IBP 2017

Tabela 18 - Critério de aceitação para perda de espessura

CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO PARA PERDA DE ESPESSURA		
Parâmetros de Análise	Nível 1 - Casco: Cilíndrico, esférico e cônico e Tampos	Nível 2 - Casco: Cilíndrico, esférico e cônico e Tampos
Medição por Pontos (PTR)	$t_{AM} - FCA \geq t_{MIN}$	$t_{AM} - FCA \geq RSFa \cdot t_{MIN}$
Medição por Perfil (CTP), no comprimento "L"	Casco cilíndrico e cone	Casco cilíndrico e cone
	$t_{AM} (S) - FCA \geq t_{MIN} (C)$	$t_{AM} (S) - FCA \geq RSFa \cdot t_{MIN} (C)$
	$t_{AM} (C) - FCA \geq t_{MIN} (L)$	$t_{AM} (C) - FCA \geq RSFa \cdot t_{MIN} (L)$
	Casco esférico e tampos	Casco esférico e tampos
	Menor entre ($t_{AM} (C)$ e $t_{AM} (S)$) - FCA $\geq t_{MIN}$	Menor ($t_{AM} (C)$ e $t_{AM} (S)$) - FCA $\geq RSFa \cdot t_{MIN}$
Para Vasos de Pressão		RSFa = 0,90

Fonte: Apostila vasos de pressão, IBP 2017

ONDE:

tAM : espessura média dos valores medidos para, medição por pontos.

tAM (S): espessura média dos valores medidos na direção Meridional ou Longitudinal, quando o valor é determinado através do perfil de medidas.

tAM (C): espessura média dos valores medidos na direção Circunferencial, quando o valor é determinado através do perfil de medidas.

FCA: perda de espessura prevista até a próxima inspeção e medição ou zero quando a região for protegida.

tMIN : espessura mínima calculada para a região com perda de espessura.

tMIN (C) : espessura mínima calculada para a região com perda de espessura, considerando as tensões circunferenciais e usando a fórmula do código para tensões circunferenciais.

tMIN (S) : espessura mínima calculada para a região com perda de espessura, considerando as tensões longitudinais e usando a fórmula do código para tensões longitudinais.

RSFa: Fator de Segurança Remanescente Admissível = (carga para colapso plástico com a descontinuidade / carga para colapso plástico sem a descontinuidade). Para os vasos de pressão é recomendado que seja adotado 0,90 para esse fator.

4.1.8.2 Resultado das Medições de Campo

Tabela 19 - Valores medidos em campo

Valores medidos em mm		
6,5	6,9	6,6
6,7	6,8	6,6
6,5	6,7	6,7
6,5	6,7	6,7
6,6	6,5	6,9

Fonte: Autoria própria

4.1.8.3 Espessuras

t_{MIN} = espessura mínima calculada = 4,85 mm

t_{AM} = média aritmética das espessuras medidas = 6,6 mm

t_{MM} = espessuras mínima medida = 6,3 mm

4.1.8.4 Cálculo do COV

$$Dp = \sqrt{\frac{15 \times ((6,5 - 6,6)^2 + \dots + (6,6 - 6,6)^2)}{15 \times (15 - 1)}} = 0,16$$

$$FCA = 0,04 * 3 = 0,12 \text{ mm}$$

$$COV = \frac{0,16}{6,6} = 0,02 \text{ (menor que 10\%)}$$

4.1.8.5 Critério de Aceitação

Conforme a tabela 19 vamos analisar os cálculos para conclusão.

$$t_{MA} - FCA \geq t_{MIN} \text{ (Nível 1)}$$

$$t_{MA} - FCA \geq RSFa \cdot t_{MIN} \text{ (Nível 2)}$$

$$\text{Nível 1: } 6,6 - 0,12 = 6,48 \text{ mm} > 4,85 \text{ mm} - \text{APROVADO}$$

$$\text{Nível 1: } 6,6 - 0,12 = 6,48 \text{ mm} > 0,9 \times 4,85 \text{ mm} = 4,36 \text{ mm} - \text{APROVADO}$$

A região com perda de espessura está APROVADA pelo nível 1 e 2

4.1.9 Enquadramento Pela NR-13

De acordo com o item 13.2 da NR-13 que orienta sobre a abrangência desta norma, o vaso de pressão do estudo de caso deve ser avaliado conforme alínea b do subitem 13.2.1: *b) Vasos de pressão cujo o produto P.V seja superior a 8 (oito), onde P é a pressão máxima de operação em kPa e V o seu volume interno em m³.*

A partir das informações do fluido, volume geométrico e pressão máxima de operação, o vaso de pressão foi avaliado quanto ao enquadramento de acordo com o item 13.5 da NR-13 que trata exclusivamente de vasos de pressão:

1º Passo – Verificar preliminarmente se o vaso de pressão se enquadra na NR-13, em função do produto P.V, onde P é a pressão máxima de operação em kPa e o seu volume em m³, conforme item 13.5.1.2 da norma.

Fluido – Ar comprimido

Pressão de projeto – 0,98 Mpa

Volume Geométrico – 3,0 m³

$$\text{Produto } P.V \text{ do vaso} = 980,68 \text{ KPa} \times 3\text{m}^3 = 2.941,92$$

P.V > 8, portanto se enquadra na NR-13

2º Passo – Verificar a classificação do vaso de pressão quanto ao potencial de risco em função do produto P.V, onde P é a pressão máxima de operação em MPa e o seu volume em m³, conforme item 13.5.1.2 da norma, alíneas “c”:

$$\text{Produto } P.V \text{ do vaso} = 0,98068 \text{ MPa} \times 3\text{m}^3 = 2,9$$

3º Passo – De acordo com o produto P.V < 30 e ≥ 2,5 e a Classe do fluido “C”, o vaso de pressão é categorizado através da tabela contida no item 13.5.1.2 da norma, alínea “d” conforme a tabela XX.

Tabela 20 - Categorias de vaso de pressão Nr-13

Classe de Fluido	Grupo de Potencial de Risco				
	1 P.V ≥ 100	2 P.V < 100 P.V ≥ 30	3 P.V < 30 P.V ≥ 2,5	4 P.V < 2,5 P.V ≥ 1	5 P.V < 1
Categorias					
A - Fluidos inflamáveis, e fluidos combustíveis com temperatura igual ou superior a 200 °C - Tóxico com limite de tolerância ≤ 20 ppm - Hidrogênio - Acetileno	I	I	II	III	III
B - Fluidos combustíveis com temperatura menor que 200 °C - Fluidos tóxicos com limite de tolerância > 20 ppm	I	II	III	IV	IV
C - Vapor de água - Gases asfixiantes simples - Ar comprimido	I	II	III	IV	V
D - Outro fluido	II	III	IV	V	V

De acordo com o item 13.5.1.3 da norma, os vasos de pressão enquadrados devem ser dotados dos seguintes itens:

a) Válvula de segurança com abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA, instalada diretamente no vaso ou o sistema que o inclui. A válvula de segurança dimensionada para este estudo de caso deve estar de acordo com o item deste trabalho;

b) Meios utilizados contra o bloqueio inadvertido da válvula de segurança quando esta não estiver instalada diretamente no vaso. No caso do estudo de caso não haverá bloqueios à montante e nem à jusante da válvula de segurança;

c) Instrumento que indique a pressão de operação, instalado diretamente no vaso de pressão ou no sistema que o contenha. No caso do estudo de caso o instrumento a ser considerado é um manômetro dentro das faixas de pressão calculadas neste trabalho.

No item 13.5.1.4 da norma, todo vaso de pressão deve ter afixado em seu corpo, em local de fácil acesso e bem visível, placa de identificação indelével. A partir da reconstituição do prontuário, a placa de identificação foi afixada (figura XX).

Figura 17 - Placa de identificação do vaso de pressão

BELFORD ROXO - RJ			
TAG:		T-4 C	
SERVIÇO:		Reservatório de ar comprimido	
CODIGO DE PROJ. / EDIÇÃO:		ABNT P-NB-109	
FABRICANTE:		Atlas Copco Brasileira S.A.	
ORDEM DE COMPRA			
Nº DE FABRICAÇÃO:		3545	DATA: 1979
NOTA: 1 Mpa = 10,197 Kgf/ cm ²		CASCO	TUBOS
PRESSÃO DE PROJETO:	Mpa	0,98	
PRESSÃO DE OPERAÇÃO:	Mpa	0,69	
PRESSÃO DE TESTE HIDROST.:	Mpa	1,27	
PMTA:	Mpa	0,98	
TEMPERATURA DE PROJETO:	°C	Não Informado	
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO:	°C	Ambiente	
SOBRESSPESSURA DE CORROSÃO:	mm		

Fonte – Autoria própria

No item 13.5.1.5 da norma, a categoria do vaso e seu código de identificação devem estar pintados no corpo do equipamento conforme abaixo:

T-4C
CAT III

Nos itens 13.5.1.6 a 13.5.1.9 da norma, toda a documentação devidamente atualizada e/ou reconstituída através deste trabalho deve estar disponível no arquivo técnico do estabelecimento onde o vaso de pressão estiver instalado, bem como o Livro de Registro de Segurança onde devem ser registradas todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança e as inspeções de segurança periódica e extraordinárias, devendo constar a condição operacional.

O anexo I apresenta o prontuário do vaso de pressão reconstituído conforme o item 13.5.1.7 da norma Nr-13.

O anexo II apresenta o relatório de inspeção do vaso de pressão conforme o item 13.5.4.14 da norma Nr-13.

O anexo III consta o desenho técnico do equipamento mencionado nesse estudo de caso.

5. CONCLUSÃO

Para o vaso de pressão exemplificado no estudo de caso, foi seguida rigorosamente a metodologia de cálculo proposta neste trabalho. A partir do cálculo das espessuras mínimas das chapas foram calculadas as pressões máximas admissíveis para que o vaso possa operar até o limite de segurança.

Neste processo de reconstituição da documentação exigida na NR-13, para adequação do vaso de pressão, a capacitação técnica necessária para o desenvolvimento deste estudo é o conhecimento do código ASME Seção VIII Divisão 1, que possibilita a reconstituição de cálculos essenciais à composição de seu prontuário NR-13.

Também o foi possível avaliar a região com perda de espessura conforme os critérios da API-RP-579 onde possibilitou uma segunda opinião sobre a área afetada, aumentando os critérios de segurança do vaso inspecionado.

O estudo atestado no presente TCC conclui que é possível se reconstituir os cálculos de um Vaso de Pressão existente, segundo o código ASME Seção VIII Divisão I - Vasos de Pressão, utilizando-se uma metodologia de cálculo simplificada, porém com um elevado grau de precisão e segurança. E, contribui para um maior conhecimento sobre equipamentos pressurizados e certamente para a manutenção da integridade e aumento da segurança nas instalações que operam com vasos de pressão.

6. REFERÊNCIAS

ASME. **Boiler and Pressure Vessel Code ASME Section VIII Div1**. Disponível em: <https://www.asme.org/getmedia/c041390f-6d23-4bf9-a953-646127cfbd51/asme-bpvc-brochure-webview.pdf>. Acesso em: 02 Jun 2019.

ESCOLA NACIONAL DA INSPEÇÃO DO TRABALHO – ENIT. **NR-01**: Norma Regulamentadora nº1 – Disposições Gerais. Portaria SEPRT 915, 2019.

ESCOLA NACIONAL DA INSPEÇÃO DO TRABALHO – ENIT. **NR-13**: Norma Regulamentadora nº13 – Caldeiras, vasos de pressão e tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Portaria 1082, 2018.

ESCOLA NACIONAL DA INSPEÇÃO DO TRABALHO – ENIT. **NR-14**: Norma Regulamentadora nº14 – Fornos. Portaria SSMT 12, 1983.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO – MTE. **NR-13**: Norma Regulamentadora nº13 – Manutenção Preditiva pela Integridade dos Equipamentos. 1978.

IBP. **Inspeção em de vaso de pressão**. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/>. Acesso em: 17 Out 2019.

JORNAL NORTE FLUMINENSE. **Explosão de Vaso de Pressão**. Disponível em: <http://www.Nfnoticias.com.br/noticia-10837/explosao-de-vaso-de-pressao-deixa-dois-homens-gravemente-feridos-no-complexo-portuario-do-acu>. Acesso em: 20 Jul 2019.

SANTOS, V. A. **Prontuário para Projeto e Fabricação de Equipamentos Industriais**. 1º ed. Editora Ícone LTDA. São Paulo 2010.

TELES, P. C. **Vasos de Pressão**. 2 ed. LTC Editora S.A. Rio de Janeiro. 1996.

ANEXO I

ANEXO II

ANEXO III