



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC**  
**PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM**

**DANIEL VIDAL FERNANDES**

**AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA DO  
CÓDIGO ASME SECÇÃO VIII DIVISÃO 1**

Salvador

2015

**DANIEL VIDAL FERNANDES**

**AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA DO  
CÓDIGO ASME SECÇÃO VIII DIVISÃO 1**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec como requisito final para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Eng Charles Chemale Yurgel

Salvador  
2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

F363a Fernandes, Daniel Vidal

Avaliação de um vaso de pressão utilizando a metodologia do código ASME secção VIII divisão I / Daniel Vidal Fernandes. – Salvador, 2015.

126 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Charles Chemale Yurgel.

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2015.

Inclui referências.

1. Vasos de pressão. 2. Projeto – Vasos de pressão. 3. Código ASME. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Yurgel, Charles Chemale. III. Título.

CDD 621.8

DANIEL VIDAL FERNANDES

AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA DO  
CÓDIGO ASME SECÇÃO VIII DIVISÃO 1

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Aprovada em 07 de abril de 2015.

**Banca Examinadora**

Charles Chemale Yurgel – Orientador \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec

Manoel Carreira Neto \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de materiais pela Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec

Carlos Augusto de Souza \_\_\_\_\_

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Paris VI, Paris, França

Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec

Dedico este trabalho a minha  
família: pais, irmãos, esposa e filho.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço especialmente aos meus pais, irmãos e esposa pela compreensão e aos meus orientadores pela forma que foi conduzido o trabalho. Em especial agradeço ao meu amigo e responsável pelo trabalho, o Mestre e Especialista em Engenharia de Soldagem e Materiais Paulo Roberto Rego da Silva. Agradeço também ao amigo Engenheiro Jorge Mascarenhas e aos amigos da MKS Caldeiraria Indústria e Comércio pelo apoio e informação para embasamento do trabalho.

*“E se, de repente a gente não sentisse a dor que a gente finge, e sente.  
Se, de repente a gente distraísse... O ferro do suplício. Ao som de uma canção...  
Então, eu te convidaria pra uma fantasia do meu violão.  
Canta, canta uma esperança...”*

## RESUMO

Contrariamente ao que acontece com quase todos os outros equipamentos, máquinas, veículos, objetos e materiais de uso corrente, a maioria dos vasos de pressão não são itens de linha de fabricação de indústrias.

Os vasos são comumente projetados e construídos por encomenda, para atender em cada caso, a determinada finalidade ou a determinadas condições de desempenho. Como consequência, o projeto é sempre feito individualmente para cada vaso a ser construído.

O projeto de um vaso de pressão inclui não somente o seu dimensionamento físico para resistir à pressão e demais cargas atuantes, como também a seleção técnica e fabricação, detalhes de peças internas, materiais, e etc.

Devem ser considerados os aspectos de segurança contra acidentes na fabricação e na montagem do vaso, bem como possíveis prejuízos a terceiros, danos ecológicos, infrações de marcas e patentes, e etc. É garantido que todos estes aspectos sejam respeitados se o vaso adquirido tiver na sua contratação a exigência de no mínimo atender a todos os requisitos estabelecidos no código ASME.

O grande benefício de adquirir um equipamento seguindo os preceitos do Código ASME é a credibilidade que a empresa contratante possui na fabricação de um equipamento cuja garantia sobre o projeto e a qualidade é de responsabilidade do fabricante perante o Código ASME e as jurisdições vigentes.

**Palavras-chave:** vasos de pressão; projeto; Código ASME.

## **ABSTRACT**

In contrast to almost all other equipment, machinery, vehicles, objects and commonly used materials, most of the pressure vessels are no industries manufacturing line items. The vessels are commonly custom designed and built to meet in each case a particular purpose or to certain performance conditions. As a result, the design is always done individually for each vessel to be built.

The design of a pressure vessel includes not only its physical dimensions to withstand pressure and other loads acting, as well as the technical selection and manufacturing details of internal parts, etc.

Safety issues (aspects) against accident in the manufacture and assembly of the vessel should be considered, as well as possible damage to third parties, environmental damage, infringements of trademarks and patents, etc. It is guaranteed that all these aspects are respected if the pressure vessel ordered has the requirement of ASME certification in their hiring or at least meet all the requirements in ASME Code.

The great benefit of acquiring equipment following the precepts of the ASME Code is the credibility that the contractor company has in manufacturing equipment whose warranty on the project and the quality is manufacturer's liability to the ASME Code and the applicable jurisdictions.

**Keywords:** pressure vessels; design; ASME Code.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Simetria de tensão.....	14
Figura 2 – Tensão de membrana.....	15
Figura 3 – Membrana plana.....	16
Figura 4 – Raios.....	17
Figura 5 – Tensão de membrana num elemento diferencial.....	18
Figura 6 – Recipiente pressurizado.....	19
Figura 7 – Representação dos possíveis defeitos presentes na estrutura cristalina dos materiais metálicos, Engel and Klingele, 1981.....	24
Figura 8 – Tensão residual na solda.....	30
Figura 9 – Mudança de temperatura e pressão durante a soldagem (figura esquemática da AWS – American Welding Society).....	31
Figura 10 – Ilustração das categorias das juntas num vaso (A, B, C e D), conforme o ASME Sec. VIII Div.1.....	34
Figura 11 – Principais tipos de solda do casco e tampos (categoria A e B).....	35
Figura 12 – Soldas de junção de tampos ou transições com casco cilíndrico.....	40
Figura 13 – Representação da espessura de uma determinada parte do vaso.....	42
Figura 14 – Gráfico para determinação da PMTA e da Pressão de TH.....	44
Figura 15 – Desenho do vaso com dimensões em milímetros.....	49
Figura 16 – Sketch de soldagem do vaso.....	99
Figura 17 – Junta de topo para soldagem SL1, SC1 e SC2.....	100
Figura 18 – Tolerância para solda de chanfro.....	101
Figura 19 – Tolerâncias para Inspeção do Perfil do Tampo (Desvio Máximo no Perfil).....	112
Figura 20 – Desvio de Profundidade do Tampo para Maior.....	112
Figura 21 – Desvio de Profundidade do Tampo para Menor.....	112
Figura 22 – Pontos de Verificação da Espessura.....	113
Figura 30 – Chanfro V.....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela A – Lista de Documentos para o Manual de Controle da Qualidade.....	12
Tabela B – Eficiência de soldas, conforme ASME Sec. VIII Div.1.....	35
Tabela C – Tipos de soldas (UW – 12).....	37
Tabela D – Parâmetros de projetos.....	50
Tabela E – Carregamentos do vaso de acordo com a UG-22 (DCC).....	54
Tabela F – Material e espessuras mínimas e nominais dos elementos do vaso.....	55
Tabela G – Tensões admissíveis dos materiais do vaso.....	55
Tabela H – Juntas soldadas do costado e dos tampos.....	55
Tabela I – Pressões hidrostáticas em cada elemento do vaso.....	57
Tabela J – Análise da MDMT.....	58
Tabela K – Pesos para cálculo da espessura mínima acima da linha de suporte....	62
Tabela L – Pesos para cálculo da espessura mínima abaixo da linha de suporte....	62
Tabela M – Tensões de compressão admissíveis do costado.....	62
Tabela N – Pesos para cálculo da espessura mínima.....	71
Tabela O – Tensões de compressão admissíveis da parte reta.....	72
Tabela P – Pesos para cálculo da espessura mínima.....	83
Tabela Q – Tensões de compressão admissíveis da parte reta.....	83
Tabela R – Análise do tratamento térmico.....	96
Tabela S – Trecho do Plano de Inspeção e Teste.....	110
Tabela T – Tolerâncias Máximas permitidas no Perímetro.....	113
Tabela U – Tolerâncias de Desvios de Altura dos Tampos.....	114
Tabela V – Tolerâncias dos Chanfros. ....	114
Tabela X – Tolerâncias de fabricação.....	119

### **Tabelas ASME:**

Tabela 1-4.1 Valores do Fator K.....	74 / 86
Tabela UG-37 Valores de Raios Esféricos do Fator K <sub>1</sub> .....	75 / 87
Tabela UG-33.1 Valores do fator K <sub>o</sub> para tampos elipsoidal com pressão externa.....	80 / 92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TERMO	DEFINIÇÃO
AI	Inspetor Autorizado
AIA	Agência de Inspeção Autorizada pelo ASME ou Agência de Inspeção Autorizada acreditada pelo <i>National Board</i> , apenas para Reparos e Alterações.
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
ASNT	Sociedade Americana de Ensaio Não Destrutivos
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
CQ	Controle da Qualidade
Código	<i>ASME Code Section VIII Division 1</i> , incluindo todos os Códigos e Normas de referência
DCC	Declaração de Cargas Consideradas
END	Ensaio Não Destrutivo
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
EV	Ensaio Visual
Item do Código	Qualquer vaso de pressão ou suas partes sob os requisitos do Código e este Manual
LM	Lista de Materiais.
LP	Ensaio por Líquido Penetrante
Material do Código	Material que é utilizado na construção das partes pressurizadas (incluindo os acessórios) de um Item do Código
MDMT	Temperatura Mínima de Projeto do Metal
MDR	<i>Manufacturer's Data Report</i>
NBIC	<i>National Board Inspection Code</i>
PIT	Plano de Inspeção e Teste
PEMTA	Pressão Externa Máxima de Trabalho Admissível
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
RNC	Relatório de Não Conformidade
RQOS	Registro de Qualificação de Operadores de Soldagem
RQPS	Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem
RQS	Registro de Qualificação de Soldadores
RX	Ensaio Radiográfico
TTAT	Tratamento Térmico para Alívio de Tensões
UT	Ultra-som

## SUMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 OBJETIVOS.....	5
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	5
<b>1.1.2 Objetivo Especifico</b> .....	5
1.2 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DO TRABALHO.....	5
<b>2 VASOS DE PRESSÃO</b> .....	6
2.1 DEFINIÇÃO.....	6
2.2 CERTIFICAÇÃO ASME SECÇÃO VIII DIVISÃO 1, REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO.....	7
2.3 MANUAL DE CONTROLE DA QUALIDADE.....	10
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
3.1 TENSÃO DE MEMBRANA.....	13
<b>3.1.1 Tensão resultante</b> .....	14
3.1.1.1 Esforços de tensões de membrana.....	14
<b>3.1.2 Equações de equilíbrio</b> .....	15
3.1.2.1 Membranas Planas.....	15
3.1.2.2 Membranas de Revolução.....	16
3.2 ELONGAÇÃO DE FIBRAS.....	20
<b>3.2.1 Conformação de Tampos</b> .....	20
<b>3.2.2 Conformação de Costado</b> .....	22
<b>3.2.3 Teoria da deformação plástica dos metais: Encruamento</b> .....	23
<b>3.2.4 Conformabilidade dos metais</b> .....	25
3.3 MATERIAIS.....	26
<b>3.3.1 Aço Carbono</b> .....	27
3.4 TTAT – TRATAMENTO TÉRMICO PARA ALÍVIO DE TENSÃO.....	29
<b>3.4.1 Análise das Tensões Residuais</b> .....	31
3.5 EFICIÊNCIA DE JUNTA.....	33
<b>3.5.1 Eficiência de juntas para ASME Sec. VIII Div.1</b> .....	34
<b>3.5.2 Soldas nos cascos Cilíndricos</b> .....	38
<b>3.5.3 Soldas nos cascos esféricos e tampos semi-esféricos</b> .....	39

<b>3.5.4 Soldas nos tampos semi-elípticos e toriesféricos</b> .....	39
<b>3.5.5 Soldas nos tampos e transições cônicas</b> .....	39
<b>3.6 ANÁLISE DE MAWP (PMTA)</b> .....	40
<b>3.6.1 Conceito de MAWP (PMTA)</b> .....	41
<b>3.6.2 Entendendo a finalidade do Teste Hidrostático e sua Pressão</b> .....	43
<b>3.6.3 Comparação entre Pressão de Operação, Pressão de Teste e PMTA</b> .....	43
<b>4 PREMISSAS DE PROJETO</b> .....	46
<b>4.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO OU DE OPERAÇÃO DO VASO</b> .....	46
<b>4.2 PROJETO DE PROCESSO DO VASO</b> .....	46
<b>4.3 PROJETO MECÂNICO DO VASO</b> .....	47
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
<b>5.1 PARÂMETROS DE PROJETO</b> .....	50
<b>5.2 SOFTWARE</b> .....	51
<b>5.3 DADOS INICIAIS DE PROJETO</b> .....	52
<b>5.4 ESPESSURA MÍNIMA (CONDIÇÕES OPERACIONAIS)</b> .....	52
<b>5.5 CONFORMAÇÃO DOS TAMPOS (ESMAGAMENTO)</b> .....	52
<b>5.6 CARREGAMENTO DE PROJETO (DCC- DECLARAÇÃO DE CARGAS CONSIDERADAS)</b> .....	53
<b>5.7 MATERIAIS</b> .....	54
<b>5.8 EFICIÊNCIA DE JUNTA</b> .....	55
<b>5.9 PIT (PLANO DE INSPEÇÃO E TESTE)</b> .....	56
<b>5.10 PRESSÃO HIDROSTÁTICA NAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E TESTE</b> .....	56
<b>5.11 SUMÁRIO DA VERIFICAÇÃO DA MDMT</b> .....	57
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	59
<b>6.1 CÁLCULO DA ESPESSURA DE COSTADO CILÍNDRICO</b> .....	59
<b>6.1.1 Pressão Interna</b> .....	60
<b>6.1.2 Pressão Externa</b> .....	66
<b>6.2 CÁLCULO DA ESPESSURA PARA TAMPOS ELIPSOIDAL 2:1</b> .....	68
<b>6.2.1 Tampo Superior</b> .....	70
<b>6.2.1.1 Pressão Interna</b> .....	70
<b>6.2.1.2 Pressão Externa</b> .....	79

<b>6.2.2</b>	<b>Tampo Inferior</b> .....	81
6.2.2.1	Pressão Interna.....	82
6.2.2.2	Pressão Externa.....	91
6.3	<b>SUMÁRIO DO TESTE HIDROSTÁTICO</b> .....	93
<b>6.3.1</b>	<b>Pressão do teste: Teste baseado na pressão de projeto de acordo ao UG-99(b)</b> .....	94
6.4	<b>APLICAÇÃO DE TTAT</b> .....	95
6.5	<b>SKETCH DE SOLDAGEM</b> .....	98
<b>6.5.1</b>	<b>Preparação do Chanfro</b> .....	100
<b>6.5.2</b>	<b>Junção tampo x costado e solda longitudinal de costado</b> .....	102
<b>6.5.3</b>	<b>Procedimento qualificado baseado no código ASME</b> .....	107
<b>6.5.4</b>	<b>Cuidados e controles durante a soldagem</b> .....	108
6.6	<b>APLICAÇÃO DO PIT</b> .....	110
6.7	<b>ESTAMPAGEM DO CÓDIGO E DATA REPORTS</b> .....	123
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	124
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	125

## 1 INTRODUÇÃO

Os vasos de pressão são chamados de “equipamentos de processos”. E denominam-se assim os *“equipamentos em indústrias de processo, que são as indústrias nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas, ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

*“Estes equipamentos são recipientes de pressão onde há uma pressão diferencial entre o meio externo e interno, sendo a pressão interna geralmente mais elevada do que a externa, com exceção de alguns casos isolados. O líquido dentro do recipiente pode ser submetido a uma mudança de estado, como no caso das caldeiras de vapor, ou podem combinar-se com outros reagentes, como no caso de um reator químico”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005).

Deve-se ter em mente que a ruptura de um vaso de pressão tem um potencial para causar tanto danos físicos quanto danos materiais. Segurança das instalações e integridade são preocupações fundamentais no projeto do vaso de pressão e isto depende da adequação dos códigos de projeto.

O tamanho e forma geométrica de vasos de pressão variam muito, sendo que os vasos de pressão são geralmente esféricos ou cilíndricos, com tampos abaulados.

*“O código American Society of Mechanical Engineers (ASME), para Vasos de Pressão, Código Seção VIII Divisão 1, especifica um intervalo de pressões internas”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005).

Vasos de pressão como componentes de uma planta são projetados para atender vários requisitos determinados pela Engenharia, que é o responsável pela concepção global. O primeiro passo no processo de concepção consiste em seleccionar as informações pertinentes necessárias, estabelecendo desta forma um corpo de requisitos de concepção. Uma vez que os requisitos foram estabelecidos, os materiais adequados foram seleccionados e o código de projeto especificado, é concebido o projeto do vaso de pressão, com o cálculo das tensões e o dimensionamento da espessura do vaso.

*“O projeto é um compromisso entre a consideração de economia e segurança. Os possíveis riscos de um determinado modo de falha e suas*

*conseqüências são equilibrados contra o esforço necessário para a sua prevenção, o projeto resultante deve alcançar um adequado nível de segurança a um custo mínimo”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005).

Os vasos de pressão podem ser classificados de acordo com a gravidade de suas operações.

O Desenvolvimento de códigos de construção de vasos de pressão, ocorreu devido a explosões de muitas caldeiras no início do século XX. Isto levou à “*promulgação do primeiro código para construção de caldeiras de vapor pela Commonwealth of Massachusetts, em 1907. Este posteriormente resultou no desenvolvimento e publicação do Código ASME para Vasos de Pressão e Caldeira, em 1914, que procurou padronizar o projeto, fabricação e inspeção de caldeiras e vasos de pressão. Em 1921 o National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NBIC), foi organizado para promover inspeção e testes nestes equipamentos. Além de ser desenvolvido para realizar a administração e aplicação uniforme das regras do Código ASME. A publicação da seção sobre caldeiras de locomotivas também apareceu em 1921. Em 1924 foi desenvolvido o ASTM (American Society for Testing and Materials), para a especificação do material. A primeira publicação da Seção VIII, Vasos de Pressão Unfired, foi desenvolvida em 1925”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005). Este documento faz referência a um fator teórico de segurança considerado elevado. Sendo assim, a indústria do petróleo não considerou ser adequada para os seus fins, além de desejar uma melhor utilização dos materiais disponíveis. O ano de 1928 viu o advento de vasos de pressão soldados, para as pressões mais elevadas destes reservatórios soldados, que foram fabricados com espessuras maiores do que 70 mm, com a necessidade de realização de Ensaio Não Destrutivo (END) durante a fabricação. Em 1934, uma junta formou o Comitê API-ASME (American Petroleum Institute and American Society of Mechanical Engineers) e publicou a primeira edição do Pressure Unfired especificamente para a indústria de petróleo. Em 1952, o comitê fundiu-se gerando um único código para vasos de pressão ASME Unfired, a Seção VIII. No final dos anos de 1960, o código ASME foi findado para a Seção VIII Divisão 1 para “Vasos de Pressão”, indicando as Regras para a Construção. Explosões de vasos de pressão são raras hoje em dia e muitas vezes são causados por operação incorreta, ou por falta de manutenção (não controle da corrosão), ou por projeto e/ou fabricação realizado de forma inadequada.

O código ASME é o mais difundido no mundo da engenharia para fabricação e reparo de vasos de pressão e, especificamente, o ASME Section VIII Division 1 & 2, são os mais utilizados no Brasil e no mundo. No desenvolvimento deste trabalho a norma estudada é o código ASME Section VIII Division 1, e a edição (Ed) mais recente adotada é a 2010, Adenda (Add) 2011.

O código ASME tem como finalidade estabelecer regras seguras para projeto e fabricação, apresentando metodologia e critérios para dimensionamento, fabricação, realização de exames não destrutivos, além de materiais aplicáveis com respectivas tensões admissíveis.

Periodicamente os códigos são submetidos a revisões e novas edições para incorporarem novos tópicos e alterações decorrentes de avanço tecnológico.

A empresa fabricante é a responsável pelo cumprimento das regras do Código, pela demonstração do cumprimento das equações, quando tais equações são obrigatórias no Código.

Segundo o código ASME Section VIII Division 1 (Ed. 2010, Add 2011), *“o Código não é um livro, portanto não há pretensão que este seja usada como um guia de projeto. Este código contém os requisitos obrigatórios, proibições específicas e orientação para atividades de construção. Mas não aborda todos os aspectos destas atividades e os aspectos que não são especificamente dirigidos não devem ser considerados proibidos”*.

Buscando credibilidade para o mercado, o código exige a Declaração da Política e Autoridade na Empresa, lançando para o mercado a Certificação para Fabricação e Reparo em Equipamentos, o Selo ASME. Com isso, a empresa detentora do certificado garante a qualidade em atendimento a todas as exigências para a fabricação e reparo de equipamentos conforme o código ASME certificado, podendo estampar o equipamento com o Selo ASME. No caso de vasos de pressão, o código ASME Section VIII Division 1 atende a quase todas as necessidades do mercado brasileiro. Todos os passos para a fabricação de um vaso selado deverá ter rastreabilidade total, com acompanhamento e autorização dos setores de Engenharia e Controle da Qualidade.

O National Board Inspection Code (NBIC) é o órgão responsável por acompanhar e certificar, através do AI (Authorized Inspector), que a empresa fabricante realizou os trabalhos conforme a exigência do código ASME e jurisdições vigentes.

A conquista do selo exige um trabalho de preparação qualificatório da empresa e de seus funcionários, atentando-os sobre a responsabilidade Civil e Criminal ao qual o fabricante se submeterá para ser um representante oficial do código ASME no mercado.

Segundo a exigência do código, a Declaração da Política e Autoridade na Empresa diz que *“a empresa deverá estar totalmente comprometida em atender, no mínimo, todos os requisitos do Código ASME de Vasos de Pressão e aos requisitos do Sistema de Controle da Qualidade descritos no Manual de Controle da Qualidade, para construção e montagem no campo de vasos de pressão, incluindo suas partes, de acordo com o Código em questão”* (ASME Code Section VIII, Division 1).

Os reparos na fábrica e no campo e alterações em itens de retenção de pressão serão executados de acordo com o código National Board e requisitos de Jurisdição.

Todos os funcionários são responsáveis por executar suas tarefas de acordo ao Manual de Controle da Qualidade aprovado na certificação e o Código ASME. O setor de Controle da Qualidade (CQ) é responsável por preparar, revisar e distribuir cópias do Manual de Controle da Qualidade e por administrar e implementar a verificação no Sistema da Qualidade na fábrica e em campo.

O setor de CQ deve possuir autoridade, responsabilidade e liberdade organizacional para identificar problemas de Controle da Qualidade, iniciar, recomendar e providenciar suas soluções e verificar o andamento das mesmas.

São indispensáveis que sejam devidamente considerados todos os aspectos de segurança em equipamentos cuja operação apresente risco potencial de acidentes. Deve, também, ser considerada a segurança contra acidentes na fabricação e na montagem do vaso, bem como possíveis prejuízos a terceiros, danos ecológicos, infrações de marcas e patentes, e etc. É garantido que todos estes aspectos sejam respeitados se o vaso contratado tiver a exigência do selo na sua contratação. O custo para fabricação de um vaso selado é maior do que um vaso não selado, na aquisição do equipamento. A compensação é que o valor do seguro de um equipamento selado é muito inferior ao de um equipamento não selado. Sendo que o valor de um seguro é muito maior do que o custo de contratação de uma fabricação. Mas além da vantagem financeira, o grande benefício em adquirir um equipamento selado é a credibilidade que a empresa

contratante possui na fabricação de um equipamento cuja garantia sobre a qualidade é total e de responsabilidade do fabricante perante o Código ASME e as jurisdições vigentes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Demonstrar os passos para a construção de um vaso de pressão utilizando a metodologia do código ASME Seção VIII Divisão.

### 1.1.2 Objetivo Especifico

O trabalho aborda os conceitos necessários para uma avaliação sobre o projeto e a fabricação de um vaso de pressão conforme as exigências do código ASME, indicando a exigência do código durante o processo de fabricação de um vaso de pressão.

## 1.2 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DO TRABALHO

Este trabalho de final de curso tem um caráter relevante ao entendimento dos fatores ou aspectos que influenciam na fabricação de um vaso de pressão conforme o código ASME. Um histórico desses fatores e/ou aspectos propicia um melhor entendimento sobre a necessidade de utilização do código para fabricação de um equipamento, utilizando todos os controles rastreáveis a fim de evitar possíveis danos e riscos para a vida humana, além de prejuízos financeiros. Neste trabalho é considerado o estudo das teorias com a aplicação prática no conjunto casco/tampas do vaso.

A principal contribuição teórica está nos parâmetros necessários para a fabricação de um vaso de pressão pelo código ASME, ao qual indica a responsabilidade ao qual o fabricante tem perante o código e as jurisdições vigentes, assegurando um equipamento fabricado com confiabilidade e rastreabilidade sobre o processo.

## 2 VASOS DE PRESSÃO

### 2.1 DEFINIÇÃO

*“Projeto de engenharia é uma atividade para garantir a competência para realização de uma fabricação. Dentro do contexto da concepção dos recipientes sob pressão se envolve principalmente as considerações de resistência dos materiais”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005). O projeto é um tema com amplas ramificações.

*“O papel da engenharia mecânica no processo de concepção do recipiente sob pressão é o de proporcionar uma descrição das peças de pressão dos vasos e dos materiais em termos de modelos matemáticos que podem ser analisadas de forma consistente, num número limitado de casos e na maior parte tem que ser resolvida numericamente”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005).

Não há um material perfeitamente adequado para vasos de pressão em todos os ambientes, mas a seleção do material deve coincidir com a aplicação e o ambiente ao qual o equipamento irá atuar.

Grandes melhorias, ampliações e desenvolvimentos em análise de tensão analítica e experimental estão permitindo uma maior valorização das propriedades dos materiais.

*“Concentrações de tensão nas aberturas dos vasos, anexos e materiais soldados são de primordial importância no projeto e fabricação, e métodos para minimizá-los através de projetos de melhor qualidade e análises, são as chaves para uma vida longa de um vaso de pressão. Controle de detalhes de construção apropriados resulta em um vaso de concepção equilibrada”* (Chattopadhyay, Pressure Vessel Design and Practice, 2005).

*“Os vasos de pressão representam em média 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

Os vasos de pressão são divididos em duas classes, como:

Vasos não sujeitos a chama:

- Vasos de armazenamento e de acumulação;

- Torres de destilação fracionada, retificação, absorção, e etc;
- Reatores diversos;
- Esferas de armazenamento de gases;
- Trocadores de calor.

Vasos sujeitos a chama:

- Caldeiras;
- Fornos.

Os componentes principais dos vasos de pressão são:

- Casco (Shell) em formas de cilindros e esferas;
- Tampos (Heads) em formatos hemisféricos, elípticos, cônicos e toriesféricos;
- Flanges, reduções, bocais, anéis e sapatas.

## 2.2 CERTIFICAÇÃO ASME SECÇÃO VIII DIVISÃO 1, REGRAS PARA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

Com as seguidas tragédias no início do século XX, foram criadas regras para fabricação de caldeiras e vasos de pressão. Mas havia a necessidade de unificação destas regras, haja vista que cada estado e cidade utilizavam os seus métodos para construção.

*“Foi então que surgiram as adições para o código ASME na seguinte condição”*  
(Chuse, Unfired Pressure Vessel, 1960):

Section I: Power Boilers (1914);

Section II: Material Specifications (1924);

Section III: Boilers of Locomotives (1921);

Section IV: Low Pressure Heating Boilers (1923);

Section V: Miniature Boilers (1922);

Section VI: Inspection (1924);

Section VII: Suggested Rules for Care of Power Boilers (1926);

Section VIII: Unfired Pressure Vessels (1925);

Section IX: Welding Qualifications (1940).

O Código ASME Secção VIII Divisão 1, como dito anteriormente, é o código de maior aplicação no Brasil. Mas *“estabelece regras apenas para dimensionamento dos componentes principais, como casco, tampos, reduções, flanges e reforços, submetidos à pressão interna e/ou externa. Outros carregamentos, como carga de*

*vento e sísmicas, peso próprio e do conteúdo, esforços localizados em suportes soldados no equipamento ou em bocais, cargas cíclicas devido a flutuações de pressão e temperaturas, gradientes e expansões térmicas, devem ser consideradas pelo setor de Engenharia. Porém o código não estabelece metodologia para esta avaliação, mas também não restringe o setor de Engenharia de desenvolver ou utilizar outro método ao qual o ASME não responde”* (Falcão, Projeto Mecânico de Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos, 2008).

Apesar de prever flutuações de pressão e temperatura, não apresentam critérios para análise de fadiga nesta divisão.

Esta norma é limitada a pressões interna, máxima de 20,685 MPa e mínima de 103 kPa, ou pressão externa máxima de 103 kPa. Tem como critério de projetos a teoria da “máxima tensão admissível”. Apresenta critérios e tabelas para obtenção de tensões admissíveis de tração e curvas para tensões admissíveis de compressão, como apresentado no ASME Section II.

*“Pela grande utilização dos códigos ASME, no Brasil, todas as especificações de materiais, são feitas com base nas especificações ASME Section II Part A – Materials – Ferrous Materials, ASME Section II Part B – Materials – Nonferrous Materials e ASME Section II Part D – Materials – Properties”* (Falcão, Projeto Mecânico de Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos, 2008). Os materiais destas especificações são iguais ou muito similares aos materiais ASTM (American Society for Testing and Materials) que podem ser utilizados desde que sejam exatamente iguais aos materiais ASME, ou quando houver alguma diferença, o fabricante deverá requalificar conforme as exigências do ASME.

*“Os equipamentos, em geral, são projetados para determinada vida útil, dependendo da sua classificação, que considera o custo, tipo de equipamento e sua importância para a instalação em que opera, além da corrosão, devida à perda de espessura, e que no projeto mecânico é compensada com a sobre-espessura para corrosão”* (Falcão, Projeto Mecânico de Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos, 2008).

O código somente trata de dimensionamento para pressões nos componentes principais, não apresentando métodos para computação e avaliação, nestes componentes, das tensões resultantes de esforços localizados tais como cargas nos suportes de sustentação (saias, pernas, selas, sapatas ou anéis), cargas em

suportes de acessórios (tubulações ou plataformas) e cargas em bocais devido aos esforços de tubulação.

O código também estabelece uma metodologia para obtenção de Temperatura Mínima de Projeto (MDMT), para evitar fratura frágil, em função da tensão atuante, das espessuras requerida e nominal, da corrosão e do material.

A fabricação de vasos de pressão conforme a Certificação no código ASME Section VIII Division 1, com a estampagem do selo U de fabricação, remete ao fabricante todos os requisitos obrigatórios na Norma e no Manual de Controle da Qualidade, referentes a engenharia, planejamento e qualidade, como:

- Fabricante autorizado pelo ASME a fabricar vasos de pressão (Certificação ASME);
- Manual de Controle da Qualidade em conformidade com o Código;
- Especificação do material quanto a aplicação do vaso;
- DCC (Declaração de Cargas Consideradas) preenchidas pelo cliente;
- Cálculo de espessuras (tampo e costado) com dimensionamento de soldas;
- Conexões e Acessórios com dimensionamento de soldas;
- Carga de vento;
- Pernas de sustentação (sapatas);
- Plano de Inspeção e Teste (PIT);
- Plano de soldagem (EPS/RQPS, processo de soldagem, consumíveis, nomenclatura);
- Total rastreabilidade sobre todas as etapas do trabalho, com o acompanhamento e autorização dos setores de Engenharia e Controle da Qualidade do fabricante;
- Inspeção formal realizada por um Inspetor Autorizado pelo ASME (AI, Authorized Inspector) durante a fabricação e teste do equipamento;
- A realização de um relatório (Manufacturer's Data Report) de acordo com os formulários e instruções do apêndice W da norma;
- A estampagem do Selo U de fabricação do vaso de pressão.

## 2.3 MANUAL DE CONTROLE DA QUALIDADE

*“A partir da edição de 1977 do código ASME Section VIII Div.1, foram introduzidos apêndices de uso obrigatório regulamentando o denominado Sistema de Controle da Qualidade (Mandatory Appendix 10). Esse apêndice contém uma série de prescrições, principalmente de caráter organizacional e administrativo, a que os fabricantes e montadores de vasos de pressão devem obedecer, para que os vasos por eles produzidos tenham uma garantia da qualidade satisfatória” (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).*

*“O apêndice 10 é obrigatório para a construção de um vaso de pressão”, de acordo ao código ASME seção VIII, portanto, é indispensável que essas prescrições sejam atendidas integralmente para um vaso construído.*

O Fabricante deve ter um sistema de controle da qualidade estabelecendo que todos os requerimentos do Código, incluindo materiais, projeto, fabricação, inspeção, serão atendidos.

O Sistema de Controle da Qualidade deve ser igualmente atendido para trabalhos na Fábrica e no Campo, sendo que deverá ser descrito e aceito pelo AI. A descrição poderá ser feita como um Manual de Controle da Qualidade.

O Manual deverá descrever a autoridade e responsabilidade daqueles que possuem cargos de liderança no sistema de controle da qualidade. Tais pessoas devem ter liberdade organizacional no sistema para identificar problemas e recomendar soluções. Além de descrever o organograma da Empresa, mostrando as relações entre gerências e engenharia, compras, fabricação, inspeção e controle da qualidade.

Segundo o “Appendix 10 do código ASME Section VIII Div.1”, diz que *“o Manual deve assegurar que as últimas edições de desenhos, cálculos, especificações e instruções, requeridas pelo Código, são utilizadas pelo Fabricante, e que os códigos são, periodicamente, submetidos a revisões (ou adendas) e novas edições para incorporarem novos tópicos e alterações decorrentes de avanço tecnológico, sendo o setor de CQ o responsável pela substituição das Adendas que são emitidas em folha solta para substituição específica da página a qual sofreu revisão”.*

Deve também incluir no manual uma sistemática de controle de recebimento, identificação de materiais, estocagem, e assegurar que somente materiais aprovados sejam utilizados em trabalhos sob o Código.

O Manual deverá conter Procedimentos que descrevam os documentos de fabricação, planos de inspeção, sequência de montagem, o tratamento das não conformidades, disposições, segregação de material, planos de soldagem, procedimentos de soldagem, qualificação e identificação dos soldadores, materiais para solda, controle dos materiais para soldagem, o sistema de aplicação dos END, qualificação da equipe, acompanhamento pelo inspetor autorizado, arquivo de relatórios e documentos, procedimento que assegure empresa qualificada para Tratamento Térmico com registros aprovados por pessoal competente, procedimento que descreve como é feita o controle de instrumentos de medição, procedimento que descreve como é o sistema de arquivamento das radiografias, e documentos do vaso construído.

O manual também deverá informar a relação de formulários usados no sistema de controle da qualidade.

Segue abaixo a Tabela A como um exemplo de “Lista de Documentos” necessária para o Manual de Controle da Qualidade, onde constam todos os documentos pertinentes a rastreabilidade de todo o processo de fabricação exigidos no Código ASME:

<b>Doc Nº</b>	<b>Lista de Documentos</b>	<b>Revisão</b>
1	Declaração de Cargas Consideradas	00
2	Análise Crítica do Contrato	00
3	Solicitação de Materiais, Compras e Serviços - ASME	00
4	Plano de Inspeção e Testes (PIT)	00
5	Placas de Identificação do National Board para Reparo e Alteração	00
6	Software para Cálculo de Vasos de Pressão	00
7	Placa de Identificação ASME – Selo “U”	00
8	Etiquetas para Identificação de Materiais	00
9	Apontamento do Nível III de END	00
10	Lista de MN, PRs e ITs.	00
11	Guia de Remessa de Documentos	00
12	Distribuição e Controle das Revisões	00
13	Controle de Registros no National Board	00
14	Controle de Registros de Reparos e Alterações no National Board.	00
15	Relatório de Estudo de Edições / Adendas	00
16	Relatório de Não-Conformidade	00
17	Lista de Materiais	00
18	Relatório de Inspeção de Recebimento de Materiais	00
19	Plano de Soldagem	00
20	Lista de Soldadores e Operadores de Soldagem Qualificados	00
21	Manutenção da Qualificação de Soldadores e Operadores de Solda	00
22	Controle de Inspeção de Juntas Soldadas	00

Tabela A – Lista de Documentos para o Manual de Controle da Qualidade.  
 Fonte: MKS Caldeiraria Indústria e Comércio

O objetivo do manual é direcionar a empresa e os funcionários sobre como prover um processo de fabricação desde o orçamento até a entrega final do produto, com todos os requisitos exigidos no Código e jurisdições. No caso da empresa ser certificada no selo ASME para fabricação, o manual também facilita para o Inspetor Autorizado ASME a inspeção do vaso e os documentos que garantam a rastreabilidade sobre todo o processo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 TENSÃO DE MEMBRANA

O estudo da tensão de membrana é a base do cálculo para espessura de tampos e costado. Apesar de descrever os tipos de tampos e costados que podem estar presentes em um vaso de pressão, o enfoque será o cálculo de tampos elípticos e costado cilíndrico, sem nenhum tipo de transição nas seções, ou seja, seções homogêneas.

A teoria que rege a ideia do balanceamento dos esforços presentes em um vaso de pressão é chamada de teoria de membrana. Na maioria dos casos, *”os resultados obtidos a partir dessa teoria são bastante satisfatórios no que diz respeito ao equilíbrio dos esforços nesses equipamentos”*. (JAWAD, Design of Plate & Shell Structures ASME Press, 2004)

O conceito de membrana usualmente é aplicado para vasos de pressão de parede fina, reservatórios, paredes pressurizadas, entre outros.

A teoria de membrana assume que *“o equilíbrio de esforços em um casco é atingido considerando a existência de uma membrana interna (sem espessura) cuja rigidez a flexão é muito pouco significativa quando comparada a rigidez da membrana, por isso as tensões de flexão podem ser desprezadas em relação às tensões de membrana. Essa teoria obtém resultados precisos desde que os esforços atuantes sejam distribuídos ao longo da área de atuação nos cascos como pressão e cargas de vento, não sendo aplicado a cargas pontuais”* (MARCZAK, Introdução à Teoria de Membranas, 1999).

É possível se observar na Figura 1 que o esforço atuante está distribuído ao redor da superfície de maneira homogênea e que a espessura do sólido, quando comparado ao diâmetro e comprimento se torna desprezível, essas condições são necessárias para transpor a teórica para aplicações práticas em vasos de pressão.

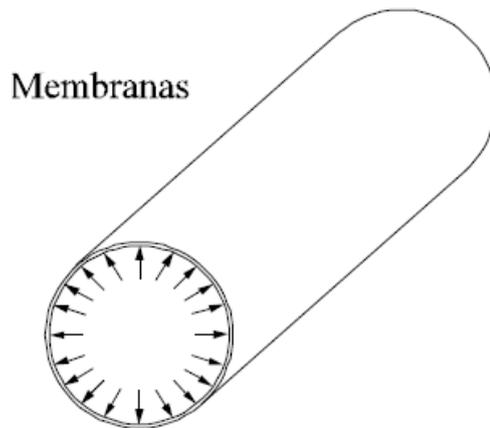


Figura 1 – Simetria de tensão.

Cascas finas ou membranas, como dito anteriormente, possuem duas dimensões (largura e comprimento) muito maiores que a terceira (espessura). Normalmente a relação de razão utilizada entre R/espessura é de 50 e 1000.

### 3.1.1 Tensão resultante

Tensões resultantes podem ser identificadas como as tensões usuais escritas por unidade de comprimento. De uma maneira geral as tensões resultantes “são obtidas integrando as tensões locais ao longo da espessura do corpo. Assim obtêm-se os esforços internos atuantes nas paredes da membrana” (MARCZAK, Introdução à Teoria de Membranas, 1999).

#### 3.1.1.1 Esforços de tensões de membrana

Para análise das tensões na membrana, os esforços adotados são provenientes de pressão interna (para membranas espaciais) e forças concentradas ou distribuídas no plano da membrana (Membranas planas).

$$N_{XX} = \int \sigma_{xx} dz; N_{yy} = \int \sigma_{yy} dz; N_{xy} = \int \sigma_{xy} dz \quad (1)$$

Como as tensões de membrana apresentadas na Figura 2 são constantes, não se faz necessário integra-las para obtenção dos resultados das mesmas, sendo assim:

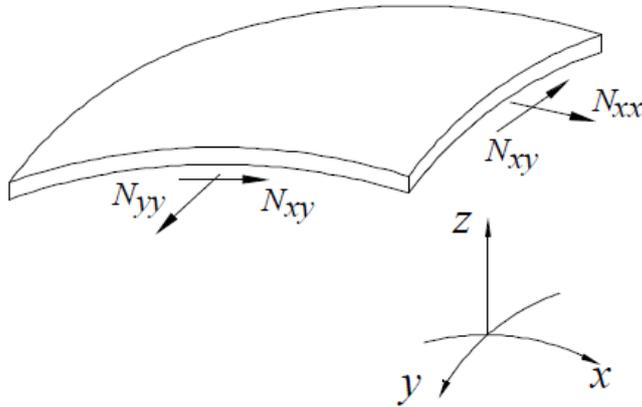


Figura 2 – Tensão de membrana.

Para análise das tensões na membrana, os esforços adotados são provenientes de pressão interna (para membranas espaciais) e forças concentradas ou distribuídas no plano da membrana (Membranas planas.).

Como as tensões de membrana apresentadas anteriormente são constantes, não se faz necessário integra-las para obtenção dos resultados das mesmas, sendo assim:

$$N_{xx} = \sigma_{xx}h; N_{yy} = \sigma_{yy}h; N_{xy} = \sigma_{xy}h \quad (2)$$

### 3.1.2 Equações de equilíbrio

As equações de equilíbrio serão deduzidas a partir da verificação do equilíbrio de elementos infinitesimais.

#### 3.1.2.1 Membranas Planas

Seja um elemento diferencial de dimensões  $d_x d_y$ , submetidos a forças de corpo  $B_x$  e  $B_y$ , como ilustrado na Figura 3.

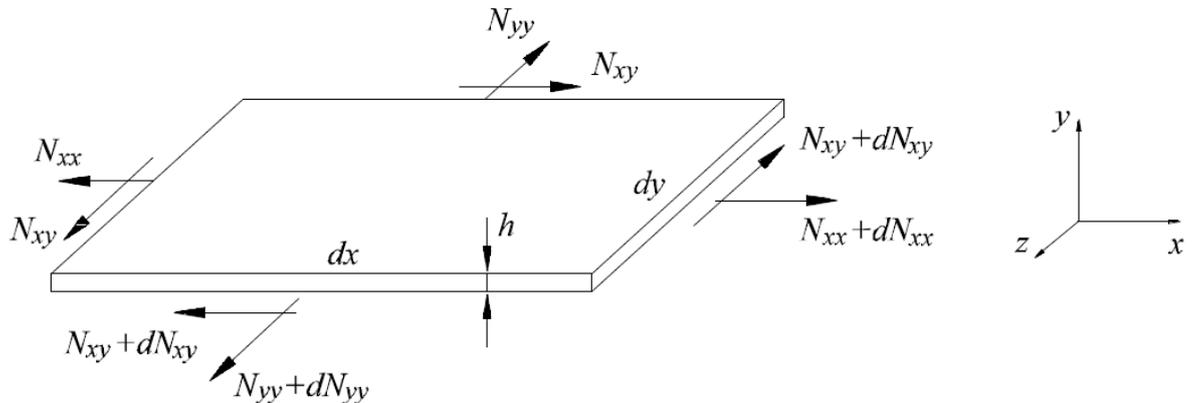


Figura 3 – Membrana plana.

Onde para o equilíbrio das forças em x e y observamos:

$$\sum F_x = (N_{xx} + dN_{xx})dy - N_{xx}dy + (N_{xy} + dN_{xy})dx - N_{xy}dx + b_x h dx dy = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_y = (N_{yy} + dN_{yy})dx - N_{yy}dx + (N_{yx} + dN_{yx})dy - N_{yx}dy + b_y h dx dy = 0 \quad (4)$$

Percebe-se a existência de tensões trativas e cisalhantes na superfície apresentada, sendo que o ponto chave o componente de expansão volumétrica que ocorre devido a atuação das forças, e estão representados pelos termos  $b_x h dx dy$ , para o equilíbrio em x e  $b_y h dx dy$  para o equilíbrio em y.

### 3.1.2.2 Membranas de Revolução

Membranas de Revolução “é o conceito mais relevante quando se trata de aplicação para vasos de pressão, que são elementos esféricos, cilíndricos ou cônicos. Sendo assim, sua geometria apresenta um ou dois raios de curvatura e um eixo de revolução. A partir do conceito de meridianos, secções produzidas em superfícies de revolução por planos que passam pelo eixo, e paralelos, secções produzidas em superfícies de revolução por planos perpendiculares ao eixo, se torna mais fácil utilizar a notação tensões referenciando-as aos eixos circunferencial (paralelos) e longitudinais (meridianos). De maneira análoga, a indicação de qualquer ponto fica definida utilizando os ângulos sobre esses eixos, sendo que o

ângulo  $\Theta$  indica a posição circunferencial, enquanto o ângulo  $\phi$  indica a posição longitudinal” (MARCZAK, Introdução à Teoria de Membranas, 1999).

Para os problemas propostos com sólidos de revolução que possuem esforços atuantes simétricos, pode-se resolvê-los utilizando a geratriz (meridiano), e o eixo de revolução, ou ainda pelos raios de curvatura da geratriz, onde  $R_m$  é o raio de um dado ponto na geratriz até o eixo de revolução (Perpendicularmente),  $R_\theta$  é o raio de curvatura local da geratriz no plano da geratriz.

A compreensão dos raios descritos acima se torna mais fácil visualizando a Figura .

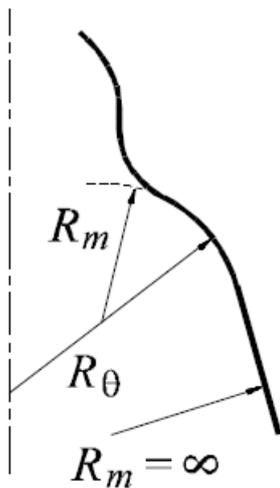


Figura 4 – Raios.

Ao analisarmos um elemento diferencial, ilustrado na Figura , submetido a uma pressão  $P$ , observa-se que, como os problemas que envolvem pressão em vasos de pressão são axissimétricos, apenas a tensão longitudinal,  $\sigma_{mm}$ , varia de uma aresta do elemento a outra, enquanto a tensão circunferencial,  $\sigma_{\theta\theta}$ , permanece constante para cada paralelo.

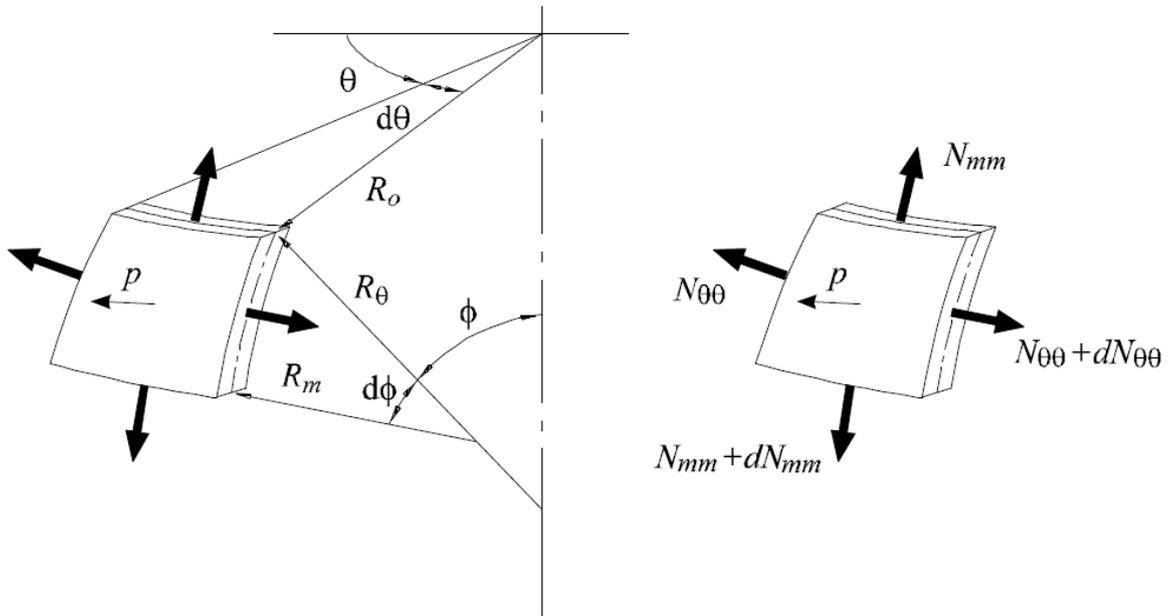


Figura 5 – Tensão de membrana num elemento diferencial.

Fazendo o balanceamento dos esforços, princípio já descrito para membranas planas, obtém-se a equação que relaciona as tensões entre si.

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{r_{\theta}} + \frac{\sigma_{mm}}{r_m} = \frac{p}{h} \quad (5)$$

Onde  $h$  é a espessura.

A relação descrita acima se chama equação de Laplace. Ela por si só, não é capaz de calcular o valor das duas tensões e por isso se faz necessário o uso de uma outra equação para determinação de uma delas, a exemplo da relação abaixo.

$$\sigma_{mm} = \frac{F}{2\pi h r_0 \sin \phi} \quad (6)$$

Determinando o valor de  $\sigma_{mm}$ , é possível usar a relação de tensões para determinar o valor de  $\sigma_{\theta\theta}$ .

A utilização dessas equações é ilustrada através de um exemplo para uma maior compreensão do funcionamento das mesmas. Exemplo este que pode ser encontrado no trabalho de MARCZAK, Introdução à Teoria de Membranas de 1999.

Exemplo: Determinar as tensões circunferenciais e meridionais em um reservatório esférico submetido à pressão interna. Ver figura 6.

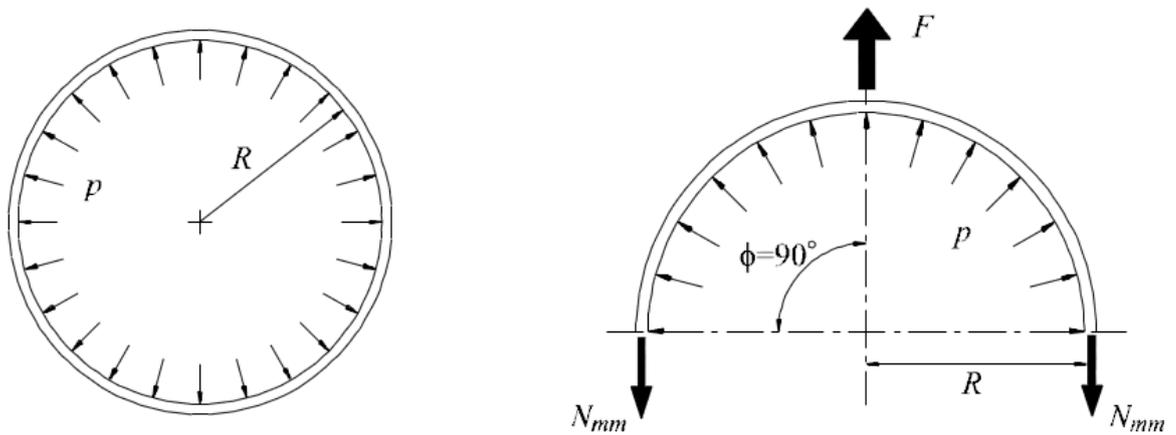


Figura 6 – Recipiente pressurizado.

Neste caso, tem-se que  $R_m = R_\theta = R_O = R$ .

Tomando-se metade da esfera, pode-se aplicar a equação de tensão longitudinal, onde:

$$\sigma_{mm} = \frac{F}{2\pi h R} \quad (7)$$

e como,

$$F = \pi R^2 p \quad (8)$$

Logo,

$$\sigma_{mm} = \frac{pR}{2h} \quad (9)$$

Substituindo o valor encontrado na equação que relaciona as tensões, conclui-se que:

$$\sigma_{mm} = \sigma_{\theta\theta} \quad (10)$$

Ressaltando que as tensões assumem valores iguais por conta do reservatório ser esférico. Para reservatórios cilíndricos tem-se:

$$\sigma_{mm} = \frac{pR}{2h} \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{pR}{h} \quad (12)$$

## 3.2 ELONGAÇÃO DE FIBRAS

*“A conformação de chapas, tubos, perfis e outros componentes compreende, entre outros, os processos de calandragem, prensagem, rebordeamento, dobramento, estampagem e curvamento, para a fabricação de corpos cilíndricos, cônicos e esféricos, seções de concordância, tampos de qualquer perfil, bem como peças internas e externas de vasos de pressão”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

Anterior ao entendimento sobre a elongação de fibras deverá ser entendido a conformação de chapas em costado e tampos de vasos de pressão.

### 3.2.1 Conformação de Tampos

Para a conformação de tampos de qualquer formato, o primeiro entendimento é a necessidade ou não de união de chapas para atingir o comprimento do tampo. No caso de *“tampos compostos de mais de uma chapa com solda em posição de secantes, deve-se, antes da conformação, proceder-se à soldagem completa das chapas entre si. Para tampos em gomos, com soldas em posição radial, o procedimento é inverso, fazendo-se primeiro a conformação da coroa central e dos gomos, depois a soldagem”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Já para o caso de *“conformação de tampos toriesférico de chapa inteira, ou com soldas apenas na posição secante, é feita pelo abaulamento ou prensagem da coroa central seguida do rebordeamento”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). O abaulamento é geralmente processado em uma prensa – ou um martelo de movimento lento – utilizando-se uma ferramenta hemisférica maciça para a conformação, sendo a chapa movimentada sob a ferramenta hemisférica maciça até que o abaulamento – com o raio da superfície esférica – esteja completado.

Após finalizada a conformação de qualquer parte do vaso, e antes da soldagem a outras partes, *“deve ser feita uma cuidadosa verificação dimensional para se certificar de que todas as dimensões e raios de curvatura, estejam conforme*

*estipulados no projeto*” (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Para esta verificação é muito útil a confecção de gabaritos para certificação das tolerâncias.

Deve-se observar que as tolerâncias de conformação devem ser mais ajustadas do que as tolerâncias dimensionais finais do vaso pronto, pois ainda ocorrerão desvios de forma devido às contrações de soldagem, e como consequência, de tratamentos térmicos e do teste hidrostático.

Qualquer processo de conformação pode ser executado a frio ou a quente.

A conformação a quente *“são as operações realizadas em temperatura acima da temperatura de recristalização”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Para o aço carbono, por exemplo, a temperatura de recristalização é cerca de 540°, sendo que de forma geral, para qualquer aço, a conformação a quente costuma ser feita em temperaturas entre 1000 e 1200 graus, exigindo um forno capaz de conter completamente a peça a ser aquecida. Este processo é obtido com menor esforço e, não há limite de deformação, sendo que causará a formação de carepas na maioria dos aços e a sensitização dos aços inoxidáveis. A conformação a quente é *“geralmente empregada em chapas de grande espessura (acima de 38 mm), tubos de grande diâmetro e, também, quando a resistência do material à deformação excede a capacidade do equipamento de conformação”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

A conformação a frio *“é mais simples, mais barata e permite maior precisão dimensional, sendo por isso empregada na maioria dos casos. Em compensação requer máquinas de maior potência e introduzem tensões residuais no material, o que pode exigir, em muitos casos, o Tratamento Térmico para Alívio de Tensões (o TTAT)”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Os casos em que o código ASME exige o TTAT, são:

1. Para aços carbono e aços baixa liga, sempre que a elongação da fibra mais distendida exceder 5%, nos casos de: vaso para serviços tóxicos; vasos de materiais que exijam teste de impacto; espessura da chapa superior a 16 mm antes da conformação; redução da espessura na conformação superior a 10%.
2. Para os carbono e aços baixa liga (exceto aços de alta resistência), o código permite uma elongação máxima de 40%, desde que não ocorra nenhum dos casos supracitados;

3. Para aços de alta resistência (seção UHT do código), o TTAT é exigido quando a elongação de fibra exceder 5%.

Há diferentes tipos de conformação de tampos, tipo: Tampos conformados em setores, que são tampos fabricados a frio e, de acordo as exigências do Código, deve ser realizado inspeções internas e externas; Tampos fabricados a partir de discos, que são tampos abaulados e prensados a frio ou a quente, fabricados a partir de discos com ou sem costura de solda, de acordo com as exigências do Código e deve ser utilizado tanto em inspeções internas como externas.

### 3.2.2 Conformação de Costado

*“Para a conformação de corpos cilíndricos a partir de chapas planas, utiliza-se máquinas chamadas calandras”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). As formas obtidas nas conformações são planificáveis para costados de vaso e tanto os raios de curvatura, como o comprimento de calandragem são, geralmente, muito superiores à espessura da chapa. As dimensões na planificação de um costado cilíndrico são obtidas considerando que a largura de calandragem não varia (deformação plana) e que a largura do planificado é igual ao perímetro da circunferência que passa na linha média da chapa (raio de curvatura  $\gg$  espessura linha neutra coincide com a linha média).

Para conformação das chapas as calandras possuem *“os rolos inferiores motrizes e o rolo superior que é livre, que devem ser deslocados na horizontal e na vertical, ajustando-se a máquina para a etapa de operação, e para a espessura da chapa e o diâmetro desejado”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

*“Antes de iniciar a calandragem, deve-se curvar as extremidades da chapa (as abas) para facilitar a passagem nos rolos e evitar que fiquem trechos planos”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Esta operação pode ser feita numa calandra, numa prensa, ou de forma manual. Um dos problemas principais durante esta fase é a deformação das abas do planificado com o raio de curvatura desejado para o costado. A deformação vai evoluindo de totalmente plástica para elástica, com zonas elastoplásticas intermédias, raio de curvatura cada vez maior, deixando de existir curvatura a partir da seção em que a deformação é totalmente recuperada pelo

efeito de mola. Deve-se chanfrar as bordas das chapas para evitar a formação de fissuras (especialmente para espessuras acima dos 25 mm).

Soluções para o problema da deformação das abas:

1. Numa calandra sem capacidade para deformar abas, a calandragem das abas poderá ser executada prévia ou posteriormente à calandragem por quinagem ou por martelagem;
2. Calandrar um costado com um comprimento superior ao pretendido e cortar as abas;
3. Dobrar as abas na calandra com o auxílio de um gabarito, também conhecido por “berço”, fabricado previamente em chapa espessa;
4. Utilizar calandras preparadas para a calandragem das abas, as quais permitem deslocamento dos rolos inferiores ou do superior.

*“A calandragem de chapas deve ser feita de preferência, e sempre que possível, na direção de laminação da chapa”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

### **3.2.3 Teoria da deformação plástica dos metais: Encruamento**

*“O fenômeno ao qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido a uma deformação plástica é o encruamento”* (CALLISTER, Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, 2004). Há implicações práticas dos mecanismos existentes com respeito à resposta de materiais aos esforços de conformação plástica. Sabe-se a estrutura cristalina dos metais apresentam diversos defeitos que dão características físicas e mecânicas para os metais. O esquema da figura 7 ilustra os tipos de defeitos que podem estar presentes na estrutura cristalina dos metais.

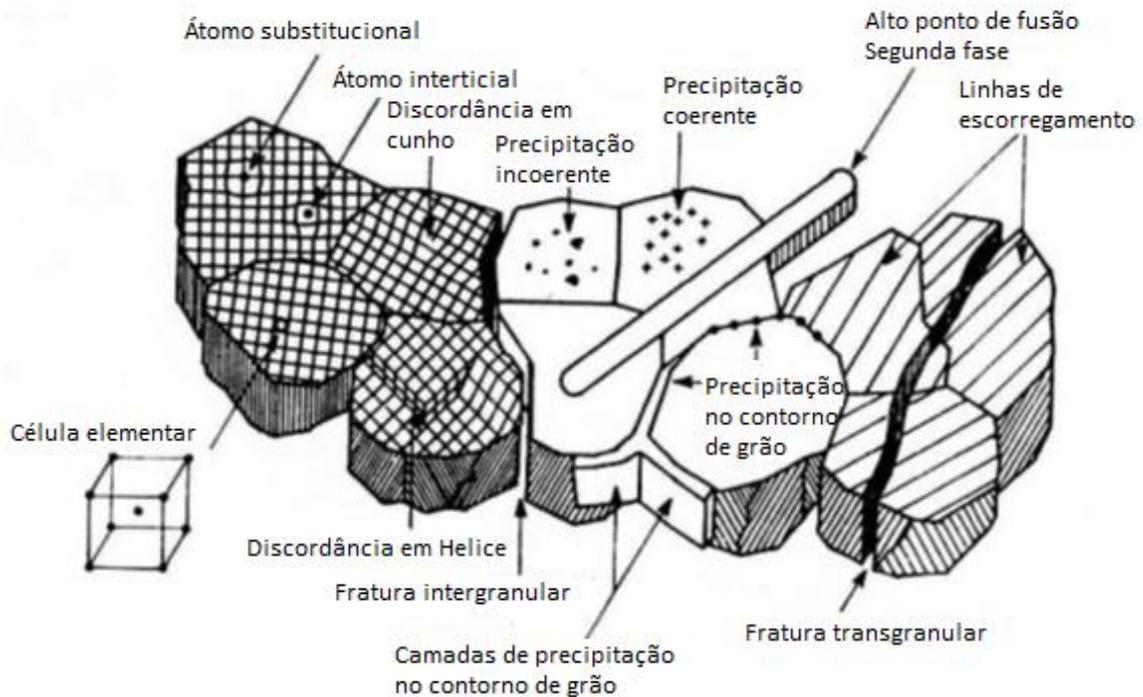


Figura 7 – Representação dos possíveis defeitos presentes na estrutura cristalina dos materiais metálicos, Engel and Klingele, 1981.

Os defeitos existentes, representados na figura 7, podem ser classificados como sendo defeitos pontuais (átomos de solução sólida substitucional ou intersticial), planares (contornos de grão) ou lineares (discordâncias).

O conceito das discordâncias arestas é que “*existem distorções localizadas na rede cristalina e ao longo da extremidade de um semiplano de átomo adicional*” (CALLISTER, Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, 2004). A discordância normalmente é representada por meio da linha de sua aresta.

Pode-se provar, por meio de cálculos matemáticos ou mesmo através de analogia, que a movimentação das discordâncias é feita a um nível de energia muito menor do que àquela necessária à ruptura dos metais. Além disso, cada discordância que se move, produz uma pequena deformação irreversível no metal (deformação plástica). Com a intensa movimentação de discordâncias, maior a deformação plástica experimentada pelo metal. Assim sendo, “*a deformação plástica corresponde ao movimento de grandes números de discordâncias*” (CALLISTER, Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, 2004).

Porém, durante a movimentação das discordâncias no interior de um material metálico, dois eventos ocorrem de modo a atrapalhar cada vez mais a

movimentação das discordâncias à medida que mais deformação plástica é imposta ao metal:

1. Intersecção das discordâncias com obstáculos (outras discordâncias, contornos de grão, precipitados, etc.);
2. Multiplicação do número de discordâncias.

Isto quer dizer que, à medida que a deformação plástica progride, é mais provável que as discordâncias em movimento encontrem obstáculos a sua movimentação, que será dificultada, e mais endurecido torna-se o metal.

Em termos práticos, isso se dá por meio de uma “*deformação plástica do metal a “frio” (o chamado encruamento)*” (CALLISTER, Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, 2004). Isso causa o aumento da quantidade (densidade) de discordâncias presentes, “*desordenando a estrutura cristalina, aumentando a resistência e diminuindo a ductilidade do metal*” (CALLISTER, Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, 2004).

Importante notar que a variação das propriedades mecânicas dependerá das tensões e deformações efetivas submetidas ao mesmo. Neste caso, diferentes condições de tensão/deformação efetivas provocarão diferentes graus de encruamento.

Vale ressaltar que os efeitos do encruamento podem ser parcialmente ou completamente revertidos pelo aquecimento do metal a uma temperatura suficientemente alta. Neste caso são produzidos novos cristais no metal (no estado sólido), através de um processo conhecido como recozimento (annealed).

### **3.2.4 Conformabilidade dos metais**

A ocorrência de falhas é o grande limitante da conformação plástica dos metais. Neste caso, falha “*pode ser definida como a incapacidade do componente corresponder à demanda que lhe é exigida*” (ROSA, Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais, 2002). Mas não sendo necessária a ocorrência de uma fratura completa no material, basta o surgimento de defeitos ou irregularidades superficiais para que a peça seja considerada inapta para seu uso final.

As formas com que o componente estrutural pode falhar “*dependem do tipo de carregamento, tipo do material, condições ambientais, tempo de vida, cuidados com manutenção e etc*” (ROSA, Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais, 2002). Sendo que a falha durante a conformação pode se originar de duas fontes: do material sob conformação ou do tipo de conformação que está sendo imposta. Quando a fratura é devida ao material, este geralmente apresenta propriedades mecânicas ou uma estrutura interna inadequada para o tipo de conformação.

No caso da falha oriunda do processo, geralmente os pontos externos do material, especialmente suas arestas, recebem maiores níveis de carregamento mecânico. Este carregamento localizado pode, inclusive, vencer o limite de resistência localizado, provocando a falha. Neste sentido o coeficiente de encruamento é um importante parâmetro para se definir a capacidade de deformação plástica do material, já que este valor é igual à deformação real no ponto de início da estricção.

Quanto maior o coeficiente de encruamento, maior a deformação real que o material pode suportar antes da estricção e conseqüentemente maior a sua capacidade de deformação plástica sem ocorrer estricção ou mesmo a fratura.

A taxa de deformação ou velocidade de deformação (“strain rate”) é definida como sendo a variação da deformação por unidade de tempo. A velocidade de deformação durante a conformação influencia no limite de escoamento e, conseqüentemente, no nível de tensão necessária para provocar uma determinada conformação em um material metálico. Esta influência será tanto maior quanto maior for a temperatura em que se encontra o material.

Em materiais utilizados na conformação “*falhas podem se manifestar quando a estrutura em questão sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação, levando a ocorrência de uma falha na forma de ruptura, ou um empenamento*” (ROSA, Análise de Resistência Mecânica de Peças e Componentes Estruturais, 2002).

### 3.3 MATERIAIS

Há uma variedade significativa de materiais que podem ser empregados na construção de um vaso de pressão, como:

- Materiais para cascos e tampos de vasos de pressão e para suportes, peças internas e externas, sendo utilizados materiais metálicos ferrosos (tipo aço carbono aços liga e aços inoxidáveis) ou não ferrosos (tipo alumínio e ligas, níquel e ligas, titânio e ligas);
- Materiais metálicos para tubos de troca de térmica e espelhos, como materiais ferrosos (tipo aço carbono aços liga e aços inoxidáveis) ou não ferrosos (tipo cobre e ligas, níquel e ligas, alumínio e ligas, titânio e ligas).

De modo geral, o aço carbono “*é o material de uso geral na construção da grande maioria dos vasos de pressão, sendo que não é utilizado quando alguma circunstância não recomende o seu emprego*” (TELLES, Materiais para Equipamentos de Processo, 2003).

Todos os materiais empregados na construção de um vaso de pressão “*devem ter suas propriedades perfeitamente conhecidas e garantidas e, por isso, somente são usualmente admitidos os materiais que obedecem a alguma Especificação de Material, sendo essas especificações documentos normativos emitidos por sociedades de normalização reconhecidas utilizadas por fabricantes, contendo as exigências quanto a descrição e finalidade do material, composição química, propriedades mecânicas, ensaios e testes exigidos ou recomendados, condições de aceitação, rejeição e marcação do material, classe ou grau do material*” (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

A seleção do material utilizado num vaso de pressão “*é de responsabilidade do projetista e o mesmo deve avaliar as intempéries de uma escolha, o fluido contido no vaso, as condições de serviço (pressão e temperatura de operação), nível de tensões no material, a natureza dos esforços mecânicos, custo do material, segurança, disponibilidade do material e tolerância de forma e/ou dimensões*” (TELLES, Materiais para Equipamentos de Processo, 2003).

### **3.3.1 Aço Carbono**

“*São construídos com aço carbono quase todos os equipamentos e tubulações que trabalham com água, vapor de baixa pressão, ar comprimido, condensado, óleos e fluidos pouco corrosivos, devido a ser o material industrial de menor preço em relação a sua resistência mecânica, além de ser um material de*

*fácil aquisição, de boa soldabilidade e encontrável em diversas formas de apresentação*” (TELLES, Materiais para Equipamentos de Processo, 2003).

Define-se metalurgicamente como sendo *“uma liga de ferro carbono contendo, teoricamente, entre 0,05 e 2,0% de carbono”* (TELLES, Materiais para Equipamentos de Processo, 2003).

As propriedades do aço carbono são grandemente influenciadas por sua composição química e pela temperatura.

O aumento da quantidade de carbono provoca um aumento na dureza e nos limites de resistência e de escoamento do aço e uma redução na ductilidade, traduzida por uma diminuição no alongamento. Na medida em que há acréscimo no teor de carbono, aumenta-se a temperabilidade do aço, ou seja, aumenta a possibilidade de formação de martensita, tornando difícil a sua soldagem, devido a tendência ao endurecimento e surgimento de trincas nas soldas e na região termicamente afetada pela solda, a chamada ZTA. Essas trincas, conhecidas como trincas a frio, são devidas ao hidrogênio retido nas soldas. A susceptibilidade é maior para aços com equivalente de carbono acima de 0,30%, sendo recomendado o uso de eletrodos consumíveis de baixo hidrogênio nas soldas, além do pré e pós aquecimento das soldas, para promover a liberação do hidrogênio. Alguns compostos químicos são adicionados aos aços para diminuição desses e de outros efeitos, tais como aumento da dureza, aumento da resistência mecânica, aumento da ductilidade e melhor soldabilidade.

Embora seja difícil estabelecer-se limites rígidos para o teor de carbono, são usuais os seguintes valores como máximos recomendáveis em aços para vasos de pressão:

- Partes soldadas sujeitas à pressão ou a outros esforços principais em vasos: 0,26%;
- Outras partes soldadas sujeitas à pressão em vasos em geral: 0,30%;
- Máximo admissível para qualquer parte soldada (mesmo não submetida à pressão): 0,35%.

### 3.4 TTAT – TRATAMENTO TÉRMICO PARA ALÍVIO DE TENSÃO

A definição de tensões residuais, *“são as tensões que existem em um corpo, após todas as cargas externas serem removidas. São chamados de tensões internas. As tensões residuais que existem em um corpo que tenham sido anteriormente submetidos a variações de temperatura não uniforme, como por exemplo, as tensões acumuladas durante a soldagem, são muitas vezes chamadas de tensões térmicas”* (KOU, Welding Metallurgy, 2003).

O desenvolvimento de tensões residuais pode ser explicado considerando aquecimento e resfriamento de um material sob tensão.

Exercitando um exemplo com três barras metálicas idênticas ligadas a dois blocos rígidos e, considerando todas as três barras inicialmente à temperatura ambiente, coloca-se calor na barra do central, sendo que a sua expansão térmica está contida pelas barras laterais. Então são produzidas tensões de compressão na barra do meio, que aumentam com o aumento da temperatura, até que o limite de escoamento em compressão é alcançado. O limite de escoamento representa o limite superior de tensões no material, em que ocorre a deformação plástica. Quando o aquecimento na barra central é paralisado, sua contração térmica é contida pelas barras laterais.

Por consequência, as tensões de compressão na barra do meio se alteram para tensões de tração, e aumentam com a diminuição da temperatura até que o limite de escoamento em tensão seja atingido. Portanto, uma tensão residual à tração igual ao limite de escoamento, a temperatura ambiente, está configurado na barra do meio quando ele resfria até a temperatura ambiente. As tensões residuais nas barras laterais são tensões de compressão e igual a metade da força de tensão na barra do meio.

Quando realizado aquecimento de um material devido a energia de soldagem, este material reage da mesma forma que as três barras. Isso ocorre porque a expansão e contração do metal de solda e do metal base adjacente (ZTA), são contidos pelas áreas mais distantes do metal de solda. Consequentemente, *“após o resfriamento até a temperatura ambiente, há tensões residuais de tração no metal depositado e no metal de base adjacente, enquanto que há tensões residuais de*

*compressão nas zonas mais afastadas do metal de solda (após a ZTA)”, conforme figura 8 (KOU, Welding Metallurgy, 2003).*

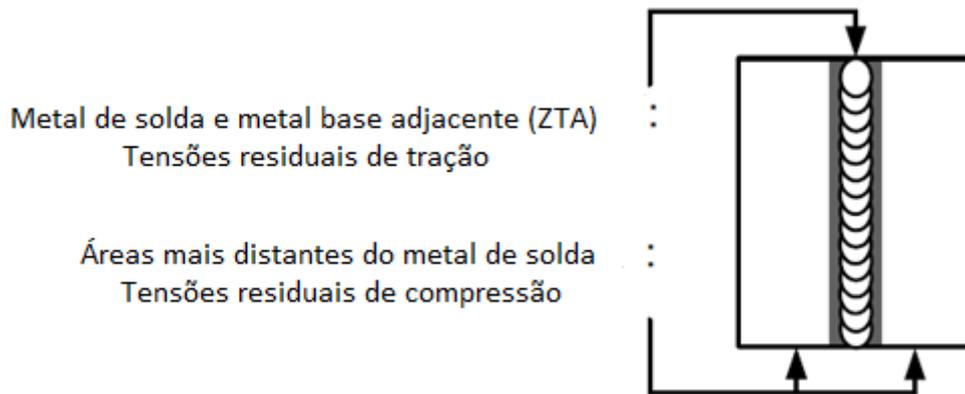


Figura 8 – Tensão residual na solda.

A Figura 9 é uma representação esquemática da variação da temperatura (DT) e tensão na direção da soldagem ( $s_x$ ), durante a execução da soldagem. A área hachurada, M-Mc, é a região onde ocorre a deformação plástica. A seção A-A ainda não é afetada pela entrada de calor no início da soldagem, a mudança de temperatura devido à soldagem, DT, é essencialmente zero. A seção B-B intersecta a fonte de calor, sendo a distribuição da temperatura bastante acentuada.

Ao longo da secção C-C, a distribuição da temperatura torna-se menos acentuada e, eventualmente, é uniforme ao longo do corte D-D, devido a distância para a fonte de calor.

Considerando, agora, as tensões induzidas termicamente ao longo da direção longitudinal,  $s_x$ . A seção A-A não é afetada pela entrada de calor, ou seja,  $s_x$  é zero. Ao longo da secção B-B,  $s_x$  é próximo de zero na região oposta da fonte de calor, uma vez que a poça de fusão não tem qualquer resistência para suportar as cargas. Nas regiões próximas da fonte de calor, há tensões de compressão ( $s_x$  é negativo), porque a expansão em torno destas zonas é restringida pelo metal, por conter temperaturas mais baixas. Devido ao baixo escoamento do metal a alta temperatura,  $s_x$  atinge o limite de resistência do metal de base. Nas áreas mais distantes do cordão de solda,  $s_x$  comporta-se como tensão de tração, enquanto em áreas próximas a solda a tensão é de compressão.

Ao longo da secção C-C, considerando que tanto o metal depositado quanto o metal de base adjacente a solda já tenha arrefecido e, portanto, com tendência a contrair-se, produzindo assim tensões de tração, enquanto nas zonas próximas

produz tensão compressiva. Finalmente, ao longo da secção D-D do metal de solda e do metal base adjacente ter arrefecido e contraído mais, produzindo, então, altas tensões de tração nas regiões próximas a solda e tensões de compressão em regiões longe da solda. Uma vez que a secção D-D é localizada no lado oposto a fonte de calor, a distribuição da tensão não altera significativamente para além desta secção, e esta distribuição de tensão é, assim, a distribuição da tensão residual.

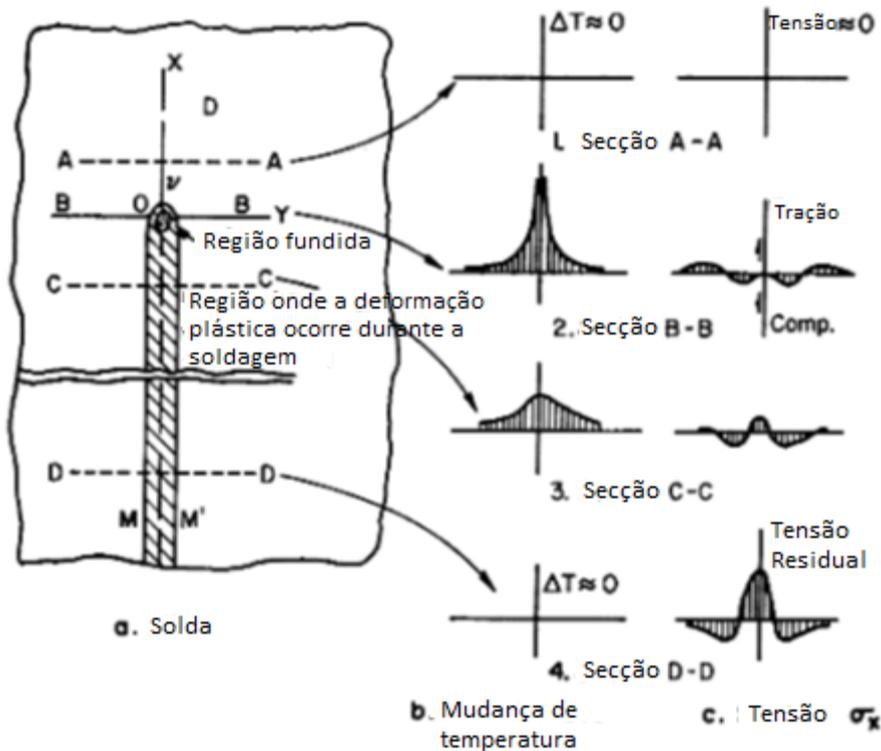


Figura 9 – Mudança de temperatura e pressão durante a soldagem (figura esquemática da AWS – American Welding Society).

### 3.4.1 Análise das Tensões Residuais

As tensões residuais podem causar problemas como trincas induzida por hidrogênio e corrosão sob tensão. Tratamento térmico após a solda é frequentemente utilizado para reduzir as tensões residuais.

O Tratamento Térmico mais comum em vasos de pressão é o Alívio de Tensões, o chamado TTAT, e “consiste em um aquecimento até a temperatura abaixo da temperatura de transformação do aço, na qual o vaso é mantido durante algum tempo, sendo depois resfriado lentamente” (Telles, Vasos de Pressão, 2007).

O alívio de tensões tem por finalidade reduzir as tensões residuais decorrentes da soldagem e da conformação a frio, pela plastificação do metal devido à diminuição da resistência mecânica com a temperatura. *“O tempo durante o qual a peça deve ser mantida na temperatura máxima não deve ser muito maior do que o necessário para conseguir uniformizar a temperatura em toda a peça e, portanto, esse tempo será tanto maior quanto maior for a fragilização do metal superficial”*, conforme exigido e dito pelo código ASME, Sec. VIII, Div.1.

Importante em qualquer tratamento térmico é o controle sobre a velocidade de aquecimento e, principalmente, sobre a velocidade de resfriamento do material, a partir da temperatura máxima. O controle da temperatura deverá ser feito por termopares colocados em vários pontos do vaso, durante toda a operação, afim de garantir uniformidade na temperatura ao longo da região a ser tratada. Exceto para o tratamento com o intuito de se obter aços para alta resistência, chamado têmpera, o resfriamento deve ser o mais lento possível e o mais uniforme possível em toda a peça. Para casos com taxas desiguais de resfriamento, observa-se a condição de formação de altas tensões residuais, grandes distorções e trincas no material.

O TTAT, além dos casos exigidos em normas, deve-se ser utilizado em conformação a frio, em vasos para serviços de hidrogênio, para serviços sujeitos a fratura frágil, ou para casos com serviços sujeitos a corrosão sob tensão (exceto aço inox austenítico).

O TTAT deve ser realizado antes do TH. Os tratamentos térmicos podem causar alguma deformação ou distorção decorrente a plastificação das regiões com tensão elevadas. Importante a verificação final destas tolerâncias dimensionais do vaso.

*“Antes de aplicar as exigências e/ou isenções para processos de solda satisfatórios para a qualificação dos procedimentos a serem utilizados e realizados de acordo com todas as variáveis essenciais do ASME Seção IX, deve ser avaliado a necessidade de tratamento térmico pós soldagem”* (UCS-56 do Código ASME Sec. VIII Div. 1, 2010).

Salvo “expressa” disposição em contrário, nas notas a Tabela UCS-56 (P-No. 1 Gr. Nos. 1,2,3) e Tabela UCS-56.1, ASME Sec. VIII Div. 1, *“todas as soldas em vasos de pressão ou partes dos vasos de pressão, quando necessário devem ser tratadas termicamente, após solda, a uma temperatura não inferior à especificada nas tabelas quando a espessura nominal, tal como definido em UW-40 (f), incluindo*

*subsídio de corrosão, ultrapassar os limites estabelecidos nestas tabelas” (UCS-56 do Código ASME Sec. VIII Div. 1, 2010). As isenções previstas na Tabela UCS-56 ou UCS-56.1, não são permitidas quando após a soldagem, o tratamento térmico for um requisito de serviço, conforme estabelecido no UCS-68.*

Para o UCS-56.1, os materiais de P-No. 1 Group Nos. 1, 2, e 3, *“a area de um reparo em um vaso, quando necessário, deverá ser preaquecida com no mínimo 95°C durante a soldagem” (Código ASME Sec. VIII Div. 1, pag. 169, 2007).*

### 3.5 EFICIÊNCIA DE JUNTA

Conforme o UW-12 do ASME Sec.VIII Div.1, para a eficiência de junta *“há regras que aplicam-se especificamente ao projeto de vasos de pressão que são fabricados por soldagem e devem ser usados em conjunto com os requisitos gerais para projeto e que pertencem a classe de material utilizado. As dimensões e a forma das extremidades a serem unidas devem ser de modo a permitir a fusão completa e penetração da junta completa”.*

O dimensionamento da espessura requerida dos vasos de pressão depende da eficiência de junta, que é um dos parâmetros das expressões de cálculo.

A eficiência de junta *“é um fator de redução da tensão admissível do material que é soldado (metal base) em função do tipo e do nível de exame não destrutivo realizado na solda” (Falcão, Projeto Mecânico Vasos de Pressão, 2008).*

Cada código de projeto tem exigência para o exame não destrutivo das soldas e valores próprios para a eficiência.

Independentemente do código de projeto adotado, vasos que tenham serviço com hidrogênio ou serviço com H<sub>2</sub>S, devem ter radiografia total, exigida pelas normas para estes tipos de serviço.

Exceto para os casos acima, e quando permitidas pelos códigos alternativos de exames não destrutivos, a escolha da eficiência de solda é uma questão econômica, já que quanto mais rígido é o exame, maior é o seu custo, porém menor é a espessura do componente, conforme figura 10.

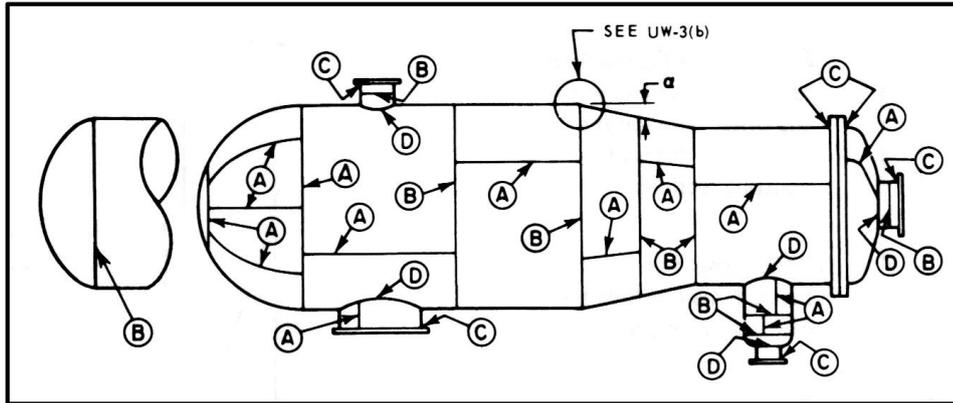


Figura 10 – Ilustração das categorias das juntas num vaso (A, B, C e D), conforme o ASME Sec. VIII Div.1.

No dimensionamento de espessuras, quando submetidas a esforços de compressão, como peso próprio para um vaso vertical, a eficiência considerada é 1,0, independentemente do nível de exame não destrutivo.

### 3.5.1 Eficiência de juntas para ASME Sec. VIII Div.1

Para vasos projetados conforme o código ASME Seção VIII Divisão 1, “*estas soldas devem ter radiografia total, quando o vaso contém fluido letal ou quanto a espessura for maior que um determinado valor, específico para um grupo de materiais, como no caso dos aços carbono com espessuras iguais ou superiores a 38,1 mm é exigida a radiografia total*”.

Informação importante é que o exame radiográfico pode ser substituído por exame de ultra-som, desde que sejam atendidas várias exigências feitas pelo código.

As soldas dos componentes principais são de topo, com penetração total, podendo ser solda dupla ou simples, com uso ou não de mata-junta, dependendo da espessura e da posição da solda, conforme figura 11.

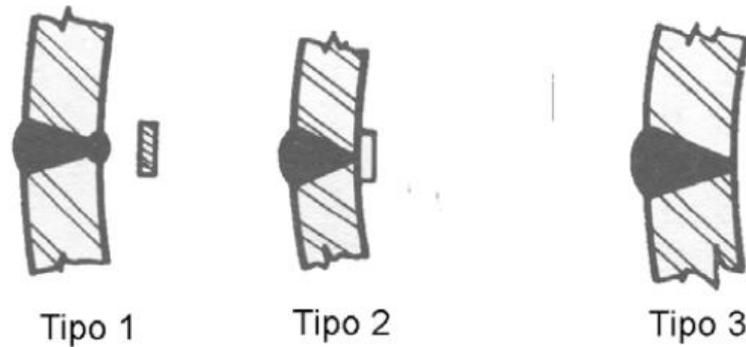


Figura 11 – Principais tipos de solda do casco e tampos (categoria A e B).

Para estes tipos de solda a eficiência (E) em função do exame radiográfico para a Divisão 1 do ASME é conforme a tabela B:

Tipo de Solda de Topo	Nível do Exame Radiográfico		
	Total	Parcial	Nenhum
1 - solda dupla (executada pelos dois lados). Caso seja usado mata-junta o mesmo deverá ser removido	1,0	0,85	0,7
2 - solda simples com mata-junta	0,9	0,8	0,65
3 - solda simples sem mata-junta	não aplicável	não aplicável	0,6

Tabela B – Eficiência de soldas, conforme ASME Sec. VIII Div.1.

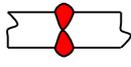
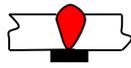
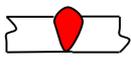
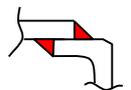
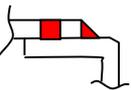
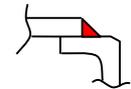
As soldas são classificadas em categorias, conforme visto na tabela C e figura 17, em função das tensões atuantes de tração, devidas à pressão interna, a que estão submetidas. Pelo UW-3 do ASME Secção VIII Div.1, o termo “Categoria”, usado, define “a localização de uma junta em um vaso de pressão, porém não o tipo da junta”. As “Categorias” são também utilizadas como outras definições de requisitos especiais relacionados com o tipo de junta e com o grau de inspeção para determinadas juntas soldadas submetidas à pressão. Uma vez que estes requisitos especiais, que se baseiam em condições de serviço, material e espessura, não se aplicam a todas as juntas soldadas, apenas aquelas juntas para as quais os requisitos especiais são aplicáveis, são incluídas nas categorias. Os requisitos especiais serão aplicados às juntas de uma determinada categoria somente quando

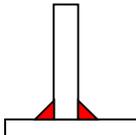
especificamente indicados. As juntas incluídas em cada categoria podem ser designadas como juntas de Categorias A, B, C e D, conforme definido a seguir:

- Categoria A (soldas solicitadas pelas maiores tensões): Juntas soldadas longitudinais e espirais no casco principal, em câmaras de comunicação (1), em transições de diâmetro, ou bocais; qualquer junta soldada em uma esfera, em um tampo conformado ou plano, ou em chapas laterais (2) de um vaso de faces laterais planas; juntas soldadas circunferências ligando tampos semi-esféricos ao casco principal, a transições em diâmetro, a bocais ou a câmaras de comunicação (1).
- Categoria B (soldas solicitadas pelas menores tensões): Juntas soldadas circunferenciais no casco principal, em câmaras de comunicação (1), em bocais ou em transições de diâmetro incluindo as juntas entre as transições e um cilindro na extremidade maior ou na extremidade menor; juntas soldadas circunferenciais ligando tampos conformados, que não os semi-esféricos, aos cascos principais, a transições em diâmetro, a bocais ou a câmaras de comunicação (1). As juntas circunferenciais são juntas de topo se o semi-ângulo do vértice,  $\alpha$ , for menor ou igual a  $30^\circ$  e são juntas de ângulo se  $\alpha$  for maior do que  $30^\circ$ .
- Categoria C: Juntas soldadas ligando flanges, espelhos ou tampos planos ao casco principal, a tampos conformados, a transições em diâmetro, bocais ou a câmaras de comunicação (1); qualquer junta soldada ligando uma chapa lateral a outra chapa lateral de um vaso de faces laterais planas.
- Categoria D: Juntas soldadas ligando câmaras de comunicação (1) ou bocais a cascos principais, a esferas, a transições em diâmetro, a tampos, ou a vasos de faces laterais planas, e àquelas juntas ligando bocais às câmaras de comunicação (1) – para bocais na extremidade menor de uma transição em diâmetro, ver Categoria B.

(1) Câmaras de comunicação são definidas como anexos ao vaso, que interceptam o casco ou os tampos de um vaso e faz parte integrante da parte pressurizada.

(2) Chapas laterais de um vaso de faces laterais planas são definidas como as chapas planas que integram a parte pressurizada.

Tipo de solda	Descrição da solda	Limitações	Categoria da junta	Eficiência de solda		
				Total	Parcial	Sem
<b>1</b> 	Solda de topo em ambos os lados da chapa, de acordo com UW-35. Soldas com mata-junta definitiva estão excluídas desta categoria.	Nenhuma	A, B, C e D	<b>1,00</b>	<b>0,85</b>	<b>0,70</b>
<b>2</b> 	Solda de topo em apenas um lado da chapa com mata-junta permanente	(a) Nenhuma exceto quando indicado em (b) abaixo (b) Para juntas circunferências em chapas planas com ressalto; ver UW-13(b)(4) e Fig. UW-13.1, sketch (i).	A, B, C e D	<b>0,90</b>	<b>0,80</b>	<b>0,65</b>
<b>3</b> 	Solda de topo em apenas um lado da chapa sem mata-junta	Apenas em soldas circunferências de topo com espessura menor ou igual a 16mm (5/8 in) e diâmetro máximo de 600mm (24 in)	A, B e C	-	-	<b>0,6</b>
<b>4</b> 	Solda dupla de filete em juntas sobrepostas	(a) Juntas longitudinais com espessura menor ou igual a 10mm (3/8 in) (b) Juntas circunferências com espessura menor ou igual a 16 mm (5/8 in).	A B e C <sup>1</sup>	- -	- -	<b>0,55</b> <b>0,55</b>
<b>5</b> 	Solda simples de filete em juntas sobrepostas com solda de tampão conforme UW-17	(a) Juntas circunferenciais <sup>2</sup> para soldar tampos em costado com diâmetro do costado menor ou igual a 600 mm (24 in) e espessura do casco menor ou igual a 13mm (1/2in). (b) Juntas circunferências para soldar jaquetas no costado com espessura menor ou igual a 16 mm (5/8 in) onde a distância do centro da solda tampão à borda da chapa é no mínimo 1,5 x diâmetro do furo do tampão.	B C	- -	- -	<b>0,50</b> <b>0,50</b>
<b>6</b> 	Soldas simples de filete em juntas sobrepostas sem solda de tampão.	(a) Para solda em tampos com pressão do lado convexos em vasos de pressão com espessura menor ou igual a 16 mm (5/8 in), apenas com o uso de solda em filete no lado interno. (b) Para solda de tampos com pressão em ambos os lados em cascos com	A e B A e B	- -	- -	<b>0,45</b> <b>0,45</b>

Tipo de solda	Descrição da solda	Limitações	Categoria da junta	Eficiência de solda		
				Total	Parcial	Sem
		diâmetro interno menor ou igual a 600mm (24 in) e espessura máxima de 6mm (1/4 in) com solda de filete no lado externo do flange do tampo apenas.				
7 	Juntas de canto, de penetração total, de penetração parcial e/ou soldas de filete	Os tipos de solda limitados pelas Fig.UW-13.2 e Fig.UW-16.1	C e D	-	-	-
8 	Juntas de Ângulo	Exceto as soldas projetadas por U-2(g) para as juntas da categoria B e C.	B, C e D	-	-	-

(1) Para solda tipo 4 e categoria C, não se aplica a solda de flanges parafusados. (2) A solda unindo o tampo semi-esférico a costado está excluída. Tabela C – Tipos de soldas (UW – 12).

### 3.5.2 Soldas nos cascos Cilíndricos

Nos cascos tipos cilíndricos os esforços circunferenciais, aplicáveis às soldas longitudinais, são maiores do que os esforços longitudinais, que atuam nas soldas circunferenciais. Desta forma, há duas categorias de soldas: longitudinais são categoria A e as circunferenciais são categoria B.

Para pressão interna, as soldas circunferenciais estão submetidas à metade da tensão das soldas longitudinais. Desta forma, pode-se adotar um exame radiográfico menos severo, com menor eficiência, para as soldas circunferenciais, sem que isto prejudique o dimensionamento da espessura requerida. Observar na figura 19, que a solda circunferencial de união do casco cilíndrico com um tampo conformado é uma solda do cilindro, pois estes tampos tem um trecho cilíndrico para a transição com o casco. Desta forma, esta solda é categoria B e deve ter a mesma eficiência das outras soldas circunferenciais do casco. Normalmente esta é a solda de fechamento do vaso. No caso de vasos com pequeno diâmetro, que não permitam acesso interno, esta solda é realizada apenas pelo lado externo, com ou sem o uso de mata-junta.

### **3.5.3 Soldas nos cascos esféricos e tampos semi-esféricos**

Todas as soldas estão submetidas ao mesmo esforço e, portanto são categoria A.

A solda de junção com o casco cilindro, ver figura 19 (a), é uma solda do tampo, pois o cilindro tem um trecho biselado para concordância com o tampo, sendo solda categoria A.

### **3.5.4 Soldas nos tampos semi-elípticos e toriesféricos**

Nos tampos conformados, sendo as soldas longitudinais e circunferenciais submetidas a esforços iguais, ambas são categoria A.

Exceção para tampos com diâmetro até 1800 mm, normalmente são feitos em uma única peça, sem solda, sendo neste caso, a eficiência igual a 1,0.

Nos casos em que os tampos são semi-elípticos ou toriesféricos, as soldas podem ser categoria A e categoria B, sendo o tampo ou transição dimensionado com a eficiência E, aplicada à solda longitudinal, categoria A. A eficiência das soldas circunferenciais, categoria B, pode ser inferior sem que altere a espessura requerida. A solda da junção com o costado, figura 12, é uma solda comum aos dois componentes, e deve ter maior eficiência aplicada as soldas circunferenciais do casco ou tampo.

### **3.5.5 Soldas nos tampos e transições cônicas**

Os tampos ou transições toricônicas tem as mesmas características dos cônicos, a menos da solda circunferencial com o costado cilíndrico que, da mesma forma que nos tampos conformados do cilindro, pois há uma transição reta com o casco. Esta solda é categoria B e pode ter a eficiência das soldas circunferenciais do casco.

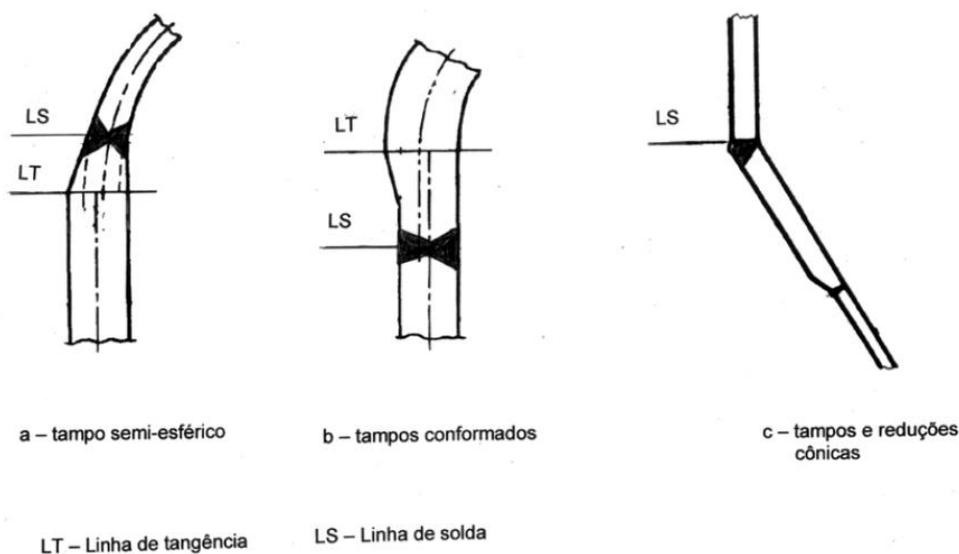


Figura 12 – Soldas de junção de tampos ou transições com casco cilíndrico.

### 3.6 ANÁLISE DE MAWP (PMTA)

“Os equipamentos sob pressão devem ser projetados, fabricados, e se for o caso, equipados e instalados, de tal forma a garantir a sua segurança se forem colocados em serviço, de acordo com as instruções do fabricante, ou em condições razoavelmente previsíveis. O fabricante é obrigado a analisar os riscos da preparação de uma especificação de projeto a fim de identificar aqueles que se aplicam ao seu equipamento por conta da pressão, ele deve, então, projetar e construí-lo tendo em conta a sua análise, sendo a responsabilidade final do fabricante” (Zeman, Pressure Vessel Design: The Direct Route, 2006).

Denomina-se pressão de projeto as “Condições de Projeto” do vaso de pressão, ou seja, “os valores considerados para efeito de cálculo e de projeto do vaso” (Telles, Vasos de Pressão, 2007). Sendo para o parágrafo do UG-21 do código ASME, Sec.VIII, Div. 1, a pressão de projeto é “a pressão correspondente às condições mais severas de pressão e temperatura coincidentes que possam ser previstas em serviço normal”.

Há no conceito de Pressão, distinção entre Pressão de Projeto (Design Pressure) e Pressão Máxima de Trabalho Admissível – PMTA – (Maximum Allowable Working Pressure – MAWP), como será descrito posteriormente.

### 3.6.1 Conceito de MAWP (PMTA)

A PMTA de cada parte de um vaso “é a pressão que causa nas partes pressurizadas uma tensão máxima igual à tensão admissível do material na temperatura de operação” (Telles, Vasos de Pressão, 2007). Essas pressões são calculadas pelas fórmulas dadas na mesma norma de projeto adotada para o cálculo do vaso. Pela definição do código ASME, Sec. VIII, Div. 1 (parágrafo UG-98), o cálculo do PMTA deve ser feito em função das espessuras corroídas.

O código ASME Sec. VIII Div.1, define a PMTA do vaso todo como sendo “o maior valor permissível para pressão, medida no topo do vaso, na sua posição normal de trabalho, na temperatura correspondente à pressão considerada, tomando-se o vaso com a espessura corroída”. Essa pressão será, portanto, a pressão que causa, na parte mais frágil do vaso, uma tensão igual à tensão admissível do material, ou, em outras palavras, será o menor dos valores das PMTA, das diversas partes do vaso, corrigidas do efeito da coluna hidrostática do líquido contido.

A PMTA é o valor usualmente empregado para a pressão de abertura da válvula de segurança.

Observar a figura 13 que representa a espessura de uma determinada parte do vaso, como:

- $e_p$ : espessura mínima necessária calculada em função da pressão de projeto e da temperatura de projeto.
- $C$ : margem para corrosão.
- $e_f$ : acréscimo para compensar a perda de espessura das chapas no processo de conformação, onde for o caso.
- $e_c$ : acréscimo de espessura para ajustar-se à espessura comercial da chapa adotada.
- $e_t$ : acréscimo para considerar a tolerância inferior de fabricação na espessura da chapa, de acordo com a sua especificação; esse valor é geralmente desprezível.
- $e_n$ : espessura nominal da chapa adotada.
- $e_{av}$ : espessura para o cálculo da pressão máxima de trabalho admissível com o vaso corroído.

- $e_{an}$ : espessura para o cálculo da pressão máxima de trabalho admissível com o vaso novo (não corroído).

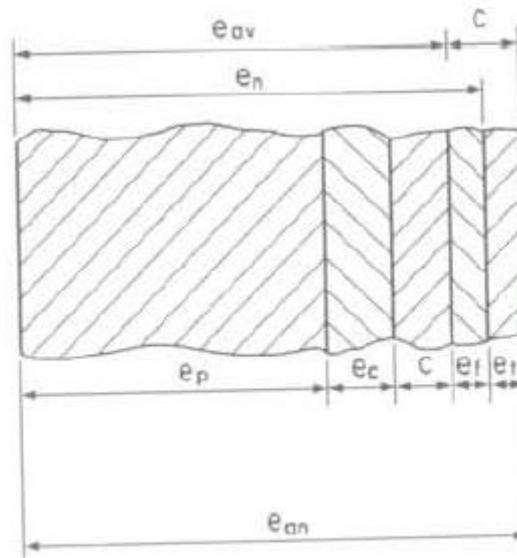


Figura 13 – Representação da espessura de uma determinada parte do vaso.

Nota-se na figura... que  $e_{av} \geq e_p$  e também  $e_{an} \geq e_{av}$ . Tem-se  $e_{av} = e_p$  no caso em que  $e_c = 0$ , isto é, quando a espessura mínima necessária coincidir exatamente com uma espessura comercial adotada.

Da mesma forma tem-se  $e_{an} = e_{av}$  somente no caso particular em que não houver margem para corrosão ( $C=0$ ). A consequência será a PMTA > Pressão de Projeto, sendo que esses dois valores serão iguais apenas em alguns casos excepcionais.

O acréscimo de espessura ( $e_r$ ) deve ser considerado sempre que houver perda sensível de espessura da chapa no processo de conformação, como no caso de tampos elípticos, toriesféricos e hemisférico, fabricados por prensagem ou rebordeamento. Nos costados onde há apenas calandragem, a perda de espessura é desprezível.

A PMTA do vaso “pode ser calculada para diversas temperaturas e para diferentes valores de tensão admissível”, sendo que também usual “calcular a PMTA para um vaso novo e frio, em função da espessura  $e_{an}$  e da tensão admissível do material para a temperatura ambiente” (Telles, Vasos de Pressão, 2007).

### 3.6.2 Entendendo a finalidade do Teste Hidrostático e sua Pressão

O Teste Hidrostático (TH) em vasos de pressão consiste no preenchimento completo do vaso com água ou outro líquido apropriado, no qual se exerce uma determinada pressão. *“O teste tem por finalidade a detecção de possíveis defeitos, falhas ou vazamentos em soldas, roscas, partes mandriladas e em outras ligações no próprio vaso ou em seus acessórios externos ou internos”* (Telles, Vasos de Pressão, 2007).

A pressão de Teste Hidrostático deve ser a mais alta possível, compatível com a segurança da parte menos resistente do vaso, sendo esta pressão *“sempre superior à pressão de projeto e à PMTA do vaso e, portanto, durante o teste, o material ficará submetido a uma tensão acima de sua tensão admissível”* (Telles, Vasos de Pressão, 2007).

Para os vasos construídos de acordo com o parágrafo UG-99 do código ASME, Sec. VIII, Div. 1, *“a pressão de teste deve ser no mínimo 1,3 vez a PMTA do vaso (correspondente a espessura corroída)”*. Quando se tratar de projeto ao qual a PMTA não foi calculada, permite-se que a pressão de teste seja:

$1,3 \times \text{pressão de projeto} \times S_c/S_h$ , sendo  $S_c/S_h$ , respectivamente as tensões admissíveis do material em temperatura ambiente e na temperatura de projeto do vaso. Outras observações devem ser consideradas como carregamentos que estejam atuando simultaneamente sobre o vaso na ocasião do teste, por exemplo, o efeito da coluna hidrostática do líquido contido.

### 3.6.3 Comparação entre Pressão de Operação, Pressão de Teste e PMTA

Para elucidar a comparação entre as pressões de Operação, de Teste e PMTA, deve-se observar a figura 14, no qual está desenhado em escala um vaso de pressão, mostrando em ordenadas as cotas de elevação e em abscissas as pressões.

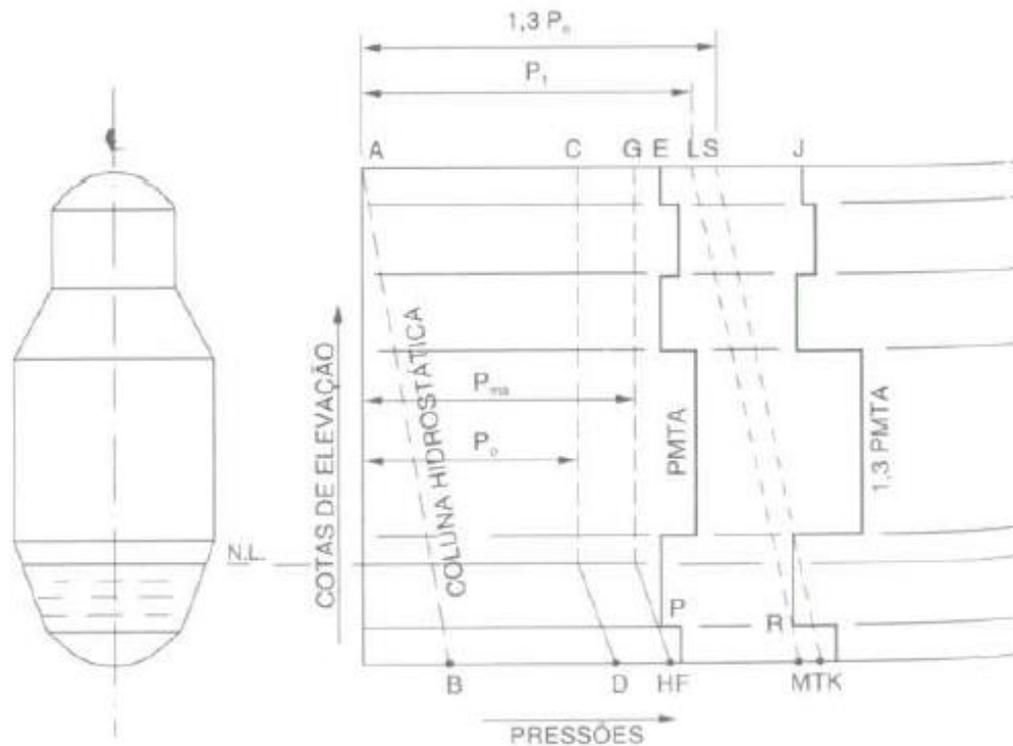


Figura 14 – Gráfico para determinação da PMTA e da Pressão de TH.

A reta AB mostra a variação de pressão devido apenas a coluna hidrostática do vaso cheio de água, sendo esta pressão nula no topo e máxima no fundo.

A linha CD mostra a variação de pressão na condição de operação do vaso, sendo que acima do nível líquido (NL) a pressão é a pressão de operação  $P_o$ . Esta pressão permanece constante, pois é a pressão do gás e, abaixo deste nível, tem-se um aumento de pressão devido a coluna do líquido em operação.

A linha EF, para cada trecho, possui a representação da PMTA em cada parte do vaso, considerando o cálculo para vaso corroído e em operação.

Para determinar a PMTA do vaso completo, desloca-se a linha CD, paralelamente, até cruzar em algum ponto a linha EF, gerando o ponto P, sendo a nova linha chamada de GH. A PMTA do vaso completo será a pressão  $P_{ma}$ .

Considerando o valor da pressão de teste ( $P_t$ ) como sendo  $1,3P_{MATA}$ , traça-se uma linha JK com estes novos valores, sendo que deslocando uma linha paralela a linha AB até o cruzamento em algum ponto com a linha JK, encontra-se o ponto R e a nova linha LM. Portanto, a pressão de teste hidrostático medido no topo do vaso é  $P_t$ .

Um erro comumente verificado é “a fixação da pressão de teste simplesmente como 1,3 vez a pressão de operação (ou de projeto), sem levar em conta a ação da coluna hidrostática e a PMTA de cada parte do vaso” (Telles, Vasos de Pressão, 2007).

A linha ST, no exemplo da figura 14, representa a variação da pressão no topo de um vaso vertical como sendo 1,3  $P_o$ . Observa-se nesse caso que no cone inferior pode-se ter pressões superiores a 1,3 vez PMTA dessa peça, podendo colapsar o vaso.

Nas caldeirarias, normalmente, os vasos são testados na posição horizontal, pois o efeito da coluna hidrostática torna-se insignificante.

Considerando vasos verticais com grandes alturas e para baixas pressões, para serem testados na posição vertical e, considerando que a pressão no topo do vaso seja inferior à pressão de operação, nesse caso as soldas do topo seriam testadas há uma pressão insuficiente. Para dirimir esta situação, permite-se aumentar a pressão de teste até que a tensão na parte mais solicitada atinja 90% do limite inferior de elasticidade do material.

Em todas as situações que forem mencionadas um determinado valor de pressão de teste hidrostático, é obrigatório especificar os dados relativos a pressão, conforme visto em Telles, no livro Vasos de Pressão (2007):

- Pressão referente ao vaso novo ou vaso corroído, considerando ou não a margem para corrosão;
- Pressão com o vaso em posição horizontal ou vertical;
- Ponto de medição da pressão.

## 4 PREMISSAS DE PROJETO

*“A definição dos dados gerais de projeto consiste na informação de uma série de dados relativos às condições locais e pontos que envolvem decisão ou preferência do usuário” (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).*

Estas informações servem de base para o desenvolvimento do projeto de instalação industrial onde ficará o vaso.

### 4.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO OU DE OPERAÇÃO DO VASO

A definição dos dados consiste na *“determinação ou cálculo dos dados relativos ao desempenho operacional do vaso”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007). Estes dados normalmente figuram nos fluxogramas de processos referentes à instalação da qual o vaso faz parte. Nesses dados incluem-se:

- Tipo geral do vaso de pressão (torre de fracionamento, vaso de armazenamento, reator, trocador de calor e etc);
- Propriedades (composição química, concentração, densidade, impurezas e contaminantes presentes e etc), vazão temperatura e pressão de todas as correntes fluidas que entram ou que saem do equipamento (valores de regime e valores máximos e mínimos possíveis de ocorrer);
- Temperatura e pressão de operação do equipamento (valores de regime e valores máximos e mínimos possíveis e respectivas variações em função do tempo).

### 4.2 PROJETO DE PROCESSO DO VASO

O projeto de processo do vaso, também chamado de “Projeto Analítico”, consiste basicamente na *“determinação ou no cálculo das dimensões gerais do equipamento (que interfiram no seu funcionamento), e na definição de todos os detalhes do próprio equipamento ou das peças internas (que também interfiram no funcionamento do equipamento), baseado nos dados de processo”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

Entre as informações que fazem parte do projeto de processo, incluem-se:

- Formato do Vaso (cilíndrico, esférico, e etc);
- Dimensões gerais (diâmetro e comprimento);
- Tipos de tampos (elíptico, cônico, plano e etc);
- Posição de instalação (vertical, horizontal, inclinado);
- Pressão e temperatura de projeto;
- Diâmetro nominal, posição e elevação dos bocais ligados a tubulação;
- Tipo, localização, formato, dimensões gerais, espaçamento e detalhes de peças internas (bandejas, vertedouros, grades, recheios, chicanas, distribuidores, serpentinas e etc);
- Isolamento térmico, revestimento, refratário, tanto interno quanto externo;
- Exigências especiais ou não usuais, quanto ao transporte, montagem, desmontagem, manutenção, inspeção ou remoção de peças internas, limpeza especial;
- Instrução para condicionamento do equipamento para a partida.

Em muitos casos, inclui-se no Projeto do Processo a indicação básica dos materiais de construção do vaso, bem como de materiais de peças internas e de revestimentos internos, quando existentes. Nota-se que não se trata de especificações completas de materiais, pois é de responsabilidade do projeto mecânico.

#### 4.3 PROJETO MECÂNICO DO VASO

O projeto mecânico inclui a definição ou o cálculo dos seguintes dados referentes ao vaso, conforme o livro Vasos de Pressão de Telles de 2007:

- Seleção completa de todos os materiais do vaso (casco e tampos) e de todas as suas partes de acessórios, tais como flanges, pescoço de bocais, suportes, espelhos, tubos internos, outras peças internas e externas, parafusos, juntas e etc;
- Definição da necessidade de margens para corrosão (sobresspesura);
- Definição das dimensões finais do vaso (baseado nas dimensões gerais do projeto de processo);

- Seleção do tipo de tampos (se não for exigência do processo);
- Definição das normas de projeto, construção e inspeção (no caso o ASME);
- Definição das eficiências de juntas soldadas e do tipo e grau de inspeção das soldas;
- Cálculo Mecânico (estrutural) completo do vaso, incluindo os desenhos de detalhes, contendo informações como as espessuras de todas as partes de pressão do vaso, bem como de reforços, flanges especiais, espelhos, peças internas e externas, Tratamento térmico, Radiografias ou ultrassom;
- Dimensões e espessuras das chapas de base da saia, colunas, berços ou outros suportes do vaso;
- Material, posição, cotas, tipo e diâmetro de todos os parafusos;
- Definição das posições finais (elevação e orientação) de bocais, bocas de visitas, instrumentos, peças internas e externas;
- Cálculo da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) e pressão de teste hidrostático;
- Cálculos dos pesos aproximados do vaso quando vazio e em operação;
- A elaboração do desenho mecânico do vaso.

Para alguns equipamentos o *“projeto mecânico poderá incluir especificações escritas, contendo exigências ou recomendações especiais não cobertas pelo código de construção, como: processos especiais de soldagem ou de inspeção, TTAT, revestimentos especiais, tolerâncias especiais, sequência de montagem e/ou soldagem”* (TELLES, Vasos de Pressão, 2007).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento a ser estudado é um vaso para Ar Comprimado Seco, de características de projeto definidas de seção cilíndrica e tampos elipsoidais (superior e inferior). O material de construção do vaso para casco e tampo é o aço carbono SA-516M 485 (Gr.70). A aplicação do vaso quanto ao método de aquecimento é sem chama. A orientação é vertical, com instalação fixa, com suportação na parte inferior do casco, conforme figura 15.

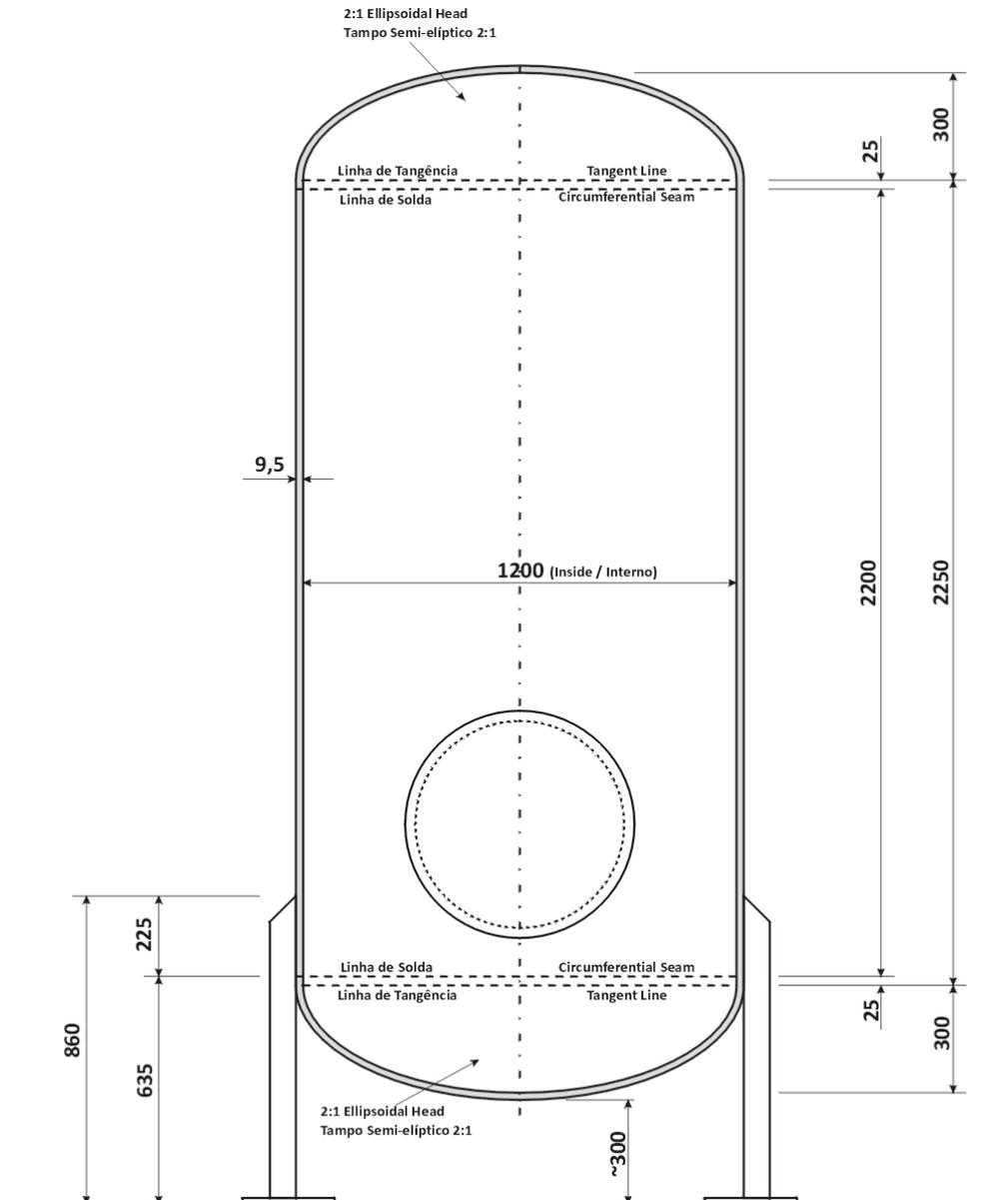


Figura 15 – Desenho do vaso com dimensões em milímetros.

## 5.1 PARÂMETROS DE PROJETO

Os parâmetros de projetos necessários indicados são Temperatura (T), Pressão de Projeto (P), Eficiência de Junta (E), Tensão Admissível (S), entre outros, conforme tabela D, Dados de Projeto abaixo:

DADOS DE PROJETO (DATA OF PROJECT)		
1	NORMA DE PROJETO (CODE)	ASME SEÇÃO VIII - DIV. 1 - Ed. 2010 (ASME SECTION VIII - DIV.1 - 2010 ED)
2	PRODUTO (PRODUCT)	AR COMPRIMIDO SECO (DRY COMPRESSED AIR)
3	DENSIDADE DE PROJETO (DESIGN DENSITY)	1000 kg / m <sup>3</sup> (0,361 lbs / in <sup>3</sup> )
4	DENSIDADE DE PRODUTO (PRODUCT DENSITY)	10 kg / m <sup>3</sup> (0,004 lbs / in <sup>3</sup> )
5	PMTA - PRESSÃO MAX. DE TRABALHO ADMISSIVEL [MPa] (MAWP - MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE [PSI])	1,1 (160)
6	PRESSAO DE PROJETO [MPa] (DESIGN INTERNAL PRESSURE [PSI])	1,1 (160)
7	PRESSAO DE TESTE HIDROSTÁTICO [MPa]      POSIÇÃO VERTICAL (DESIGN HYDROSTATIC TEST [PSI])      (VERTICAL POSITION)	1,43 (207)
8	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO - MAX - [°C] (OPERATION TEMPERATURA - MAX - [°F])	120 (248)
9	TEMPERATURA DE PROJETO - [°C] (INSIDE DESIGN TEMPERATURA - [°F])	150 (302)
10	TEMPERATURA MINIMA DE PROJETO - [°C] (MINIMUM DESIGN METAL TEMPERATURA - [°F]      MDMT)	(-29) (-20)
11	TEMPERATURA DE TESTE HIDROSTATICO - MAX - [°C]      TH (HYDROSTATIC TEST TEMPERATURA - MAX - [°F])	MIN. -12, MAX 48 (MIN. 10, MAX. 120)
12	SOBRESPESSURA PARA CORROSÃO INTERNA [mm] (INTERNAL CORROSION ALLOWANCE [in])	1,5 (0,059)
13	SOBRESPESSURA PARA CORROSÃO EXTERNA [mm] (EXTERNAL CORROSION ALLOWANCE [in])	0 (0)
14	VOLUME ÚTIL [L] (USEFUL VOLUME [US gal])	3000 (792,5)
15	VOLUME TOTAL [L] (ACTUAL VOLUME [US gal])	3000 (794,1)
16	PESO VAZIO [kgf] (NET WEIGHT [lbf])	1240 (2734)
17	PESO EM TESTE [kgf] (TEST WEIGHT [lbf])	4270 (9414)
18	PESO EM CADA SUPORTE [kgf] (WEIGHT IN EACH SUPPORT [lbf])	1068 (2355)
19	TRATAMENTO TÉRMICO (HEAT TREATMENT)	NO (NO)
20	TEST DE IMPACTO (IMPACT TEST)	NO (NO)

RAIO X RADIOGRAPHY			
	PARTE (PART)	TIPO (TYPE)	EFICIÊNCIA (EFFICIENCY)
1	TAMPO SUPERIOR (TOP HEAD)	SEM EMENDA - NÃO APLICÁVEL (SEAMLESS - NOT APPLICABLE)	1,0
2	COSTADO / TAMPO SUPERIOR (SHELL / TOP HEAD)	RAD. SPOT UW-11(a) 5(b) (SPOT)	0,85
3	COSTADO (SHELL)	RAD. SPOT UW-11(b) (SPOT)	0,85
4	COSTADO / TAMPO INFERIOR (SHELL / TOP HEAD)	RAD. SPOT UW-11(a) 5(b) (SPOT)	0,85
5	TAMPO INFERIOR (BOTTOM HEAD)	SEM EMENDA - NÃO APLICÁVEL (SEAMLESS - NOT APPLICABLE)	1,0

Tabela D – Parâmetros de projetos.

Para o desenvolvimento do cálculo do vaso, não houve consideração de presença de vácuo durante o processo, com isso será desconsiderado a pressão externa. Também não foi considerado o cálculo dos bocais e boca de vista (BV), sendo o objetivo principal do estudo a consideração sobre o desenvolvimento de tampos e casco.

## 5.2 SOFTWARE

O Software de projeto utilizado neste trabalho para o cálculo do vaso de pressão foi o COMPRESS. Este software é muito utilizado para Vasos de Pressão segundo o código ASME, e é uma ferramenta de boa produtividade para a engenharia na elaboração de modelos, memorial de cálculos e relatórios para vasos de pressão. Modelos sólidos 3D COMPRESS integram os sistemas de projeto do software.

O Software aumenta a eficiência do projeto objetivando conceber vasos inteiros ou componentes individuais, sendo que para novos projetos, o COMPRESS seleciona tamanhos, espessuras e avaliações para atender às exigências do Código e para classificação ou projetos turn-around, o COMPRESS calcula à PMTA e espessura mínima, permitindo que o usuário elabore o input da geometria existente.

### 5.3 DADOS INICIAIS DE PROJETO

O vaso estudado foi dimensionado de acordo com a norma ASME Section VIII, Division 1, 2010 Edition, Ad 2011.

Os dados principais do vaso são:

- Diâmetro Interno: 1.200 mm
- Comprimento Cilíndrico: 2.250 mm
- Comprimento do Costado: 2.200 mm
- Comprimento Parte Reta dos Tampos: 25 mm
- Tampos: Semi-Elíptico 2:1 -  $r/D = 0,17$   $L/D = 0,90$
- Pressão de Projeto: 1,1 MPa
- Temperatura de Projeto: 150 °C
- Temperatura Mínima de Projeto: -29 °C

### 5.4 ESPESSURA MÍNIMA (CONDIÇÕES OPERACIONAIS)

De acordo com a alínea UG-16(b)(4), a espessura mínima do costado e dos tampos dos vasos utilizados em serviços de ar comprimido deve ser igual a 2,50mm. Esta espessura mínima não considera nenhuma sobre-espessura para corrosão.

Conforme a alínea UG-25 do ASME, a sobre-espessura de corrosão deve ser definida pelo usuário do vaso ou seu agente. A consideração ou não referente a sobre-espessura para corrosão deve ser destacada na memória de cálculo do equipamento.

Os valores adotados para a sobre-espessura de corrosão são iguais a:

- Sobre-espessura Interna : 1,50 mm
- Sobre-espessura Externa : 0,00 mm

### 5.5 CONFORMAÇÃO DOS TAMPOS (ESMAGAMENTO)

O processo de conformação dos tampos provoca perdas de espessura que variam conforme as dimensões, material e espessuras utilizadas. De acordo com a

experiência dos fornecedores fabricantes de tampos, a perda máxima por conformação para tampos semi-elípticos de aço carbono é de cerca de 20% da espessura nominal da chapa, conforme abaixo:

Espessura da Chapa/mm	Perda por Conformação/mm
9,50	1,90

O fabricante deve verificar se a espessura mínima, após a conformação, é maior que a espessura mínima após conformação calculada na memória de cálculo dos tampos.

A espessura mínima após conformação adotada no projeto é igual a 6,50mm.

#### 5.6 CARREGAMENTO DE PROJETO (DCC- DECLARAÇÃO DE CARGAS CONSIDERADAS)

A tabela E lista os carregamentos considerados, o DCC (Declaração de Cargas Consideradas), no dimensionamento do vaso, conforme exigido pela alínea UG-22 do ASME Seção VIII Div. 1.

<b>Alínea UG-22</b>	<b>Carregamento</b>		<b>Considerado</b>
(a)	Pressão interna de projeto		<b>Sim</b>
	Pressão externa de projeto (Vácuo)		<b>Não</b>
(b)	Pressão hidrostática de líquidos		<b>Sim</b>
	Peso do vaso e do conteúdo na condição de operação		<b>Sim</b>
	Peso do vaso e do conteúdo na condição de teste		<b>Sim</b>
(c)	Reações devidas ao peso de equipamentos conectados ao vaso		<b>Não</b>
(d)	A fixação a	(1) internos	<b>Não</b>
		(2) suportes do vaso	<b>Sim</b>
(e)	Reações cíclicas devidas	à pressão	<b>Não</b>
		às variações térmicas	<b>Não</b>
		a equipamentos sobre o vaso	<b>Não</b>
		a carregamentos mecânicos	<b>Não</b>
	Reações dinâmicas devidas	à pressão	<b>Não</b>
		às variações térmicas	<b>Não</b>
		a equipamentos sobre o vaso	<b>Não</b>
		a carregamentos mecânicos	<b>Não</b>
(f)	Reações devidas ao vento		<b>Não</b>
	Reações sísmicas		<b>Não</b>
	Reações devidas à neve		<b>Não</b>
(g)	Reações de impacto tais como àquelas devidas ao choque do fluido		<b>Não</b>
(h)	Gradientes de temperatura		<b>Não</b>
	Expansão térmica diferencial		<b>Não</b>
(i)	Pressões anormais, como àquelas causadas por deflagração		<b>Não</b>
(j)	Pressão de teste mais a pressão hidrostática atuante durante o teste		<b>Sim</b>

Tabela E – Carregamentos do vaso de acordo com a UG-22 (DCC).

## 5.7 MATERIAIS

Os materiais utilizados na fabricação do vaso pressão devem estar de acordo com as especificações da norma ASME e, de acordo com a Section II Part A, as edições na norma ASTM podem ser utilizadas para a fabricação.

Conforme a tabela F, obtêm-se:

- a) Nominal: chapa comercial/espessura schedule.
- b) Calculado: espessura mínima mais sobre-espessura de corrosão mais tolerância de conformação.
- c) Mínima após Conformação: espessura mínima mais sobre-espessura de corrosão.
- d) As espessuras foram calculadas com a pressão de projeto.

Componentes do Vaso		Material	Espessura/Dimensão			Eficiência da Junta Soldada	Carregamento
			Nominal (mm)	Calculada (mm)	Mínima após Conformação (mm)		
Tampo Superior	Parte Reta	SA-516M Grade 485	9,50	6,33 (d)	6,33 (c)	Sem costura	Pressão Interna
	Abaulado	SA-516M Grade 485	9,50	8,20 (d)	6,50 (h)	Sem costura	Pressão Interna
Costado	Seção Cilíndrica	SA-516M Grade 485	9,50	7,30 (d)	7,30 (c)	0,85	Pressão Interna
Tampo Inferior	Parte Reta	SA-516M Grade 485	9,50	6,43 (d)	6,43 (c)	Sem costura	Pressão Interna
	Abaulado	SA-516M Grade 485	9,50	8,30 (d)	6,50 (h)	Sem costura	Pressão Interna

Tabela F – Material e espessuras mínimas e nominais dos elementos do vaso.

As tensões admissíveis dos materiais utilizados na fabricação do vaso para materiais na temperatura de projeto e na temperatura do teste hidrostático devem ser obtidas do ASME Section II, Part D-Metric, conforme Tabela G abaixo.

Material						Tensão Admissível	
Especificação	Forma de Produto	Dimensões (mm)	Tabela	Página	Linha	MPa	
						-30°C a 40°C	150°C
SA-516M Grade 485	Chapa	Todas	1A	18	19	138	138

Tabela G – Tensões admissíveis dos materiais do vaso.

## 5.8 EFICIÊNCIA DE JUNTA

Todas as juntas soldadas do costado e dos tampos serão juntas de topo, com penetração total, conforme a tabela H a seguir.

Elemento	Junta	Categoria	Tipo	Inspeção Radiográfica	Eficiência do Elemento
Tampo Superior	Longitudinal	A	1	Sem Costura	1,00
	Tampo x Costado	B	1	Radiografia Spot UW-11(a)(5)(b)	
Costado	Longitudinal	A	1	Radiografia Spot UW-11(b)	0,85
Tampo Inferior	Longitudinal	A	1	Sem Costura	1,00
	Tampo x Costado	B	1	Radiografia Spot UW-11(a)(5)(b)	

Tabela H – Juntas soldadas do costado e dos tampos.

## 5.9 PIT (PLANO DE INSPEÇÃO E TESTE)

A fabricação e montagem de Itens do Código são controladas usando um Plano de Inspeção e Testes (PIT).

O PIT é preparado pelo Controle de Qualidade a partir dos desenhos de fabricação ou montagem, que enumera a sequência das operações de fabricação ou montagem, incluindo os ensaios.

Após o término da fabricação ou montagem de um Item do Código, o Inspetor do CQ envolvido executa as inspeções finais. Ele assina e data o PIT quando o item atender a todos os requisitos dimensionais e do Código.

Quando o vaso de pressão não possuir uma abertura ou outros meios de acesso que permitam a inspeção interna, um ponto de inspeção no PIT deve ser previsto para que o Inspetor do CQ possa fazer a inspeção interna antes da execução da solda de fechamento final.

Para um vaso selado, quando o PIT estiver completo, o responsável pelo Controle de Qualidade analisa o plano juntamente com o "AI" e ambos designam os pontos de inspeção do "AI". O Controle de Qualidade e o "AI" assinam e datam o PIT e o Controle de Inspeção de Juntas Soldadas, para liberar estes documentos e dar início à fabricação ou montagem de acordo com o Código.

## 5.10 PRESSÃO HIDROSTÁTICA NAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E TESTE

Durante a operação do vaso e durante o teste hidrostático, os elementos do vaso estão sujeitos apenas à pressão interna acrescida da coluna hidrostática devida ao fluido.

Como a densidade do ar comprimido é menor do que a densidade da água, a densidade do fluido utilizado tanto em operação como no teste hidrostático foi adotada como sendo igual a 1.000 kg/m<sup>3</sup>.

A coluna hidrostática dos elementos do vaso está resumida na tabela I a seguir:

Elemento		Em Operação		Teste Hidrostático	
		Coluna (mm)	Pressão Hidrostática (MPa)	Coluna (mm)	Pressão Hidrostática (MPa)
Tampo Superior	Abaulado	301,5	0,00296	300,0	0,00294
	Parte Reta	326,5	0,00320	325,0	0,00319
Costado	1ª Seção	2526,5	0,02478	2525,0	0,02476
Tampo Inferior	Parte Reta	2551,5	0,02502	2550,0	0,02501
	Abaulado	2853,0	0,02798	2850,0	0,02795

Tabela I – Pressões hidrostáticas em cada elemento do vaso.

A pressão hidrostática é calculada pela seguinte expressão:

$$P_s = \rho gh$$

Onde,

$\rho$  – densidade do líquido, em kg/m<sup>3</sup>.

$g$  – aceleração da gravidade, 9,80665m/s<sup>2</sup>.

$h$  – altura da coluna de líquido, em m.

Nota:

A condição de operação representa a condição do vaso na qual a sobre-espessura de corrosão é totalmente consumida.

A condição de teste hidrostático representa a condição do vaso durante a realização do teste hidrostático exigido pela Norma.

## 5.11 SUMÁRIO DA VERIFICAÇÃO DA MDMT

O código ASME exige que se verifique a isenção do teste de impacto dos materiais descritos na Subsection C, baseada nos procedimentos descritos em UG-20(f) ou UCS-66. Se a isenção não for possível, um teste de impacto de acordo com a UG-84 deve ser realizado.

A análise da isenção do teste de impacto é realizada para todas as partes pressurizadas e para as partes não pressurizadas que são consideradas essenciais para a integridade estrutural do vaso. Os requisitos de teste de impacto devem ser analisados para cada componente, baseado no material, na espessura definida em UCS-66, e na mínima temperatura do metal definida em projeto.

A alínea UG-20(f) isenta o teste de impacto de acordo com a UG-84 para os materiais do vaso de pressão, se todas as condições a seguir forem atendidas:

- Os materiais devem pertencer ao P-Nº 1, Grupo Nº 1 ou 2, e a espessura definida em UCS-66(a), não deve exceder ao valor dado em (a) e (b) a seguir:
  - 13mm ( $\frac{1}{2}$ "), para materiais da Curva A da Fig. UCS-66;
  - 25mm (1") para materiais da Curva B, C ou D da Fig. UCS-66.
- O vaso completo deve ser testado Hidrostaticamente conforme UG 99(b) ou (c) ou 27-4.
- Temperatura de projeto não deve ser maior do que 345°C (650°F) nem menor do que -29°C (20°F). Ocasionalmente temperaturas de operação menores do que -29°C (20°F) são aceitáveis quando devidas à baixa temperatura atmosférica sazonal.
- Esforços de choques térmicos e mecânicos não são um requisito de controle do projeto (ver UG-22).
- Forças cíclicas não é um requisito de controle de projeto (ver UG-22).

Como a MDMT de projeto é igual a -29°C (20°F) e todos os requisitos acima são atendidos, o teste de impacto de acordo com a UG-84 é isento.

A Tabela destaca as espessuras das uniões soldadas de acordo com a UCS-66 e a alínea utilizada para a determinação da MDMT.

Conforme pode ser verificado, não existe a necessidade de teste de impacto para o equipamento.

Resumo MDMT - Verificação do Teste de Impacto											
Mínima Temperatura de Projeto (°C):		-29		Temperatura de Projeto (°C):						150	
Elementos (Uniões)	Partes	Material				Espessura (mm)	Espessura Governante (mm)	Código Solda	Parágrafo Aplicável	MDMT da Parte	Teste Impacto?
		P-Nº	Gr. Nº	Curva UCS 66							
Tampo Sup. c/ costado - Solda Circunf. de topo.	Tampo Superior P. Reta	SA-516M-485	1	2	B	9,50	9,50	SC1	UG-20(f)	-29°C	Não
	Costado	SA-516M-485	1	2	B	9,50					
Costado (Solda Longitudinal de topo).	Costado	SA-516M-485	1	2	B	9,50	9,50	SL1	UG-20(f)	-29°C	Não
Tampo Inf. c/ Costado - Solda Circunf. de topo.	Tampo Inferior P. Reta	SA-516M-485	1	2	B	9,50	9,50	SC2	UG-20(f)	-29°C	Não
	Costado	SA-516M-485	1	2	B	9,50					

Tabela J – Análise da MDMT do vaso.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 CÁLCULO DA ESPESSURA DE COSTADO CILÍNDRICO

Para desenvolvimento do cálculo do costado cilíndrico, deve-se verificar o efeito das pressões internas e externas. Sendo que devido a desconsideração da pressão externa no cálculo, este trabalho não discutirá os passos do efeito desta pressão.

Dados para dimensionamento (Cálculo da Espessura do Costado):

- Dados Geométricos (Vaso Novo)

Diâmetro interno ( $D'$ ): 1.200,0 mm.

Comprimento ( $L_s$ ): 2.200,0 mm.

Espessura nominal ( $t_n$ ): 9,50 mm.

Sobre-espessura de corrosão interna ( $t_{ci}$ ): 1,50 mm.

Sobre-espessura de corrosão externa ( $t_{ce}$ ): 0,00 mm.

- Dados Geométricos (Vaso Corroído):

Diâmetro interno ( $D = D' + 2 t_{ci}$ ): 1.203 mm.

Espessura nominal ( $t$ ): 8,00 mm.

- Pressões e Temperaturas de Projeto:

Pressão interna ( $P_i$ ): 1,100 MPa.

Pressão externa ( $P_e$ ): 0,000 MPa.

Temperatura ( $T$ ): 150 °C.

- Coluna de Líquido e Pressão Estática em Operação:

Densidade de projeto em operação ( $\rho$ ): 1.000,0 kg/m<sup>3</sup>.

Coluna de líquido em operação ( $H_{op}$ ): 2.526,5 mm.

Pressão estática em operação ( $P_s$ ): 0,02478 MPa.

- Pressões e Temperaturas de Teste:

Pressão de teste UG-99(b) ( $P_{\text{teste}}$ ): 1,430 MPa.

Temperatura ( $T_{\text{teste}}$ ): -12 a 48 °C.

- Coluna de Líquido e Pressão Estática em Teste:

Densidade do fluido projeto de teste ( $\rho_{\text{teste}}$ ): 1.000,0 kg/m<sup>3</sup>.

Coluna de líquido no teste hidrostático ( $H_{\text{th}}$ ): 2.525,0 mm.

Pressão estática no teste hidrostático ( $P_{\text{sth}}$ ): 0,02476 MPa.

- Material e Propriedades Mecânicas:

Material: SA-516M Grau 485 (II-D Metric p. 18, In. 19).

Tensão de escoamento ( $S_y$ ) na temperatura de teste: 262 MPa.

Tensão admissível ( $S_t$ ) na temperatura de teste: 138 MPa.

Tensão admissível ( $S$ ) a 150°C: 138 MPa.

Espessura governante ( $t_g$ ) UCS-66: 9,50 mm.

- Juntas Soldadas:

Junta Longitudinal: Cat. A – Rad. Parcial UW-11(b) Tipo 1.

Junta Costado x Tampo Superior: Cat. B – Rad. Spot UW-11(a)(5)(b) Tipo 1.

Junta Costado x Tampo Inferior: Cat. B – Rad. Spot UW-11(a)(5)(b) Tipo 1.

Eficiência da junta longitudinal  $E$ : 0,85.

Eficiência da junta circunferencial  $E_c$ : 0,70.

### 6.1.1 Pressão Interna

Deverá ser seguido para esta etapa o UG-27 do ASME Section VIII Division 1, que diz que a análise sobre a espessura deverá ocorrer sobre as tensões circunferenciais e longitudinais, considerando o maior valor entre as espessuras calculadas.

Pressão interna:  $P = P_i + P_s = 1,1248$  MPa

Raio interno corroído ( $R_c$ ): 601,50 mm

(1) Tensões Circunferenciais (Circumferential Stress) – Juntas Longitudinais (Longitudinal Joints):

$$t_1 = \frac{PRc}{SE - 0.6P}$$

Sendo,

E: eficiência de junta circunferencial.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

R<sub>c</sub>: raio interno corroído, em mm.

S: tensão admissível do material na temperatura de projeto, em MPa.

t<sub>1</sub>: espessura mínima requerida, em mm.

$$t_1 = \frac{1,1248 \times 601,5}{138 \times 0,85 - 0,6 \times 1,1248} = 5.2827mm$$

Sendo D o diâmetro do casco corroído e o R<sub>c</sub> o raio do casco corroído.

Sendo a espessura mínima requerida t<sub>1</sub> + t<sub>ci</sub> (sobrespessura de corrosão), igual a espessura final t.

Deve-se sempre considerar a espessura comercial maior e mais próxima.

(2) Tensões Longitudinais (Longitudinal Stress) – Juntas Circunferenciais (Circumferential Joints):

A espessura do costado calculada através da tensão longitudinal deve considerar a pressão interna acrescida dos esforços devidos ao peso próprio do vaso. As duas condições mais desfavoráveis para o cálculo da espessura mínima são:

- Vaso Sem pressão, região acima no ponto de suporte do vaso. (Região em compressão);
- Vaso Pressurizado, região abaixo do ponto de suporte do vaso. (Região tracionada).

O ponto de suporte do vaso foi adotado 25 mm acima da linha de solda entre o tampo inferior e o costado, sendo o peso do vaso acima da região de suporte igual ao peso do tampo superior, mais o peso do costado.

O peso destes elementos na condição de corrosão total e na condição de vaso novo está mostrado na tabela K:

<b>Contribuição da Força Peso Acima da Linha de Suporte (Compressão) / N</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Novo</b>		<b>Corroído</b>	
	<b>Metal</b>	<b>Líquido</b>	<b>Metal</b>	<b>Líquido</b>
Tampo Superior	-1.277,29	0,00	-1.075,61	0,00
Costado	-6.052,75	0,00	-5.109,70	0,00
<b>Subtotal</b>	<b>-7.330,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-6.185,31</b>	<b>0,00</b>
<b>Total</b>	<b>-7.330,04</b>		<b>-6.185,31</b>	
<b>Peso Adotado</b>	<b>-8.000</b>		<b>-7.000</b>	

Tabela K – Pesos para cálculo da espessura mínima acima da linha de suporte.

O peso abaixo do ponto de suporte do vaso é igual ao peso do líquido contido dentro do vaso mais o peso do tampo inferior e dos seus bocais, conforme tabela L:

<b>Contribuição da Força Peso Abaixo da Linha de Suporte (Tração) / N</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Novo</b>	<b>Corroído</b>
Tampo Inferior	1.277,29	1.075,61
Peso do Líquido	29.711,63	29.886,24
<b>Total</b>	<b>30.988,92</b>	<b>30.961,85</b>
<b>Peso Adotado</b>	<b>31.000</b>	<b>31.000</b>

Tabela L – Pesos para cálculo da espessura mínima abaixo da linha de suporte.

Tensão de compressão admissível de acordo com UG-23(b). Ver tabela M:

<b>Condição</b>	<b>R<sub>o</sub> mm</b>	<b>t mm</b>	<b>Fator A</b>	<b>Fator B MPa</b>	<b>S MPa</b>	<b>S<sub>c</sub> MPa</b>
Temperatura de Projeto/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Projeto/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25
Temperatura de Teste/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Teste/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25

Tabela M – Tensões de compressão admissíveis do costado.

Notas:

- a)  $R_o$  = raio externo
- b)  $t$  = espessura
- c)  $A = 0,125/(R_o/t)$  - UG-23(b) Step 1
- d)  $S$  = tensão máxima admissível de tração - UG-23(a)
- e)  $S_c$  = menor entre  $S$  e  $B$

- Espessura para Vaso Corroído e Despressurizado.

A espessura é calculada através da seguinte equação:

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_c}$$

Sendo,

$W$ : peso vaso corroído, em N.

$S_c$ : tensão de compressão, em MPa.

$R_m$ : raio médio corroído  $(R_c + \frac{t_n - t_{ci}}{2})$ , em mm.

$t_w$ : espessura mínima, em mm.

$$t_w = \frac{7.000}{2\pi \left(601,5 + \frac{9,50 - 1,5}{2}\right) \times 97,434} = 0,0189mm$$

- Espessura para Vaso Corroído e Pressurizado.

A espessura mínima nesta condição de operação ( $t_2$ ) é igual à soma da espessura mínima para pressão interna ( $t$ ), considerando a tensão longitudinal, mais a espessura mínima considerando o peso do tampo inferior e do líquido ( $t_w$ ).

$$t_2 = t + t_w$$

Onde,

$$t = \frac{PRc}{2SE + 0,4P}$$

Sendo,

E: eficiência da junta circunferencial.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

Rc: raio interno da seção do costado corroída, em mm.

S: tensão admissível do material na temperatura de projeto, em MPa.

t: espessura mínima requerida, em mm.

$$t = \frac{1,1 \times 601,5}{2 \times 138 \times 0,70 + 0,4 \times 1,1} = 3,4169mm$$

E onde,

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t E}$$

Sendo,

W: peso vaso corroído em N.

S: tensão admissível de Compressão, em MPa.

E: eficiência da junta circunferencial.

Rm: raio médio corroído ( $Rc + \frac{tn-tci}{2}$ ), em mm.

tw: espessura mínima, em mm.

$$t_w = \frac{31.000}{2\pi \left(601,5 + \frac{9,50 - 1,5}{2}\right) \times 138 \times 0,7} = 0,0844mm$$

Com isso,

$$t_2 = t + t_w = 3,4169 + 0,0844 = 3,5009mm$$

Para a espessura mínima, sempre deverá ser considerado a maior espessura requerida (t) entre as tensões Circunferenciais e Longitudinais. Sendo a espessura

mínima para tensão longitudinal, considerando os esforços de peso e a pressão interna, igual a 3,5009mm. Como esta espessura é menor que a espessura calculada no para tensão circunferencial (5,8011mm), o peso do vaso não governa a condição de projeto. Deste modo o costado será analisado apenas considerando a tensão circunferencial.

(3) Para a Espessura Nominal comercial, adotar:

Espessura Mínima  $t = \text{maior}(t_1; t_2)$ : 5,80 mm

Espessura Mínima + Sobre-espessura de Corrosão ( $t_{ci}$ ): 7,30 mm

Espessura Nominal comercial adotada ( $t_n$ ): 9,50 mm

(4) UCS-79(d) Alongamento de fibra externa

Espessura da Chapa ( $t$ ): 9,50 mm

Raio Central Final da Linha de Centro ( $R_f$ ): 604,75 mm

Raio Original da Linha de Centro ( $R_0$ ):  $\infty$  mm

$$\varepsilon = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_0} \right)$$

Sendo,

$\varepsilon$  (%): alongamento da fibra externa.

$R_f$ : raio central final da linha de centro, em mm.

$R_0$ : raio original da linha de centro, em mm.

$t$ : espessura da chapa, em mm.

$$\varepsilon = \frac{50 \times 9,5}{604,75} \left( 1 - \frac{604,75}{\infty} \right) = 0,7855\%$$

O alongamento da fibra externa não excede 5%. Ok.

(5) Tensão durante o teste hidrostático

Adotando um procedimento por U-2(g) para o cálculo da tensão máxima durante o teste hidrostático de fábrica, tem-se:

Raio interno do costado (R): 600 mm

Espessura nominal do costado (t): 9,50 mm

Pressão local no teste ( $P = P_{\text{teste}} + P_{\text{sth}}$ ): 1,4548 MPa

Tensão admissível durante o teste ( $S_{\text{allow}} = 0,9S_y$ ): 235,8 MPa

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

Sendo,

S: tensão circunferencial máxima durante o teste (no costado), em MPa.

P: pressão local durante o teste, em MPa.

R: raio interno do costado, em mm.

E: eficiência da junta longitudinal.

$$S = \frac{1,4548 \times (600 + 0,6 \times 9,5)}{0,85 \times 9,5} = 109,1 \text{ MPa}$$

A tensão calculada (109,1 MPa) é menor do que a tensão máxima admissível (235,8 MPa). Ok.

## (6) Conclusão

Como a espessura nominal comercial adotada ( $t_n$ ) é maior do que a espessura mínima mais a sobre-espessura de corrosão, a espessura adotada é aceitável.

### 6.1.2 Pressão Externa

Deverá ser seguido para esta etapa o UG-28 do ASME Section VIII Division 1. Para o dimensionamento do costado de casco cilíndrico para pressão externa, deve-se utilizar a espessura requerida (t) calculada na seção anterior, se necessário, “Steps” 1 a 8 do UG-28(c) da página 21 a 23 do ASME Section VIII Division 1, Ed. 2010, que diz:

Step (1):

Calcular valores para  $D_o/t$  e  $L/D_o$ :

$$D_o = D(\text{corroído}) + 2t \rightarrow D_o/t \geq 10;$$

Para o cálculo de  $L/D_o$  é necessário verificar que L é a Linha de Tangência do equipamento entre o costado e os tampos, sendo,

$$L = l + 2 \times h/3;$$

l (comprimento do costado);

h (altura máxima entre o topo do tampo e a linha entre a saia do tampo e o costado), então, utilizar  $h/3$ ;

Com isso, encontra-se o valor de L.

Step (2) e (3):

Entrar com os valores interpolados de  $D_o/t$  e  $L/D_o$  na Fig.G Subpart 3 do ASME II Part D, para determinar o valor para o fator A (ver pelo gráfico página 748 do ASME 2010).

Step (4) e (5):

Usar o valor de A calculado no Step 3, entrar com o material do casco e dos tampos (A-516 Gr.70) no ASME II Part D conforme tabela Y-1 (tabela da página 546 do ASME 2010), para obtenção da Tensão de Escoamento ( $S_y$ ) em função da Temperatura de Projeto (T) e, se necessário, interpolar os valores entre T e  $S_y$  para obtenção do resultado.

Na sequência, deve-se calcular o fator B. Para tanto, utilizar o valor de  $S_y$ , que sendo maior do que 207MPa, deve-se entrar com a Fig. CS-2 no ASME II Part D desenvolvida para aço carbono e baixa liga (gráfico da página 750 do ASME 2010) e, se necessário, interpolar os valores entre o Fator A e a Temperatura de Projeto (T) para obtenção do Fator B.

Step (6):

Usando o valor do fator B, calcular a Máxima Pressão Externa de Trabalho Admissível ( $P_a$ ), para:

$$P_a = 4B / 3(D_o/t);$$

Sendo a Pressão de Vácuo ( $P_v$ ) igual a Pressão Atmosférica ( $P_{atm}$ ), temos  $P_v = 0,101\text{MPa}$ .

Se acontecer de  $P_a > P_v$ , conclui-se que a espessura requerida ( $t$ ) calculada na seção anterior está aprovada para o costado do vaso, pois resistirá aos efeitos da pressão externa.

## 6.2 CÁLCULO DA ESPESSURA PARA TAMPOS ELIPSOIDAL 2:1

Para desenvolvimento do cálculo do tampo elipsoidal, deve-se verificar o efeito das pressões internas e externas nos tampos superiores e inferiores. Sendo que devido a desconsideração da pressão externa no cálculo, este trabalho não discutirá os passos do efeito desta pressão.

Dados para dimensionamento dos tampos:

- Dados Geométricos (Vaso Novo)

Tipo: Tampo Semi-elíptico 2:1

Diâmetro interno ( $D'$ ): 1.200,0 mm

Altura interna do abaulado do tampo ( $h'$ ): 300,0 mm

Altura da parte reta ( $h_s$ ): 25 mm

Espessura nominal ( $t_n$ ): 9,50 mm

Perda máxima por conformação ( $t_e = 20\%t_n$ ): 1,90 mm

Sobre-espessura de corrosão interna ( $t_{ci}$ ): 1,50 mm

Sobre-espessura de corrosão externa ( $t_{ce}$ ): 0,00 mm

- Dados Geométricos (Vaso Corroído)

Diâmetro interno ( $D = D' + 2 t_{ci}$ ): 1.203,0 mm

Altura interna do abaulado do tampo ( $h = h' + t_{ci}$ ): 301,5 mm

- Pressões e Temperaturas de Projeto

Pressão interna ( $P_i$ ): 1,100 MPa

Pressão externa ( $P_e$ ): 0,000 MPa

Temperatura ( $T$ ): 150°C

- Coluna de Líquido e Pressão Estática em Operação

Densidade de projeto em operação ( $\rho$ ): 1.000,0 kg/m<sup>3</sup>

Para tempo superior:

Coluna de líquido do abaulado ( $H_{opd}$ ): 301,5 mm

Coluna de líquido da parte reta ( $H_{opsf}$ ): 326,5 mm

Pressão estática do abaulado ( $P_{sd}$ ): 0,00296 MPa

Pressão estática na parte reta ( $P_{ssf}$ ): 0,00320 MPa

Para tempo inferior:

Coluna de líquido da parte reta ( $H_{opsf}$ ): 2.526,5 mm

Coluna de líquido do abaulado ( $H_{opd}$ ): 2.551,5 mm

Pressão estática na parte reta ( $P_{ssf}$ ): 0,02478 MPa

Pressão estática do abaulado ( $P_{sd}$ ): 0,02502 MPa

- Coluna de Líquido e Pressão Estática em Teste

Densidade do fluido de teste ( $\rho_{teste}$ ): 1.000,0 kg/m<sup>3</sup>

Para tempo superior:

Coluna de líquido do abaulado ( $H_{testd}$ ): 300,0 mm

Coluna de líquido da parte reta ( $H_{testsf}$ ): 325,0 mm

Pressão estática do abaulado ( $P_{sthd}$ ): 0,00294 MPa

Pressão estática na parte reta ( $P_{sthsf}$ ): 0,00319 MPa

Para tempo inferior:

Coluna de líquido da parte reta ( $H_{testsf}$ ): 2.525,0 mm

Coluna de líquido do abaulado ( $H_{testd}$ ): 2.550,0 mm

Pressão estática na parte reta ( $P_{sthsf}$ ): 0,02476 MPa

Pressão estática do abaulado ( $P_{sthd}$ ): 0,02501 MPa

- Material e Propriedades Mecânicas

Material SA-516M Grau 485 (II-D Metric p. 18, In. 19)

Tensão de escoamento na temperatura de teste ( $S_y$ ): 262 MPa

Tensão admissível na temperatura de teste ( $S_t$ ): 138 MPa

Tensão admissível a 150°C ( $S$ ): 138 MPa

Espessura governante UCS-66 ( $t_g$ ): 9,50 mm

- Juntas Soldadas

Junta Longitudinal: Sem costura

Junta Costado x Tampo: Cat. B – Rad. Spot UW-11(a)(5)(b) Tipo 1

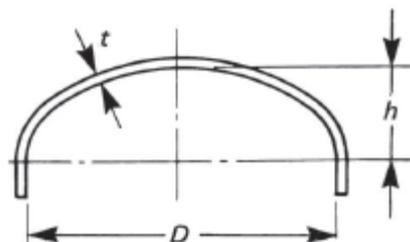
Eficiência de junta (E): 1,00

### 6.2.1 Tampo Superior

Deverá ser seguido para esta etapa o UG-32 e o UG-33 do ASME Section VIII Division 1, que diz que a análise sobre a espessura deverá ocorrer apenas sobre as pressões externas e internas.

#### 6.2.1.1 Pressão Interna

Para tampo elipsoidal com  $t_s/L \geq 0,002$ , a espessura requerida de um tampo abaulado, em que a metade do eixo menor (na profundidade do tampo menos a saia) é igual a um quarto do diâmetro interno da saia do tampo, conforme o UG 32 do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 376 e 377). Ver abaixo a ilustração para tampo elipsoidal:



Antes do cálculo da espessura da parte abaulada do tampo, deverá ser checado o cálculo da parte reta do tampo.

- (1) Parte reta: Espessura mínima sob pressão interna para Tensões Circunferenciais (Circumferential Stress) – Juntas Longitudinais (Longitudinal Joints):

Raio interno corroído ( $R_c$ ): 601,50 mm

Pressão interna ( $P = P_i + P_{sthsf}$ ): 1,1032 MPa

Espessura mínima UG-27(c)(1) ( $t_1$ ): 4,8317 mm

Sendo,

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Onde,

E: eficiência da junta longitudinal.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

R: raio interno da parte reta corroída, em mm.

S: tensão de projeto, em MPa.

t<sub>1</sub>: espessura mínima, em mm.

$$t_1 = \frac{1,1032 \times 601,5}{138 \times 1 - 0,6 \times 1,1032} = 4,8317 \text{ mm}$$

(2) Parte reta: Espessura mínima sob pressão interna para Tensões Longitudinais (Longitudinal Stress) – Juntas Circunferenciais (Circumferential Joints):

A espessura da parte reta calculada através da tensão longitudinal deve considerar a pressão interna acrescida dos esforços devidos ao peso próprio do vaso.

O peso do vaso acima da parte na condição de corrosão total e na condição de vaso novo está mostrado na tabela N.

<b>Contribuição da Força Peso Acima da Linha de Suporte (Compressão) / N</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Novo</b>		<b>Corroído</b>	
	<b>Metal</b>	<b>Líquido</b>	<b>Metal</b>	<b>Líquido</b>
Tampo Superior	-1.277,29	0,00	-1.075,61	0,00
<b>Subtotal</b>	<b>-1.277,29</b>	<b>0,00</b>	<b>-1.075,61</b>	<b>0,00</b>
<b>Total</b>	<b>-1.277,29</b>		<b>-1.075,61</b>	
<b>Peso Adotado</b>	<b>-1.300</b>		<b>-1.100</b>	

Tabela N – Pesos para cálculo da espessura mínima.

Tensão de compressão admissível de acordo com UG-23(b). Ver tabela O.

Condição	R <sub>o</sub> mm	t mm	Fator A	Fator B MPa	S MPa	S <sub>c</sub> MPa
Temperatura de Projeto/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Projeto/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25
Temperatura de Teste/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Teste/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25

Tabela O – Tensões de compressão admissíveis da parte reta.

Notas:

- a) R<sub>o</sub> = raio externo
- b) t = espessura
- c) A = 0,125/(R<sub>o</sub>/t) - UG-23(b) Step 1
- d) S = tensão máxima admissível de tração - UG-23(a)
- e) S<sub>c</sub> = menor entre S e B

- Espessura para vaso corroído e pressurizado

A espessura mínima nesta condição de operação é igual à soma da espessura mínima para pressão interna, considerando a tensão longitudinal, mais a espessura mínima considerando o peso do tampo inferior e do líquido.

A espessura mínima sob pressão interna, conforme visto no cálculo para o costado, considerando a tensão longitudinal, é dada por:

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

Onde,

E: eficiência da junta circunferencial.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

R<sub>c</sub>: raio interno da parte reta corroída, em mm.

S: tensão de projeto, em MPa.

t: espessura mínima, em mm.

$$t = \frac{1,1 \times 601,5}{2 \times 138 \times 0,7 + 0,4 \times 1,1} = 3,4169mm$$

A espessura devida ao peso do vaso é dada pela seguinte equação:

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t E}$$

Onde,

W: peso, em N.

S<sub>t</sub>: tensão admissível de tração, em MPa.

E: eficiência da junta circunferencial.

R<sub>m</sub>: raio médio corroído, em mm.

t<sub>w</sub>: espessura mínima, em mm.

$$t_w = \frac{-1.100}{2\pi \left(601,5 + \frac{9,50 - 1,5}{2}\right) \times 138 \times 0,7} = -0,0030mm$$

A espessura mínima para esta condição é igual a:

$$t_2 = t + t_w = 3,4169 - 0,0030 = 3,4139 \text{ mm}$$

A espessura mínima da parte reta é igual à maior espessura entre a espessura calculada para a tensão circunferencial (t<sub>1</sub>) e a espessura calculada para a tensão longitudinal (t<sub>2</sub>):

$$t = 4,8317mm$$

- (3) Parte Abaulada: A espessura mínima especificada do tampo após a conformação (t<sub>s</sub>) deverá ser t<sub>s</sub> ≥ t. Determinar a espessura do tampo pela fórmula:

$$t = \frac{PDK}{2SE - 0,2P}$$

Sendo,

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D}{2h} \right)^2 \right]$$

K poderá ser calculada conforme fórmula acima ou poderá ser utilizado a Tabela 1-4.1, pela relação D/2h, conforme o Apêndice 1 do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 377).

Tabela 1-4.1  
Valores do Fator K

<i>D/2h</i>	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
<i>K</i>	1.83	1.73	1.64	1.55	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.07	1.00
<i>D/2h</i>	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	...
<i>K</i>	0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.57	0.53	0.50	...

Onde,

E: eficiência de junta (E = 1,0).

P: pressão interna de projeto (P = P<sub>i</sub> + P<sub>sd</sub> = 1,1030), em MPa.

D: diâmetro interno corroído (D = D' + 2t<sub>ci</sub> = 1203,0), em mm.

h: altura interna corroída (h = h' + t<sub>ci</sub> = 301,5), em mm.

K: fator de forma do tampo semi-elíptico.

S: tensão de projeto (S = 138), em MPa.

t: espessura mínima requerida, em mm.

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{1203}{2 \times 301,5} \right)^2 \right] = 0,9967$$

$$t = \frac{1,1030 \times 1.203 \times 0,9967}{2 \times 138 \times 1 - 0,2 \times 1,1030} = 4,7956mm$$

Obter L = K<sub>1</sub>D para tampo elipsoidal onde K<sub>1</sub> é obtida da Tabela UG-37, do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 44), conforme abaixo:

Tabela UG-37  
Valores de Raios Esféricos do Fator  $K_1$

$D/2h$	...	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
$K_1$	...	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99
$D/2h$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
$K_1$	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

$$\frac{D}{2h} = \frac{1203}{2 \times 301,5} = 1,995$$

Interpolando  $D/2h$  calculado, obtém-se  $K_1 = 0,8775$ ,

$$L = K_1 D = 0,8775 \times 1203 = 1055,63 \text{ mm}$$

Para tampos conformados, deve-se utilizar a recomendação de fornecedores de tampos rebordeados para a espessura final de  $ts'$ , sendo:

$$ts' = t + 20\%t + tci = 4,7956 + 4,7956 \times 20\% + 1,5$$

$$ts' = 7,25 \text{ mm}$$

Com isso, verificar se  $ts/L \geq 0,002$ .

Sendo a espessura mínima requerida  $t = ts = 4,7956\text{mm}$  e  $L = 1055,63\text{mm}$ , portanto,  $ts/L$  é maior que 0,002.

Com isso, conclui-se que a sequência realizada para o cálculo da espessura está aprovada.

Sempre considerar a espessura nominal comercial maior e mais próxima para  $ts' = 7,25$ , ou seja,  **$t_n = 9,5 \text{ mm}$** .

#### (4) Espessura mínima e espessura nominal

- Parte reta

Espessura mínima (t): 4,83 mm

Espessura mínima + corrosão ( $t_c$ ): 6,33 mm

- Semi-elíptico

Espessura mínima (t): 4,80 mm

Espessura mínima + corrosão ( $t_c$ ): 6,30 mm

Espessura mínima + corrosão + esmagamento ( $t_f$ ): 7,25 mm

- Espessura mínima do tampo após conformação

Espessura mínima do tampo após conformação ( $t_{min}$ ): 6,33 mm

- Espessura adotada

Espessura nominal comercial ( $t_n$ ): 9,50 mm

Espessura mínima adotada ( $t_{min}$ ): 6,50 mm

Como a espessura nominal adotada ( $t_n$ ) é maior do que a espessura mínima mais a sobre-espessura de corrosão e a perda por conformação, a espessura adotada é aceitável.

#### (5) UCS-79(d) Alongamento da Fibra Externa

- Parte reta

Espessura da Chapa (t): 9,50 mm

Raio Central Final da Linha de Centro ( $R_f$ ): 604,75 mm

Raio Original da Linha de Centro ( $R_o$ ):  $\infty$  mm

$$\varepsilon = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

Onde:

$\varepsilon$ : % alongamento da fibra externa.

$R_f$ : raio central final da linha de centro, em mm.

$R_o$ : raio original da linha de centro, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$\varepsilon = \frac{50 \times 9,5}{604,75} \left( 1 - \frac{604,75}{\infty} \right) = 0,7855\%$$

O alongamento da fibra externa não excede 5%. Ok.

- Abaulado

Espessura da Chapa (t): 9,50 mm

Raio Central Final da Linha de Centro (R<sub>f</sub>): 208,75 mm

Raio Original da Linha de Centro (R<sub>o</sub>): ∞ mm

$$R_f = 0,17D + \frac{t}{2}$$

Onde,

R<sub>f</sub>: raio central final da linha de centro, em mm.

D: diâmetro interno do tampo, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$R_f = 0,17 \times 1.200 + \frac{9,5}{2} = 208,75\text{mm}$$

$$\varepsilon = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

Onde,

ε: % alongamento da fibra externa.

R<sub>f</sub>: raio central final da linha de centro, em mm.

R<sub>o</sub>: raio original da linha de centro, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$\varepsilon = \frac{75 \times 9,5}{208,75} \left( 1 - \frac{208,75}{\infty} \right) = 3,4132\%$$

O alongamento da fibra externa não excede 5%. Ok.

#### (6) Adelgaçamento da transição

Comprimento da redução exigida por UW-13(b)(3) Não

Espessura do Tampo Conformado (t<sub>h</sub>): 9,50 mm

Espessura Nominal do Costado (t<sub>s</sub>): 9,50 mm

Excentricidade entre Costado e Tampo (y): 0,00 mm

Diferença na Espessura entre Costado e Tampo: 0,00 mm

Razão: Diferença na Espessura / Espessura da Seção mais Fina: 0,00

(7) Tensão durante o teste hidrostático

Adotando um procedimento por U-2(g) para cálculo da tensão máxima durante o teste hidrostático de fábrica tem-se:

- Parte reta

Raio interno do costado (R): 600 mm

Espessura nominal do costado (t): 9,50 mm

Pressão local no teste ( $P = P_{\text{teste}} + P_{\text{sh}}$ ): 1,4332 MPa

Tensão admissível durante o teste ( $S_{\text{allow}} = 0,9S_y$ ): 235,8 MPa

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

Onde,

S: tensão circunferencial máxima durante o teste, em MPa.

P: pressão local durante o teste, em MPa.

R: raio interno do costado, em mm.

E: eficiência da junta longitudinal.

$$S = \frac{1,4332 \times (600 + 0,6 \times 9,5)}{1 \times 9,5} = 91,4 \text{ MPa}$$

A tensão calculada (91,4 MPa) é menor do que a tensão máxima admissível (235,8 MPa). Ok.

- Parte abaulada

Diâmetro interno (D): 1203 mm

Fator K: 1,00

Eficiência de junta (E): 1,00

Pressão local no teste ( $P = P_{\text{teste}} + P_{\text{sh}}$ ): 1,4329 MPa

Tensão admissível durante o teste ( $S_{\text{allow}} = 0,9S_y$ ): 235,8 MPa

$$S = \frac{PDK + 0,2Pt}{2Et}$$

Onde,

S: tensão máxima durante o teste, em MPa.

P: pressão local durante o teste, em MPa.

D: diâmetro interno, em mm.

K: fator de tempo semi-elíptico.

t: espessura mínima esperada para a região abaulada, em mm.

E: eficiência de junta.

$$S = \frac{1,4329 \times 1.200 \times 1 + 0,2 \times 1,4329 \times 6,50}{2 \times 1 \times 6,50} = 132,41 \text{MPa}$$

A tensão calculada (132,41 MPa) é menor do que a tensão máxima admissível (235,8 MPa). Ok.

#### 6.2.1.2 Pressão Externa

Para realização desta etapa deve-se utilizar o UG-33 para verificação da pressão externa ( $P_a$ ), sendo que deve-se calcular os Fatores A e B pelo UG-28(d), assim:

$$\text{Fator A} = 0,125 / (R_o/t);$$

Considerar o raio externo ( $R_o$ , outside radius), como sendo  $R_o = K_o D_o$ .

Sendo,

$K_o$  o fator de forma do tempo semi-elíptico em função da relação  $D_o/2h_o$  (ver Tabela UG-33.1 abaixo):

Tabela UG-33.1

Valores do fator  $K_o$  para tambo elipsoidal com pressão externa

$D_o/2h_o$	...	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
$K_o$	...	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99
$D_o/2h_o$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
$K_o$	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

Ou  $K_o$  poderá ser calculado pela formula abaixo:

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_o}{2h_o} \right)^2 \right]$$

Considerando  $h_o$  é a altura interna do tambor mais a espessura mínima requerida e  $D_o$  o diâmetro externo da saia do tambor.

Assim:

Seguir, se necessário, os “Steps” 2 a 6 do UG-28(d) da página 23 e 24 do ASME Section VIII Division 1, Ed 2010, para a verificação da Pressão Externa ( $P_a$ ), que diz:

Step (2) e (3):

Usar o valor de  $A$  calculado, entrar com o material dos tambores (A-516 Gr.70) no ASME II, subpart 3, Part D, conforme tabela Y-1 (tabela da página 546 do ASME 2010), para obtenção da Tensão de Escoamento ( $S_y$ ) em função da Temperatura de Projeto ( $T$ ) e, se necessário, interpolar os valores entre  $T$  e  $S_y$  para obtenção do valor de  $B$ .

Para tanto, utilizar o valor de  $S_y$ , que sendo maior do que 207 MPa, deve-se entrar com a Fig. CS-2 no ASME II Part D desenvolvida para aço carbono e baixa liga (gráfico da página 750 do ASME VIII, Ed 2010) e, se necessário, interpolar os valores entre o Fator  $A$  e a Temperatura de Projeto ( $T$ ) para obtenção do Fator  $B$ .

Step (4):

Usando o valor de “ $B$ ”, calcular a Máxima Pressão Externa de Trabalho Admissível ( $P_a$ ), para os casos quando o valor de “ $A$ ” estiver a direita após

gráfico, fazer a projeção considerando o valor final entre a linha de material e temperatura, assim:

$$Pa = \frac{B}{\left(\frac{Ro}{t}\right)}$$

Step 5:

Para valores de “A” a esquerda, considerando a linha a esquerda entre material e temperatura, deve-se calcular “Pa” usando a formula:

$$Pa = \frac{0,0625E}{\left(\frac{Ro}{t}\right)^2}$$

Step 6:

Comparando “Pa” obtido nos “Steps 4 ou 5”, sendo para “Pa” menor que “P” o valor do cálculo será usado para “t”, mas para “Pa” maior ou igual a “P”, deve-se verificar os dados de entrada do projeto.

Sendo a Pressão de Vácuo ( $P_v$ ) igual a Pressão Atmosferica ( $P_{atm}$ ), temos  $P_v = 0,101\text{MPa}$ .

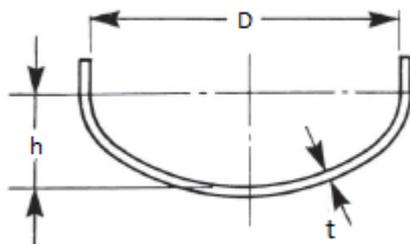
Com isso, se  $P_a > P_v$ , conclui-se que a espessura  $t$  calculada está aprovada para o tempo do vaso, pois resistirá aos efeitos da pressão externa.

### 6.2.2 Tampo Inferior

Deverá ser seguido para esta etapa o UG-32 e o UG-33 do ASME Section VIII Division 1, que diz que a análise sobre a espessura deverá ocorrer sobre as pressões externas e internas, além da análise sobre a coluna d’água e o peso próprio (lembrando que o peso próprio tem mais influencia a partir da linha de suporte).

### 6.2.2.1 Pressão Interna

Para tampo elipsoidal com  $t_s/L \geq 0,002$ , a espessura requerida de um tampo abaulado, em que a metade do eixo menor (na profundidade do tampo menos a saia) é igual a um quarto do diâmetro interno da saia do tampo, conforme o UG 32 do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 376 e 377). Ver abaixo a ilustração para tampo elipsoidal:



Antes do cálculo da espessura da parte abaulada do tampo, deverá ser checado o cálculo da parte reta do tampo.

- (1) Parte reta: Espessura mínima sob pressão interna para Tensões Circunferenciais (Circumferential Stress) – Juntas Longitudinais (Longitudinal Joints):

Raio interno corroído ( $R_c$ ): 601,50 mm

Pressão interna ( $P = P_i + P_{sthd}$ ): 1,1250 MPa

Espessura mínima UG-27(c)(1) ( $t_1$ ): 4,9276 mm

Sendo,

$$t_1 = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Onde,

E: eficiência da junta longitudinal.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

R: raio interno da parte reta corroída, em mm.

S: tensão de projeto, em MPa.

t<sub>1</sub>: espessura mínima, em mm.

$$t_1 = \frac{1,1250 \times 601,5}{138 \times 1 - 0,6 \times 1,1250} = 4,9276 \text{ mm}$$

(1) Parte reta: Espessura mínima sob pressão interna para Tensões Longitudinais (Longitudinal Stress) – Juntas Circunferenciais (Circumferential Joints):

A espessura da parte reta calculada através da tensão longitudinal deve considerar a pressão interna acrescida dos esforços devidos ao peso próprio do vaso.

O peso do vaso abaixo da parte reta na condição de corrosão total e na condição de vaso novo está mostrado na tabela P.

<b>Contribuição da Força Peso Abaixo da Linha de Suporte (Tração) / N</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Peso Novo</b>	<b>Peso Corroído</b>
Tampo Inferior	1.277,29	1.075,61
Peso do Líquido	29.711,63	29.886,24
<b>Total</b>	<b>30.988,92</b>	<b>30.961,85</b>
<b>Peso Adotado</b>	<b>31.100</b>	<b>31.000</b>

Tabela P – Pesos para cálculo da espessura mínima.

Tensão de compressão admissível de acordo com UG-23(b). Ver tabela Q.

<b>Condição</b>	<b>R<sub>o</sub> mm</b>	<b>t mm</b>	<b>Fator A</b>	<b>Fator B MPa</b>	<b>S MPa</b>	<b>S<sub>c</sub> MPa</b>
Temperatura de Projeto/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Projeto/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25
Temperatura de Teste/Corroído	609,50	8,00	0,001641	97,434	138	97,434
Temperatura de Teste/Novo	609,50	9,50	0,001948	102,25	138	102,25

Tabela Q – Tensões de compressão admissíveis da parte reta.

Notas:

a) R<sub>o</sub> = raio externo

b) t = espessura

- c)  $A = 0,125/(R_o/t)$  - UG-23(b) Step 1  
 d) S = tensão máxima admissível de tração - UG-23(a)  
 e)  $S_c =$  menor entre S e B

- Espessura para vaso corroído e pressurizado

A espessura mínima nesta condição de operação é igual à soma da espessura mínima para pressão interna, considerando a tensão longitudinal, mais a espessura mínima considerando o peso do tampo inferior e do líquido. A espessura mínima sob pressão interna, conforme visto no cálculo para o costado, considerando a tensão longitudinal, é dada por:

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

Onde,

E: eficiência da junta circunferencial.

P: pressão interna de projeto, em MPa.

R<sub>c</sub>: raio interno da parte reta corroída, em mm.

S: tensão de projeto, em MPa.

t: espessura mínima, em mm.

$$t = \frac{1,1 \times 601,5}{2 \times 138 \times 0,7 + 0,4 \times 1,1} = 3,4169mm$$

A espessura devida ao peso do vaso é dada pela seguinte equação:

$$t_w = \frac{W}{2\pi R_m S_t E}$$

Onde,

W: peso, em N.

S<sub>t</sub>: tensão admissível de tração, em MPa.

E: eficiência da junta circunferencial.

R<sub>m</sub>: raio médio corroído, em mm.

t<sub>w</sub>: espessura mínima, em mm.

$$t_w = \frac{31.100}{2\pi \left(601,5 + \frac{9,50 - 1,5}{2}\right) \times 138 \times 0,7} = +0,0846\text{mm}$$

A espessura mínima para esta condição é igual a:

$$t_2 = t + t_w = 3,4169 + 0,0846 = 3,5015 \text{ mm}$$

A espessura mínima da parte reta é igual à maior espessura entre a espessura calculada para a tensão circunferencial ( $t_1$ ) e a espessura calculada para a tensão longitudinal ( $t_2$ ):

$$t = 4,9276 \text{ mm}$$

(3) Parte Abaulada: A espessura mínima especificada do tampo após a conformação ( $t_s$ ) deverá ser  $t_s \geq t$ . Determinar a espessura do tampo pela fórmula:

$$t = \frac{PDK}{2SE - 0,2P}$$

Sendo,

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D}{2h} \right)^2 \right]$$

K poderá ser calculada conforme fórmula acima ou poderá ser utilizado a Tabela 1-4.1, pela relação  $D/2h$ , conforme o Apêndice 1 do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 377).

Tabela 1-4.1  
Valores do Fator K

<i>D/2h</i>	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
<i>K</i>	1.83	1.73	1.64	1.55	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.07	1.00
<i>D/2h</i>	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	...
<i>K</i>	0.93	0.87	0.81	0.76	0.71	0.66	0.61	0.57	0.53	0.50	...

Onde,

E: eficiência de junta ( $E = 1,0$ ).

P: pressão interna de projeto ( $P = P_i + P_{sd} = 1,1280$ ), em MPa.

D: diâmetro interno corroído ( $D = D' + 2t_{ci} = 1203,0$ ), em mm.

h: altura interna corroída ( $h = h' + t_{ci} = 301,5$ ), em mm.

K: fator de forma do tampo semi-elíptico.

S: tensão de projeto ( $S = 138$ ), em MPa.

t: espessura mínima requerida, em mm.

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{1203}{2 \times 301,5} \right)^2 \right] = 0,9967$$

$$t = \frac{1,128 \times 1.203 \times 0,9967}{2 \times 138 \times 1 - 0,2 \times 1,128} = 4,9042 \text{ mm}$$

Considerar a espessura em função do peso como  $t_w$  (0,0846 mm) calculado na seção anterior. Sendo,

$$t_3 = t + t_w = 4,9042 + 0,0846 = 4,9888 \text{ mm}$$

Obter  $L = K_1 D$  para tampos elipsoidais onde  $K_1$  é obtida da Tabela UG-37, do ASME Seção VIII Div.1, Ed 2010 (pág. 44), conforme abaixo:

Tabela UG-37  
Valores de Raios Esféricos do Fator  $K_1$

$D/2h$	...	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
$K_1$	...	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99
$D/2h$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
$K_1$	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

$$\frac{D}{2h} = \frac{1203}{2 \times 301,5} = 1,995$$

Interpolando  $D/2h$  calculado, obtem-se  $K_1 = 0,8775$ ,

$$L = K_1 D = 1203 \times 0,8775 = 1055,63 \text{ mm}$$

Para tampos conformados, deve-se utilizar a recomendação de fornecedores de tampos rebordeados para a espessura final de  $ts'$ , sendo,

$$ts' = t + 20\%t + tc_i;$$

$$ts' = 4,9888 + 20\%(4,9888) + 1,5$$

$$ts' = 7,49 \text{ mm}$$

Com isso, verificar se  $ts/L \geq 0,002$ .

Sendo a espessura mínima requerida  $t = ts = 4,9888 \text{ mm}$ , portanto,  $ts/L$  é maior que 0,002.

Com isso, conclui-se que a sequência realizada para o cálculo da espessura está aprovada.

Sempre considerar a espessura nominal comercial maior e mais próxima para  $ts' = 7,49$ , ou seja,  **$t_n = 9,5 \text{ mm}$** .

(4) Espessura mínima e espessura nominal:

- Parte reta

Espessura mínima ( $t$ ): 4,93 mm

Espessura mínima + corrosão ( $tc$ ): 6,43 mm

- Semi-elíptico

Espessura mínima (t): 4,90 mm

Espessura mínima + corrosão ( $t_c$ ): 6,40 mm

Espessura mínima + corrosão + esmagamento ( $t_f$ ): 7,49 mm

- Espessura mínima do tampo após conformação

Espessura mínima do tampo após conformação ( $t_{min}$ ): 6,43 mm

- Espessura adotada

Espessura nominal comercial ( $t_n$ ): 9,50 mm

Espessura mínima adotada ( $t_{min}$ ): 6,50 mm

Como a espessura nominal adotada ( $t_n$ ) é maior do que a espessura mínima mais a sobre-espessura de corrosão e a perda por conformação, a espessura adotada é aceitável.

#### (5) UCS-79(d) Alongamento da Fibra Externa

- Parte reta

Espessura da Chapa (t): 9,50 mm

Raio Central Final da Linha de Centro ( $R_f$ ): 604,75 mm

Raio Original da Linha de Centro ( $R_o$ ):  $\infty$  mm

$$\varepsilon = \frac{50t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

onde:

$\varepsilon$ : % alongamento da fibra externa.

$R_f$ : raio central final da linha de centro, em mm.

$R_o$ : raio original da linha de centro, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$\varepsilon = \frac{50 \times 9,5}{604,75} \left( 1 - \frac{604,75}{\infty} \right) = 0,7855\%$$

O alongamento da fibra externa não excede 5%. Ok.

- Abaulado

Espessura da Chapa (t): 9,50 mm

Raio Central Final da Linha de Centro (R<sub>f</sub>): 208,75 mm

Raio Original da Linha de Centro (R<sub>o</sub>): ∞ mm

$$R_f = 0,17D + \frac{t}{2}$$

Onde,

R<sub>f</sub>: raio central final da linha de centro, em mm.

D: diâmetro interno do tampo, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$R_f = 0,17 \times 1.200 + \frac{9,5}{2} = 208,75\text{mm}$$

$$\varepsilon = \frac{75t}{R_f} \left( 1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

Onde,

ε: % alongamento da fibra externa.

R<sub>f</sub>: raio central final da linha de centro, em mm.

R<sub>o</sub>: raio original da linha de centro, em mm.

t: espessura da chapa, em mm.

$$\varepsilon = \frac{75 \times 9,5}{208,75} \left( 1 - \frac{208,75}{\infty} \right) = 3,4132\%$$

O alongamento da fibra externa não excede 5%. Ok.

#### (6) Adelgaçamento da transição

Comprimento da redução exigida por UW-13(b)(3) Não

Espessura do Tampo Conformado (t<sub>h</sub>): 9,50 mm

Espessura Nominal do Costado (t<sub>s</sub>): 9,50 mm

Excentricidade entre Costado e Tampo (y): 0,00 mm

Diferença na Espessura entre Costado e Tampo: 0,00 mm

Razão: Diferença na Espessura / Espessura da Seção mais Fina: 0,00

(7) Tensão durante o teste hidrostático

Adotando um procedimento por U-2(g) para cálculo da tensão máxima durante o teste hidrostático de fábrica tem-se:

- Parte reta

Raio interno do costado (R): 600 mm

Espessura nominal do costado (t): 9,50 mm

Pressão local no teste ( $P = P_{\text{teste}} + P_{\text{sh}}$ ): 1,4550 MPa

Tensão admissível durante o teste ( $S_{\text{allow}} = 0,9S_y$ ): 235,8 MPa

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

Onde,

S: tensão circunferencial máxima durante o teste (no costado), em MPa.

P: pressão local durante o teste, em MPa.

R: raio interno do costado, em mm.

E: eficiência da junta longitudinal.

$$S = \frac{1,4550 \times (600 + 0,6 \times 9,5)}{1 \times 9,5} = 92,77 \text{ MPa}$$

A tensão calculada (92,8 MPa) é menor do que a tensão máxima admissível (235,8 MPa). Ok.

- Parte abaulada

Diâmetro interno (D): 1203 mm

Fator K: 1,00

Eficiência de junta (E): 1,00

Pressão local no teste ( $P = P_{\text{teste}} + P_{\text{sh}}$ ): 1,4580 MPa

Tensão admissível durante o teste ( $S_{\text{allow}} = 0,9S_y$ ): 235,8 MPa

$$S = \frac{PDK + 0,2Pt}{2Et}$$

Onde,

S: tensão máxima durante o teste (no tampo), em MPa.

P: pressão local durante o teste, em MPa.

D: diâmetro interno, em mm.

K: fator de tampo semi-elíptico.

t: espessura mínima esperada para a região abaulada, em mm.

E: eficiência de junta.

$$S = \frac{1,458 \times 1.200 \times 1 + 0,2 \times 1,458 \times 6,50}{2 \times 1 \times 6,50} = 134,73 \text{ MPa}$$

A tensão calculada (134,7 MPa) é menor do que a tensão máxima admissível (235,8 MPa). Ok.

Para tampos conformados, deve-se utilizar a recomendação de fornecedores de tampos rebordeados para a espessura final de  $ts'$ , sendo:

$$ts' = t + 20\%t + t_{ci};$$

Com isso, verificar se  $ts/L \geq 0,002$ . Sendo a espessura mínima requerida  $t = ts$ , portanto,  $ts/L$  é maior que 0,002. Com isso, conclui-se que a sequência realizada para o cálculo da espessura está aprovada.

Sempre considerar a espessura comercial maior e mais próxima.

#### 6.2.2.2 Pressão Externa

Para realização desta etapa deve-se utilizar o UG-33 para verificação da pressão externa ( $P_a$ ), sendo que deve-se calcular os Fatores A e B pelo UG-28(d), assim:

$$\text{Fator A} = 0,125 / (R_o/t);$$

Considerar o raio externo ( $R_o$ , outside radius), como sendo  $R_o = K_o D_o$ .

Sendo,

$K_o$  o fator de forma do tampo semi-elíptico em função da relação  $D_o/2h_o$  (ver Tabela UG-33.1 abaixo):

Tabela UG-33.1

Valores do fator  $K_o$  para tampo elipsoidal com pressão externa

$D_o/2h_o$	...	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
$K_o$	...	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99
$D_o/2h_o$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
$K_o$	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

Ou  $K_o$  poderá ser calculado pela formula abaixo:

$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_o}{2h_o} \right)^2 \right]$$

Considerando  $h_o$  é a altura interna do tampo mais a espessura mínima requerida e  $D_o$  o diâmetro externo da saia do tampo.

Assim:

Seguir, se necessário, os “Steps” 2 a 6 do UG-28(d) da página 23 e 24 do ASME Section VIII Division 1, Ed 2010, para a verificação da Pressão Externa ( $P_a$ ), que diz:

Step (2) e (3):

Usar o valor de  $A$  calculado, entrar com o material dos tampos (A-516 Gr.70) no ASME II, subpart 3, Part D, conforme tabela Y-1 (tabela da página 546 do ASME 2010), para obtenção da Tensão de Escoamento ( $S_y$ ) em função da Temperatura de Projeto ( $T$ ) e, se necessário, interpolar os valores entre  $T$  e  $S_y$  para obtenção do valor de  $B$ .

Para tanto, utilizar o valor de  $S_y$ , que sendo maior do que 207 MPa, deve-se entrar com a Fig. CS-2 no ASME II Part D desenvolvida para aço carbono e baixa liga (gráfico da página 750 do ASME VIII, Ed 2010) e, se necessário,

interpolando os valores entre o Fator A e a Temperatura de Projeto (T) para obtenção do Fator B.

Step (4):

Usando o valor de “B”, calcular a Máxima Pressão Externa de Trabalho Admissível ( $P_a$ ), para os casos quando o valor de “A” estiver à direita após gráfico, fazer a projeção considerando o valor final entre a linha de material e temperatura, assim:

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{Ro}{t}\right)}$$

Step 5:

Para valores de “A” à esquerda, considerando a linha à esquerda entre material e temperatura, deve-se calcular “ $P_a$ ” usando a fórmula:

$$P_a = \frac{0,0625E}{\left(\frac{Ro}{t}\right)^2}$$

Step 6:

Comparando “ $P_a$ ” obtido nos “Steps 4 ou 5”, sendo para “ $P_a$ ” menor que “P” o valor do cálculo será usado para “t”, mas para “ $P_a$ ” maior ou igual a “P”, deve-se verificar os dados de entrada do projeto.

Sendo a Pressão de Vácuo ( $P_v$ ) igual a Pressão Atmosférica ( $P_{atm}$ ), temos  $P_v = 0,101\text{MPa}$ .

Com isso, se  $P_a > P_v$ , conclui-se que a espessura t calculada está aprovada para o tempo do vaso, pois resistirá aos efeitos da pressão externa.

### 6.3 SUMÁRIO DO TESTE HIDROSTÁTICO

Para minimizar o risco de fratura frágil, é recomendado que a temperatura do metal durante o teste hidrostático seja mantida no mínimo 17°C (30°F) acima da mínima temperatura de projeto do metal, mas não precisa exceder 48°C (120°F);

Como a MDMT do vaso é igual a  $-29^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ), a temperatura do teste hidrostático deve ser maior ou igual a  $-12^{\circ}\text{C}$ .

### 6.3.1 Pressão do teste: Teste baseado na pressão de projeto de acordo ao UG-99(b)

A PMTA do vaso foi igualada à pressão de projeto, sendo considerado para o projeto PMTA igual a Pressão de Projeto que é igual a 1,1 MPa a  $150^{\circ}\text{C}$ .

De acordo com o item UG-99(b), Nota 34, do ASME VIII, Division 1, a pressão de teste hidrostático deve ser maior ou igual ao seguinte valor:

$$P_{teste} = 1,3 \times P \times \frac{S_{teste}}{S_{projeto}}$$

Onde,

$P_{teste}$ : pressão de teste hidrostático, em MPa.

$P$ : pressão projeto do vaso (PMTA igual Pressão de Projeto), em MPa.

$S_{teste}$ : tensão do material na temperatura do teste hidrostático, em MPa.

$S_{projeto}$ : tensão do material na temperatura de projeto, em MPa.

Como para todos os materiais o valor da tensão do material na temperatura do teste hidrostático é igual à tensão do material na temperatura de projeto, a pressão de teste hidrostático é igual a:

$$P_{teste} = 1,3 \times 1,1 \times 1,0$$

$$P_{teste} = 1,4300 \text{ MPa}$$

A tensão na condição de teste é calculada, de acordo com os requisitos de U-2(g), utilizando um procedimento baseado no ASME Section VIII, Division 2, 2004 Edition.

Durante o TH a tensão do vaso não deverá exceder a 90% da tensão de escoamento. Para certificar deverá ser calculada a tensão utilizando a pressão do TH, o diâmetro do vaso, a espessura mínima requerida e a eficiência de junta.

## 6.4 APLICAÇÃO DE TTAT

Para o UCS-56 do ASME VIII Div. 1, o tratamento térmico pós soldagem é obrigatório para todos os vasos ou partes com exceção das condições definidas nas notas das tabelas Table UCS-56 e Table UCS-56.1. A análise, para verificar a necessidade ou não do tratamento térmico, é realizada considerando as espessuras nominais definidas na alínea UW-40(f) e na quantidade de carbono contida no material.

Segundo a tabela do UCS-56, o tratamento térmico é mandatário para:

- Tabela UCS-56-Nota (2) (a) – juntas soldadas com  $t_n > 38\text{mm}$  (1 ½ in).
- Tabela UCS-56-Nota (2) (b) – Juntas soldadas com  $t_n > 32\text{mm}$  (1 ¼ in) até 38mm (1 ½ in ) se houver pré-aquecimento a temperatura mínima de 95°C (200°F) durante a soldagem.
- Tabela UCS-56-Nota (2) (c) – Juntas de qualquer espessura se requerida por UW-2, exceto exceções listadas.

Para o UW-40 (f), a Espessura nominal ( $t_n$ ) deve ser analisada conforme abaixo:

- 1) Partes com espessuras iguais, junta de topo, penetração total:  
 $t_n$  = profundidade total da solda excluído qualquer reforço de solda permitido.
- 2) Solda Chanfro:  
 $t_n$  = profundidade do chanfro.
- 3) Solda Filete:  
 $t_n$  = garganta da solda.
- 4) Solda de Filete + Chanfro:  
 $t_n$  = maior (profundidade do chanfro; garganta da solda).
- 5) Solda pino:  
 $t_n$  = diâmetro do pino.
- 6) Partes com espessura desiguais:
  - a) A mais fina das partes (junta de topo).
  - b) Maior ( $t_{\text{costado}}$ ; Solda Filete) em tampos intermediários.

c)  $t_{\text{costado}}$  em conexões com espelhos; tampos planos; fechamentos; flanges, etc.

d) Nas figuras UW-16.1 e UW-16.2:

$t_n$  = maior (solda pescoço; costado; tampo; chapa de reforço).

e) Conexão Bocal – Flange:

$t_n$ =espessura do bocal.

f) Conexão parte pressurizada e não pressurizada:

$t_n$ =espessura da solda no ponto de junção.

g) Conexão tubo-espelho:

$t_n$ =espessura solda.

A tabela R mostra que o vaso calculado não necessita de tratamento térmico.

Elemento (União)	Material	PNo	GNo	Código Solda	Descrição	tw (mm)	Parágrafo Aplicável	Espessura Nominal (mm)	Tratamento Térmico UCS-56?
Tampos Superior	SA-516M-485	1	2	SC1	Solda Topo Penetração Total	9,50	UW-40(f)(1)	9,50	Não
Costado	SA-516M-485	1	2						
Costado	SA-516M-485	1	2	SL1	Solda Topo Penetração Total	9,50	UW-40(f)(1)	9,50	Não
Costado	SA-516M-485	1	2						
Tampos Inferior	SA-516M-485	1	2	SC2	Solda Topo Penetração Total	9,50	UW-40(f)(1)	9,50	Não
Costado	SA-516M-485	1	2						

Tabela R – Análise do tratamento térmico.

Notas:

- 1) Figura UCS-56-Nota (2)(a) – O tratamento térmico é mandatório para juntas soldadas quando a espessura nominal for:  $t_n > 38\text{mm}$  (1 ½ in).
- 2) Figura UCS-56-Nota (2)(b) – O tratamento térmico é mandatório para juntas soldadas com espessura nominal de  $32\text{mm}$  (1 ¼ in)  $< t_n < 38\text{mm}$  (1 ½ in) a menos que um pré-aquecimento seja aplicado a uma temperatura mínima de  $95^\circ\text{C}$  ( $200^\circ\text{F}$ ) durante a soldagem.
- 3) Figura UCS-56-Nota (2)(c) – O tratamento térmico é mandatório para juntas soldadas de qualquer espessura se requerido por UW-2, exceto para as condições relacionadas em UCS-56-Nota (2)(c).

4) A definição de "espessura nominal" para UCS-56 e outros é dada em UW-40 (f).

5) Para chapas, a espessura antes da conformação pode ser usada, a critério do Fabricante, no lugar da espessura medida na região da junta soldada.

O Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, como já dito anteriormente, se faz com aquecimento uniforme em um equipamento, estrutura ou parte dos mesmos a uma temperatura suficiente, para relaxar a maior parte das tensões residuais, seguido de resfriamento uniforme.

O CQ do fabricante deverá qualificar fornecedores para o serviço de tratamento térmico, verificando procedimento e pessoal qualificado. Esta qualificação deve ser baseada no Código ASME, sendo que o fornecedor deverá submeter os documentos, juntamente com a peça tratada, o "Gráfico de Tratamento Térmico" e os "Certificados de Calibração dos Termopares e Registradores".

A execução de tratamento térmico pós-soldagem deve ser feita conforme um dos procedimentos dados em UW-40, atendendo os seguintes requisitos da Tabela UCS-56 para materiais P No 1, Group No 1, 2 ou 3. Para outros materiais, ver o parágrafo pertinente do Código. O fornecedor deverá seguir conforme:

- a) A temperatura do forno não deve exceder 425°C no momento em que o vaso ou parte é colocado nele.
- b) Acima de 425°C a razão de aquecimento não deve ser maior do que 222°C/hora dividido pela espessura máxima de metal do costado ou tampo em polegadas, mas em nenhum caso deve ser maior do que 222°C/hora. Durante o período de aquecimento não deve haver uma variação de temperatura através da porção do vaso ou parte que estiver sendo aquecida maior do que 140°C em qualquer intervalo de comprimento de 4,6 m.
- c) Os Itens do Código devem ser mantidos na temperatura de patamar especificada nas tabelas UCS-56 ou UCS-56.1 ou acima dela pelo tempo de patamar também especificado nessas tabelas. Durante esse período, não deve haver uma diferença entre a maior e a menor temperatura na porção do Item do Código aquecida maior do que 83°C, exceto onde a faixa tem seu limite estendido pela tabela UCS-56.
- d) Durante os períodos de aquecimento e manutenção, a atmosfera do forno deve ser controlada para prevenir oxidação excessiva da superfície

do vaso de pressão ou parte. O forno deve ser projetado de forma a evitar o efeito direto da chama no vaso.

Acima de 425°C, o resfriamento deve ser feito em um forno ou câmara de resfriamento fechada, com uma razão de resfriamento nunca maior do que 280°C/hora dividida pela espessura máxima do metal do costado ou do tampo em polegadas, mas em nenhum caso maior do que 280°C/hora. A partir de 425°C o vaso ou parte pode ser resfriado ao ar calmo.

## 6.5 SKETCH DE SOLDAGEM

O Sketch de soldagem é um esboço gráfico das soldas desenvolvido pela engenharia, onde mostram como cada junta do vaso será soldada. Todo projeto deverá conter um Sketch de Soldagem para orientação da Produção e CQ sobre a preparação do chanfro e definição do processo de soldagem, conforme Figura 16.

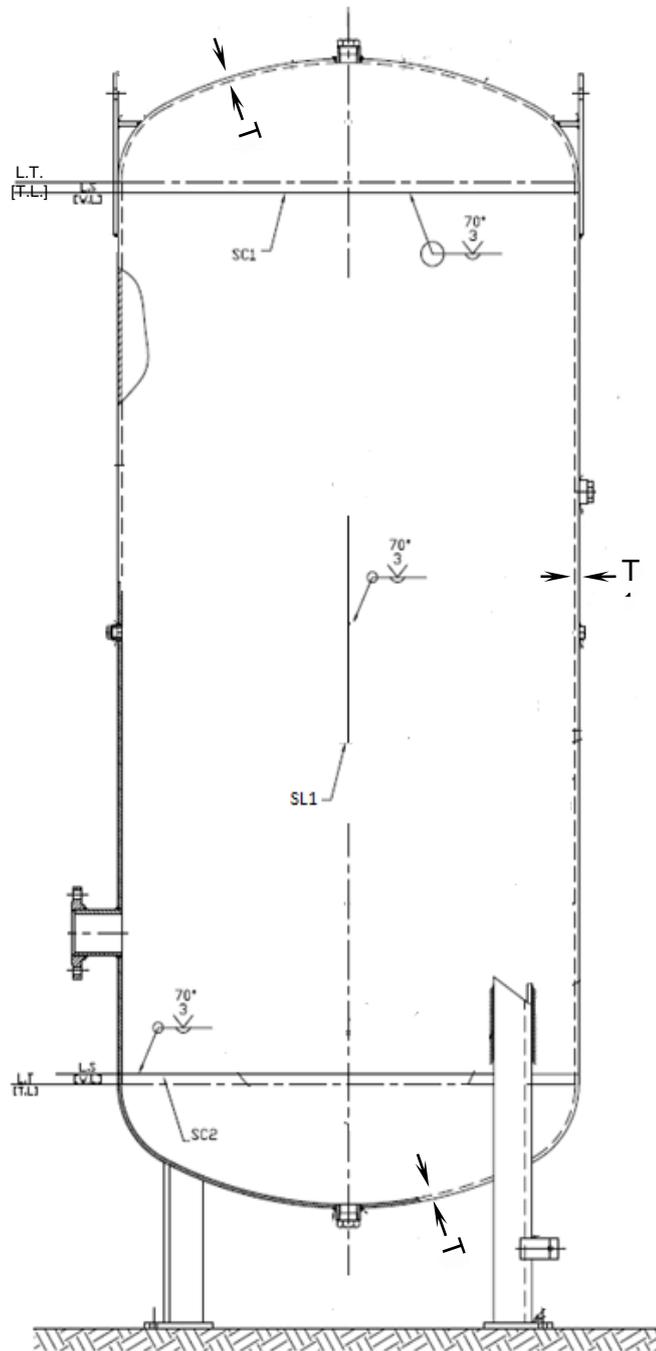


Figura 16 – Sketch de soldagem do vaso.

A Figura 16 e a Figura 17 mostram como deverá ser a junta do vaso, sendo:

- T<sub>1</sub> a espessura final comercial (9,5 mm) utilizada no vaso, tanto para tampos quanto para costado;
- O chanfro soldado pelo lado interno e a raiz pelo lado externo;
- A abertura da raiz de 3 mm;
- A face da raiz de 2 mm (nariz);

- O ângulo do bisel de 35°, formando um chanfro de 70°;
- A goivagem deverá ser feita na raiz, para posterior soldagem de acabamento, a fim de garantir uma raiz isenta de defeitos.

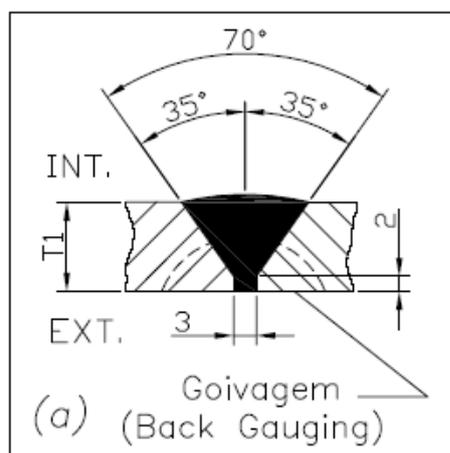


Figura 17 – Junta de topo para soldagem SL1, SC1 e SC2.

### 6.5.1 Preparação do Chanfro

O chanfro é uma abertura devidamente preparada, na superfície de uma peça ou entre dois componentes, para conter a solda. O método usado na preparação do metal base deve conferir ao chanfro uma superfície razoavelmente lisa e livre de entalhes, estrias ou outras irregularidades. As juntas a serem soldadas devem estar isentas de óleo, graxa, óxido, tinta, resíduos do exame por líquido penetrante, areia e fuligem do preaquecimento a gás, numa faixa de no mínimo 20 mm de cada lado das bordas, interna e externa. As irregularidades e escórias do oxicorte devem ser removidas.

A junta entre dois membros alinhados aproximadamente no mesmo plano é conhecida como junta de topo. As soldas de topo devem possuir penetração e fusão total. Para garantir que os chanfros sejam completamente preenchidos, de modo que a superfície da solda em nenhum ponto esteja abaixo da superfície do material base, o metal da solda deve ser adicionado como reforço, em cada face da solda. A espessura desse reforço em cada face da solda não deve exceder os valores definidos no Procedimento de Ensaio Visual do fabricante. A tolerância de chanfro deve ser adotada conforme Figura 18:

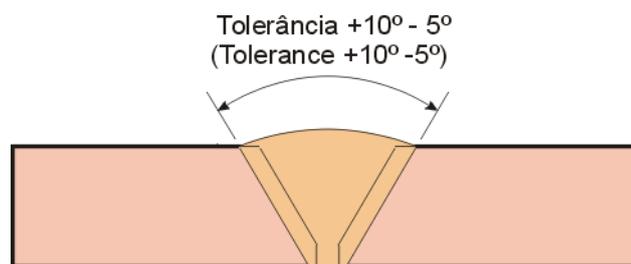


Figura 18 – Tolerância para solda de chanfro.

As superfícies de um chanfro a serem soldadas e as áreas adjacentes, dentro de 13 mm ( $\frac{1}{2}$ " ) para materiais ferrosos e 25 mm (1" ) para materiais não ferrosos, devem estar limpas e livres de graxa, óleo, tinta, oxidação ou qualquer outro material contaminante que possa prejudicar a soldagem. A limpeza do chanfro e bordas deve ser ao metal brilhante, pelos lados interno e externo. Quando o metal da solda é depositado sobre uma superfície previamente soldada, toda a escória deve ser removida de modo a prevenir inclusão de impurezas no metal da solda.

A dimensão do chanfro deve estar conforme especificado no projeto e, exceto quando indicado em contrário, devem atender as tolerâncias da pré-estabelecidas.

Juntas preparadas para soldagem devem ser examinadas após a ajustagem e também devem atender aos requisitos e tolerâncias pré-estabelecidas.

Os chanfros devem ser examinados dimensional e visualmente, quanto à limpeza e à ausência dos seguintes defeitos:

- Poros;
- Irregularidades de corte;
- Rebarbas;
- Amassamentos;
- Descontinuidades transversais à superfície;
- Descontinuidades paralelas à superfície, com comprimento superior a 25 mm.

Nota 1: Toda irregularidade deve ser corrigida antes do acoplamento das partes envolvidas para soldagem. Esta correção deverá ser executada por esmerilhamento ou solda com soldador qualificado e com a EPS que seja adequada para a soldagem, quando requerido um ensaio de líquido penetrante deve ser realizado após a correção.

Nota 2: Irregularidades e escórias provenientes do processo de oxicorte devem ser removidas através de esmerilhamento. O grau de rugosidade máximo aceitável deve ser igual a 2, conforme norma AWS C 4.1-WC – 77 (Criteria for Describing Oxygen-Cut Surface).

### **6.5.2 Junção tampo x costado e solda longitudinal de costado**

*“Todas as soldas de emenda de chapas em cascos e tampos de vasos devem ser de soldas de topo, de penetração total e feitas, sempre que possível, por ambos os lados”* (Telles, Vasos de Pressão, 2007). Quando as dimensões do vaso não permitirem a soldagem pelo lado interno, a solda poderá ser feita pelo lado externo, desde que um procedimento de soldagem garanta a penetração total e a qualidade da solda na raiz.

Os processos de soldagem poderão ser automáticos ou manuais, sendo que na soldagem manual, o soldador poderá executar uma solda onde permite-se menor precisão na preparação da superfície e ajustagem dos chanfros, pois o soldador consegue visualizar as eventuais irregularidades e defeitos na geometria dos chanfros, podendo praticar movimento de correção. Já para o processo de soldagem automática, é necessário que os chanfros sejam usinados com precisão, pois o cabeçote de solda e todo o sistema de deposição de metal de adição, não possuem condições de corrigir defeitos na geometria dos chanfros.

Para a junção tampo x costado, poderá ser utilizado o processo por arame tubular e eletrodo revestido. Além disso, poderá ter uma mistura de processo buscando uma melhor garantia para a raiz, muito usado em casos aos quais somente é possível a soldagem pelo lado externo: raiz no processo GTAW e enchimento/acabamento tanto no FCAW quanto no SMAW. Poderá ser realizada a soldagem de raiz, enchimento e acabamento com o processo GTAW, sendo que a desvantagem é a baixa produtividade quando comparada aos demais processos. Tendo acesso pelos dois lados, o ideal é a soldagem utilizando processos mais produtivos, pois há a condição de realização da goivagem, o que garante a remoção de possíveis defeitos durante a soldagem de raiz.

Para a solda longitudinal do costado poderá ser utilizada os mesmos processos supracitados, com o acréscimo ao processo SAW, que é um processo

automático e bastante produtivo. Sendo que o processo SAW deverá ser utilizado modificando-se o tipo de chanfro, ou seja, chanfro reto com abertura de 2mm com uso de backing pelo lado oposto.

Aplicação de quatro processos de soldagem que podem ser utilizados para a soldagem do vaso calculado:

- PROCESSO SMAW (ER)

*“A soldagem com eletrodo revestido é definida como um processo de soldagem com arco, onde a união é produzida pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a soldar”* (Wainer, Soldagem, Processos e Metalurgia, 1992). A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (em Inglês Shielded Metal Arc Welding – SMAW), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico, é um processo manual de soldagem que realizado com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco elétrico funde o metal, a alma do eletrodo e seu revestimento de fluxo. Os gases produzidos durante a decomposição do revestimento e a escória líquida protegem o metal de solda da contaminação atmosférica durante a solidificação.

SMAW – Soldagem ao arco metálico com eletrodo revestido (ER).

Consumível: Vareta ER 70S-3 Ø 2,4mm e Eletrodo de tungstênio Ø 2,5 mm AWS EWTh-2 para a solda de raiz (no processo GTAW) e Eletrodo E 7018 Ø 2,5mm para enchimento e acabamento.

Plano de soldagem:

- 1- Raiz: No mínimo 02 passes, sendo que o passe de reforço pode ser feito com vareta ER 70S-3 Ø 3,2mm, a posição de soldagem pode ser feita na 1G, uma vez que o processo a ser qualificado será o SMAW (ER).
- 2- Enchimento: Fazer o enchimento no processo SMAW (ER) na posição 6G, preenchendo toda a região do chanfro.
- 3- Acabamento: Fazer o acabamento no processo SMAW (ER) na posição 6G, em uma única camada.

Os benefícios da soldagem SMAW estão relacionados as seguintes características:

- 1- Vasto campo de aplicação do processo, sendo o processo mais utilizado em soldagem;

- 2- Baixo custo operacional;
- 3- Ampla variedade de aplicação, indo desde o mais simples serviço de ponteamto até o mais rígido controle de fabricação de vasos de pressão.

- PROCESSO GTAW (TIG)

O processo TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), *"utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição e pode ser manual ou automática"* (Wainer, Soldagem, Processos e Metalurgia, 1992).

GTAW – Soldagem ao arco tungstênio sob atmosfera gasosa (TIG).

Consumível: ER70S3  $\varnothing$  2,4mm e Eletrodo de tungstênio  $\varnothing$  2,5 mm AWS EWTh-2.

Plano de soldagem:

- 1- Raiz: No mínimo 02 passes, sendo que o passe de reforço pode ser feito com vareta ER 70S-3  $\varnothing$  3,2mm, na posição de soldagem 6G.
- 2- Enchimento: Fazer o enchimento no processo GTAW (TIG) na posição 6G, preenchendo toda a região do chanfro.
- 3- Acabamento: Fazer o acabamento com o mesmo processo na posição 6G, em uma única camada.

Os benefícios da soldagem TIG estão relacionados as seguintes características:

- 1- Solda de alta qualidade, geralmente livres de defeitos, ótimas propriedades mecânicas e acabamento;
- 2- Soldagem para a maioria dos metais e ligas;
- 3- Soldagem livre dos respingos que ocorrem em outros processos a arco;
- 4- Fonte de calor concentrada devido a corrente constante, minimizando a ZTA e distorções, gerando uma poça de fusão estável. Além de permitir excelente controle na penetração de passes de raiz;
- 5- Permite excelente controle na penetração de passes de raiz;
- 6- Podem produzir excelentes soldagens autógenas (sem adição) a altas velocidades;

- 7- Permite um controle preciso das variáveis da soldagem;  
O processo pode ser automatizado.

- PROCESSO FCAW (Arame Tubular)

O processo por Arame Tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) possui o mesmo conceito que o processo MIG/MAG, ou seja, *“é um processo de soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar”* (Scotti, Soldagem MIG/MAG, 2007).

A coalescência entre os metais é obtida através do arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada, sendo a proteção do arco feita pelo fluxo interno do arame (autoprotégido) ou por um gás de proteção, conforme figura 8.

*“O fluxo interno do arame, além da função de proteger o arco, pode atuar como desoxidante através da escória formada além de acrescentar elementos de liga e auxiliar na estabilização do arco elétrico”* (Scotti, Soldagem MIG/MAG, 2007).

FCAW – Soldagem ao arco metálico com arame tubular (AT).

Consumível: Arame tubular E 71T-1 Ø1,2mm para todo o processo de soldagem.

Plano de soldagem:

- 1- Raiz: Realizado pelo lado do chanfro maior, poder ser trançado a 03 primeiras camadas, com a posição de soldagem na 2G.
- 2- Enchimento: Fazer o enchimento no processo FCAW (AT) na posição 2G, preenchendo toda a região do chanfro.
- 3- Acabamento: Fazer o acabamento com o mesmo processo na posição 2G, com uma única camada.
- 4- Goivagem (tendo acesso pelo lado interno): Fazer a goivagem da raiz, em seguida fazer o enchimento e acabamento com o mesmo processo na posição 2G.

Os benefícios da soldagem FCAW estão relacionados a características do processo:

- 1- Produtividade relacionada ao uso de arames contínuos;
- 2- Benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame;
- 3- Auxílio da escória na forma e aspecto do cordão de solda;
- 4- Taxa de deposição / velocidade de soldagem elevada.

- PROCESSO SAW (Arco submerso)

No processo de soldagem SAW, *“um arco elétrico é estabelecido entre o arame-eletrodo e o material a ser soldado, com a diferença que o arco permanece totalmente submerso em uma camada de fluxo, não sendo visível”* (Wainer, Soldagem, Processos e Metalurgia, 1992).

É geralmente realizada com equipamentos automáticos. Para aumentar a produtividade, um arranjo com vários consumíveis pode ser introduzido. Devido à sua elevada taxa de deposição de metal, é um processo particularmente adequado para longas articulações retas de boa qualidade na posição horizontal.

SAW – Soldagem ao arco submerso (Arco Submerso).

Consumível: EL 12 Ø 2,4mm

Plano de soldagem:

- 1- Raiz: No mínimo 02 passes, sendo que o passe de reforço pode ser feito com vareta ER 70S-3 Ø 3,2mm ou sem abertura, ambos na posição de soldagem 1G.
- 2- Enchimento: Fazer o enchimento em toda a região do chanfro no processo SAW (Arco submerso), na posição de soldagem 1G.
- 3- Acabamento: Fazer o acabamento com o mesmo processo SAW (Arco submerso) com uma única camada, na posição de soldagem 2G.
- 4- Goivagem (tendo acesso pelo lado interno): Fazer a goivagem da raiz, em seguida fazer o enchimento e acabamento com o mesmo processo na posição 2G.

Os benefícios da soldagem SAW estão relacionados as seguintes características:

- Elevada velocidade de soldagem;
- Maiores taxas de deposição;
- Boa integridade do metal de solda;
- Processo simples utilização;
- Melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador.

### 6.5.3 Procedimento qualificado baseado no código ASME

O código ASME Section VIII Div.1, exige que o fabricante ou montador de um vaso de pressão seja o único responsável por todas as soldas efetuadas no vaso, estendendo-se essa responsabilidade à qualificação de soldadores, operadores, procedimentos e etc.

Para o UW-37 do código ASME Section VIII Div.1, *“cada soldador ou operador de máquina de solda automática deve obrigatoriamente estampar na peça que soldar, e com intervalos determinados, uma marca individual para caracterizar o seu trabalho. O fabricante deverá manter um registro permanente de todos os soldadores e operadores (chamado de sinete), com as marcas de identificação de cada um”*.

Para geração do sinete é necessário a qualificação do soldador ou do operador soldagem conforme o Código ASME Seção IX e outras seções utilizadas para construção do equipamento.

A preparação e o teste das peças de teste requeridas, ou a radiografia das soldas de teste, são elaborados por um laboratório de teste, sob a supervisão do Inspetor de Solda do CQ, para posterior análise e aceite. Então será emitido o Registro de Qualificação de Soldador – RQS – e o Registro de Qualificação de Operador de Solda – RQOS – ao qual estes documentos contêm as variáveis essenciais de performance usadas nas soldas de teste, bem como as faixas qualificadas destas variáveis para as soldas de produção.

A Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS – é preparada pelo Inspetor de Solda do CQ, no Brasil é o Inspetor de Solda Nível 2, de acordo com as regras da Seção IX do Código ASME. A EPS relaciona as variáveis essenciais, não essenciais e suplementares (quando aplicável) e as faixas aceitáveis destas variáveis para uso. A EPS deve referenciar o respectivo Registro de Qualificação do Procedimento de soldagem – RQPS.

Os testes requeridos para compor as RQPS são realizados sob supervisão dos responsáveis de Solda do CQ. O preparo e os testes das peças de teste deverão ser feitos de acordo com a Seção IX do Código ASME por laboratórios qualificados.

Os relatórios dos testes devem ser verificados pelos responsáveis de Solda do CQ. Se aceitos, o CQ prepara e certifica, com suas assinaturas e data, o Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem, indicando nele as variáveis reais usadas nas soldas do teste de qualificação.

A EPS e RQPS deverão ser elaboradas e aprovadas pelo CQ, sendo, após, disponibilizada para aceite do AI. Por fim, a EPS poderá ser fornecida para a equipe de produção para uso dos soldadores e operadores de solda. Além disso, o setor de Engenharia deverá relacionar no Plano de Solda, as EPS's qualificadas utilizadas nas soldagens. O CQ deve manter um arquivo com os documentos originais das EPS e dos RQPS.

#### **6.5.4 Cuidados e controles durante a soldagem**

Alguns cuidados devem ser tomados na soldagem utilizando dispositivos auxiliares de montagem, soldas de ponteamto ou outros meios apropriados para manter o alinhamento das bordas das peças a serem soldadas. Os pontos de solda usados para alinhamento devem ser completamente removidos quando terminar sua função, ou então suas extremidades devem ser preparadas por esmerilhamento ou outro meio adequado, de modo que possam ser incorporadas satisfatoriamente à solda final. O ponteamto quer seja removido ou mantido no lugar, deverá ser feito usando um procedimento de solda de filete ou de topo, qualificado de acordo com o Código ASME Seção IX.

Todas as soldas de ponteamto devem ser executadas por soldadores qualificados, de acordo com o Código ASME Seção IX. As soldas de ponteamto mantidas no lugar devem ser examinadas visualmente para verificar a existência de defeitos; se forem consideradas defeituosas deverão ser removidas.

Os dispositivos auxiliares de montagem, tais como grampos de atração ("brackets") deverão ser preparados a partir de material de soldabilidade compatível com o metal base. Ao serem removidos, deve-se efetuar o corte a pelo menos 1 mm acima da superfície do metal. Em seguida, deve-se esmerilhar o excesso e efetuar ensaio por líquido penetrante no local. Não é aceitável a remoção de dispositivos com uso de impacto.

A utilização dos dispositivos de montagem deve garantir o alinhamento das seções nas bordas a serem soldadas com um desnível máximo tolerável, conforme Procedimento de Exame Visual do fabricante.

Outros cuidados devem ser tomados durante a soldagem para evitar problemas indesejáveis, tais como:

- Inclusão de escória: material não metálico retido no metal da solda ou entre o metal da solda e o metal base, podendo ser alinhada, isolada ou agrupada.
- Inclusão metálica: material metálico retido no metal da solda ou entre o metal da solda e o metal base
- Mordedura: depressão sob a forma de entalhe no metal de base acompanhando a margem da solda. A mordedura ocorre porque o ângulo do eletrodo e a velocidade de soldagem estão inadequados ou a corrente de soldagem está elevada.
- Parada de soldagem: se por algum motivo for necessário realizar uma parada no processo de soldagem, deve-se tomar cuidado especial com o reinício da solda a fim de obter a fusão e a penetração adequadas. No processo de arco submerso, deve-se remover a escória e deixar a superfície limpa e em condições para restabelecimento do arco sem a inclusão excessiva de material de soldagem.

As superfícies das soldas podem ficar sem reforço da solda, desde que suficientemente livres de ondulações grosseiras, sulcos, sobreposições e cristas e vales abruptos para evitar concentração de tensões e permitir adequada interpretação radiográfica e de outros ensaios não destrutivos. Se houver dúvida na interpretação de um filme radiográfico, devido à qualidade de acabamento da solda, o filme deverá ser comparado com a superfície real da solda para determinação de sua aceitabilidade.

Para a mínima temperatura de soldagem de acordo com a EPS e o UW-30, recomenda-se que não sejam executados quaisquer serviços de soldagem quando a temperatura do material base for inferior a  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ ). Para temperaturas entre  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ ) e  $0^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$ ), todas as superfícies em uma faixa de 75 mm (3") do ponto onde a solda será iniciada devem ser aquecidas a uma temperatura que possa ser sentida pela mão [aproximadamente  $15^{\circ}\text{C}$  ( $60^{\circ}\text{F}$ )], antes de se iniciar a soldagem. Recomenda-se não executar solda sobre superfícies molhadas ou que contenha

gelo ou durante períodos de vento intenso, a menos que os soldadores ou operadores de solda e a obra estejam devidamente protegidos.

Os tipos de solda podem ser verificados na Tabela UW-12, que define oito tipos de soldas.

## 6.6 APLICAÇÃO DO PIT

Na tabela S verificam-se partes de etapas da inspeção no PIT relacionadas a “Inspeção Durante a Fabricação” (item 4) e a “Inspeções e Testes Finais” (item 5). Todas as etapas do PIT são importantes para a rastreabilidade do processo. Mas serão tratadas neste trabalho apenas às etapas de inspeção ligadas a execução durante a fabricação e teste.

O PIT contempla a etapa da inspeção com a descrição e as informações para aceite do cliente, verificação do AI e verificação do CQ. Deverão ser incluídas as datas de atendimento de cada subitem da etapa para o vaso calculado.

ITEM	ETAPA DA INSPEÇÃO	DESCRIÇÃO DA INSPEÇÃO	CLIENTE	AI	CQ
4	INSPEÇÃO DURANTE A FABRICAÇÃO	4.1 - Inspeção de Tampos	-	HP	HP
		4.2 – Inspeção e preparação de juntas - FIT-UP	-	HP	HP
		4.3 - Controle de Inspeção de Juntas Soldadas	-	RP	HP
		4.4 – Ensaio de Estanqueidade	-	N	N
		4.5 - END – Ultrassom	-	N	N
		4.6 - END – Radiografia (RX)	-	RP	HP
		4.7 - END – Líquido Penetrante (LP)	-	RP	HP
		4.8 - END – Ensaio de partícula magnética	-	N	N
		4.9 – Tratamento térmico	-	N	N
		4.10 - Polimento / Acabamento	-	N	N
		4.11 – Fechamento da RNC	-	RP	HP
5	INSPEÇÕES E TESTES FINAIS	5.1 - Inspeção Visual e Dimensional Geral	-	HP	HP
		5.2 - Teste Hidrostático	-	HP	HP
		5.3 - Visual Interno após Teste Hidrostático	-	HP	HP

Tabela S – Trecho do Plano de Inspeção e Teste.

As identificações HP, RP e N são conforme abaixo:

HP: Holding Point – Ponto de Parada Obrigatória da fabricação para inspeção do AI e\ou do CQ.

RP: Review Point – Ponto de Verificação de inspeção pelo AI sem Interrupção da Fabricação.

N: Não é prevista intervenção para inspeção ou é não aplicável.

O Hold Point deverá ser definido pelo AI conjuntamente com o CQ, na elaboração do PIT. As localizações das radiografias spot serão indicadas pelo AI.

A descrição sobre as Etapas da Inspeção previstas no PIT deverá seguir como:

- Inspeção de Tampos:

As diretrizes básicas para inspeção de tampos abaulados e prensados a frio ou quente, que neste caso foi fabricado a partir de discos sem costura de acordo as exigências do Código ASME, sendo que deverá sofrer tanto inspeções internas como externas.

Após a traçagem, a chapa do tampo deverá ser identificada, transferindo a identificação conforme informação de fábrica, para controle de rastreabilidade e inspeção de recebimento.

Sempre que a traçagem for executada utilizando um gabarito, o Inspetor de Recebimento do CQ deverá certificar-se de que tal gabarito está corretamente construído, ou quando não for confeccionado gabarito, o Inspetor de Recebimento do CQ deverá verificar todas as partes traçadas.

O perfil do tampo deverá ser verificado internamente e, quando necessário, externamente, com auxílio de gabaritos, que deverão ser posicionados perpendiculares à superfície em inspeção.

Com o gabarito corretamente posicionado, verificam-se os desvios em 4 (quatro) diâmetros igualmente defasados.

Desvios para menor serão verificados apoiando-se o gabarito na superfície do tampo e medindo-se a distância entre a parte posterior deste até o fio de nylon ou régua.

Abaixo verificam-se as Figuras 19, 20 e 21, que são exemplos das tolerâncias (medição de desvios) permitidas na medição de tampos utilizando-se gabaritos.

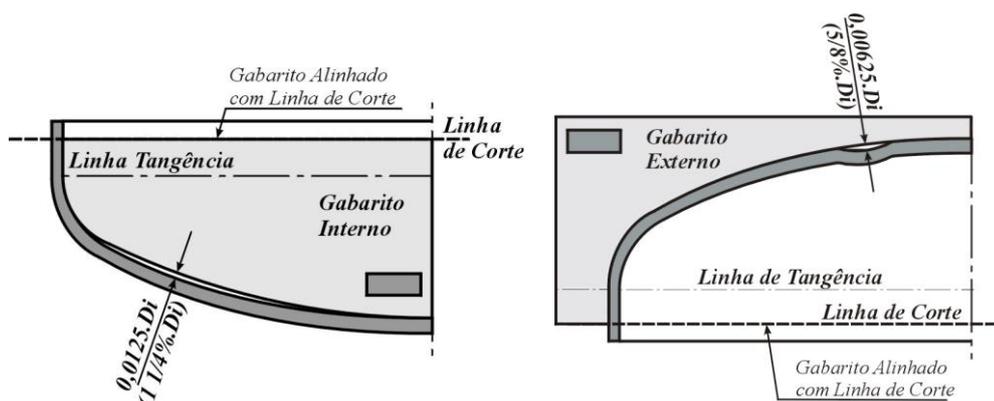


Figura 19 – Tolerâncias para Inspeção do Perfil do Tampo (Desvio Máximo no Perfil)

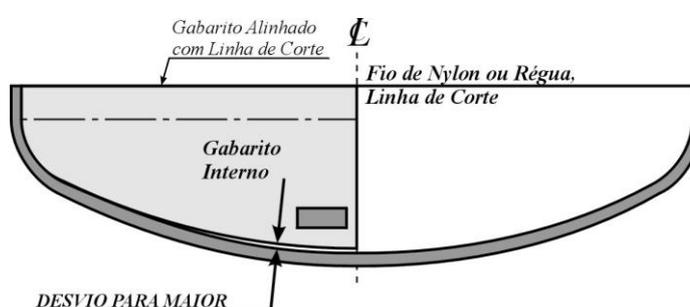


Figura 20 – Desvio de Profundidade do Tampo para Maior

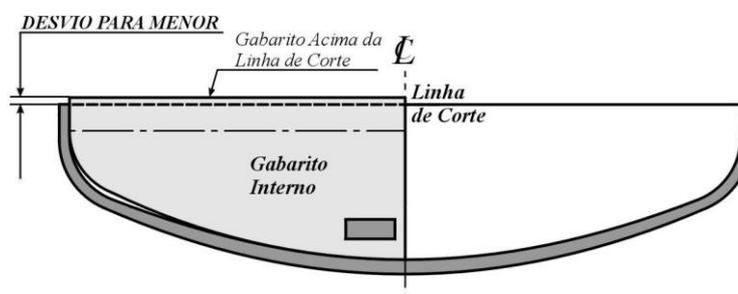


Figura 21 – Desvio de Profundidade do Tampo para Menor

A tolerância de forma para o código ASME Section VIII Division 1 para tampos toro esféricos, toricônicos, semi-esféricos ou semi-elípticos deve atender aos requisitos de UG-81:

- A superfície interna de um tampo toro esférico, toricônico, semi-esférico ou semi-elíptico não pode ter desvio de forma para fora maior do que 1,25% ( $1\frac{1}{4}\%$ ) de D, nem um desvio de forma para dentro, em relação à geometria especificada maior do que 0,625% ( $\frac{5}{8}\%$ ) de D. Tais desvios devem ser medidos perpendicularmente ao contorno especificado e não

devem ser abruptos. O raio de rebordeamento não deve ser menor do que o especificado no projeto.

Nota: D é o diâmetro interno nominal do casco no ponto de união com o tampo.

- b) Tamos semi-esféricos ou qualquer parte esférica de tamos toroesféricos ou semi-elípticos projetados para pressão externa devem satisfazer ao item (a) acima, e atender às tolerâncias da UG-80(b) para esferas utilizando um valor de 0,5 para L/Do.
- c) As medidas para determinar os desvios especificados em (a) acima, devem ser tomadas a partir da superfície do metal de base e não a partir de cordões de solda.

A espessura do tampo deverá ser verificada, preferencialmente pelo método ultra-sônico, em 4 pontos (A, B, C e D conforme Figura 6) e em 4 setores defasados de 90°, conforme a figura 22.

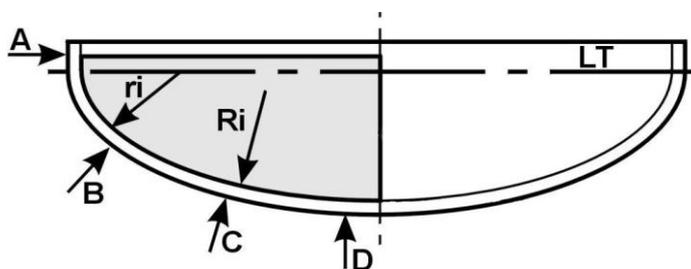


Figura 22 – Pontos de Verificação da Espessura.

A variação máxima permitida no perímetro após conformação deverá estar dentro das tolerâncias especificadas na tabela T:

Diâmetro Interno (mm)	Varição Máxima no Perímetro (mm)
$\varnothing \leq 1200$	$\pm 9,0$
$1200 < \varnothing \leq 2100$	$\pm 12,0$
$2100 < \varnothing \leq 5000$	$\pm 18,0$
$\varnothing > 5000$	$\pm 24,0$

Tabela T – Tolerâncias Máximas permitidas no Perímetro.

A altura do tampo deverá ser verificada após recorte, com auxílio do gabarito de perfil. Tolerância para a variação máxima na altura interna é dada na Tabela U. Caso o desvio da altura seja para maior, poderá ser feita a

correção do comprimento final do equipamento para compensar esta variação.

Diâmetro Externo (mm)	Tolerância na altura (mm)	
$500 < De \leq 1200$	+ 3,0	- 3,0
$1200 < De \leq 2200$	+ 4,0	- 3,0
$2200 < De \leq 3000$	+ 5,0	- 3,0
$3000 < De \leq 4000$	+ 6,0	- 3,0

Tabela U – Tolerâncias de Desvios de Altura dos Tampos

As dimensões dos chanfros deverão ser verificadas utilizando-se de transferidor de grau, paquímetro ou qualquer outro instrumento adequado, onde necessário é atender as tolerâncias indicadas na Tabela U e figura 23 a seguir:

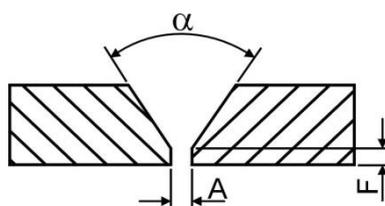


Figura 23 – Chanfro V.

	Símbolo	Tolerâncias	
		Sem Remoção da Raiz	Com Remoção da Raiz
Ângulo do chanfro	$\alpha$	+ 10° / - 5°	+ 10° / - 5°
Face da Raiz (Nariz)	F	± 1,5 mm	± 2,0 mm
Abertura da Raiz	A	± 1,5 mm	± 1,5 mm

Tabela V – Tolerâncias dos Chanfros.

O chanfro do tampo para solda entre tampo e costado deverá ser verificado por meio de Exame com Líquido Penetrante, em toda sua extensão.

- Inspeção e preparação de juntas - FIT-UP:

As bordas adjacentes de juntas longitudinais de vasos cilíndricos deverão primeiramente ser conformadas com a curvatura adequada, por meio de calandragem preliminar ou prensagem, a fim de evitar trechos achatados contestáveis, ao longo das juntas.

O alinhamento das bordas em seções a serem soldadas de topo deverá ser tal que o desnível máximo não ultrapasse os valores permitidos no Procedimento de Ensaio Visual do fabricante.

As juntas em vasos esféricos e em tampos e as juntas entre cascos cilíndricos e tampos semi-esféricos devem atender ao Procedimento Ensaio Visual para juntas longitudinais. Qualquer desalinhamento dentro das tolerâncias acima deverá sofrer uma transição suave de inclinação (adelgaçamento) conforme o Procedimento de Ensaio Visual do fabricante, que deverá ser baseado no UW-9 do ASME Secção VIII Div.1.

- Controle de Inspeção de Juntas Soldadas:

O exame visual é a primeira inspeção a ser realizada para determinar as condições superficiais da peça, as condições da superfície soldada, erros de forma, ou evidências de deformação.

O exame visual deve ser feito tendo como base os requisitos presentes no Procedimento de Ensaio Visual do fabricante, sendo o Inspetor de Solda do CQ o responsável por executar e registrar o exame.

- Ensaio de Estanqueidade

Não se aplica para o vaso calculado.

- END

Todo Ensaio Não-Destrutivo (END) exigido pelo Código ASME deve ser especificado no PIT e nos desenhos, para o qual a qualificação do pessoal e a calibração dos equipamentos foram examinadas pelo Inspetor END Nível III e aprovadas pelo CQ.

Todo procedimento de END deve ser submetido ao AI para sua verificação. O Inspetor END Nível III deve se certificar que os procedimentos de END escritos atendem aos requisitos de T-150 do Código ASME Secção V, depois de terem sido aprovados por demonstração para o AI, deve usar a Edição/Adenda da norma ASNT-SNT-TC-1A em vigor aceita pelo Código, como um guia. A prática escrita deve ser preparada pelo Inspetor END Nível III e aprovada pelo CQ.

Cópias dos seguintes documentos de qualificação em END, para todos os inspetores que executam END de acordo com o Código, devem ser arquivadas pelo CQ e devem estar disponíveis para revisão do AI e de outros quando requisitado:

- a) Nome do inspetor certificado;
- b) Nível de certificação e método END;
- c) Exame de acuidade visual;
- d) Evidências de escolaridade e experiência;
- e) Declaração ou evidências indicando ter sido realizado treinamento satisfatório de acordo com esta prática escrita;
- f) Evidências ou exames atualizados;
- g) Avaliações dos exames ou evidências adequadas dos resultados;
- h) Outras evidências adequadas de qualificações satisfatórias quando qualificações são utilizadas em substituição aos exames;
- i) Data da certificação ou recertificação;
- j) Data de validade do certificado;
- k) Assinatura do Inspetor END Nível III e do Coordenador do CQ.

- Tratamento térmico

Não se aplica para o vaso calculado.

- Polimento / Acabamento

Não se aplica para o vaso calculado.

- Fechamento da RNC

Todo Relatório de Não-Conformidade deve ser submetido ao AI para sua verificação.

Uma não-conformidade é qualquer condição que não está de acordo com as regras aplicáveis do Código, do Manual de Controle da Qualidade, da Jurisdição vigente, ou de outro requisito específico. Todas as não-conformidades devem ser completamente fechadas antes de o item ser considerado de acordo com o Código.

O Relatório de Não-Conformidade é assinado e datado pelo Inspetor do CQ, sendo registrado o número da RNC no PIT e sendo então encaminhado ao

responsável por sugerir a disposição para corrigir a condição. A disposição sugerida é, então, enviada ao CQ para sua verificação e aprovação.

- Inspeção Visual e Dimensional Geral (tolerância de fabricação)

Deve-se elaborar um Procedimento que define as condições dimensionais e tolerâncias requeridas para a fabricação, montagem e inspeção de vasos de pressão de acordo com o Código ASME Secção VIII Div.1. Especificações especiais de contrato ou do equipamento podem requerer o desvio das tolerâncias dadas, e, em tais casos, a especificação tem precedência sobre este procedimento.

As uniões entre tampos e costados devem atender aos requisitos do código ASME Secção VIII Div.1.

Para Tampos conformados sujeitos a pressão do lado côncavo ou convexo devem ter uma parte reta com comprimento não menor do que o especificado na Fig. UW-13.1, de acordo com o croqui aplicável.

No caso específico de união por solda de topo entre um tampo conformado mais espesso que o costado, o comprimento mínimo da parte reta deve atender aos seguintes requisitos:

- a) Ser igual a 3 vezes a espessura do tampo, não precisando ser maior do que 38 mm (1 ½ in);
- b) Ter um comprimento maior ou igual do que o comprimento da transição exigida na Fig. UW-13.1, croquis (l) e (m).

Nota: A transição é necessária quando a diferença entre as espessuras do tampo e do costado for maior do que o menor valor entre um quarto da espessura da parte mais fina ou 3 mm (1/8 in). O comprimento mínimo da transição nestes casos é igual 3 vezes a diferença de espessura entre as superfícies a serem soldadas. O comprimento da transição não pode ultrapassar a linha de tangência do tampo. Quando a espessura do tampo é igual ou menor do que 1,25 vezes a espessura do costado, o comprimento da parte reta deve ser suficiente para conter qualquer transição requerida. Ver o UW-9 (c), Tapered Transition (transição cônica ou adelgaçamento), do ASME Secção VIII Div. 1.

A ovalização dos cascos cilíndricos deve estar indicada no projeto e deve atender aos requisitos do Código para pressão interna e/ou pressão externa.

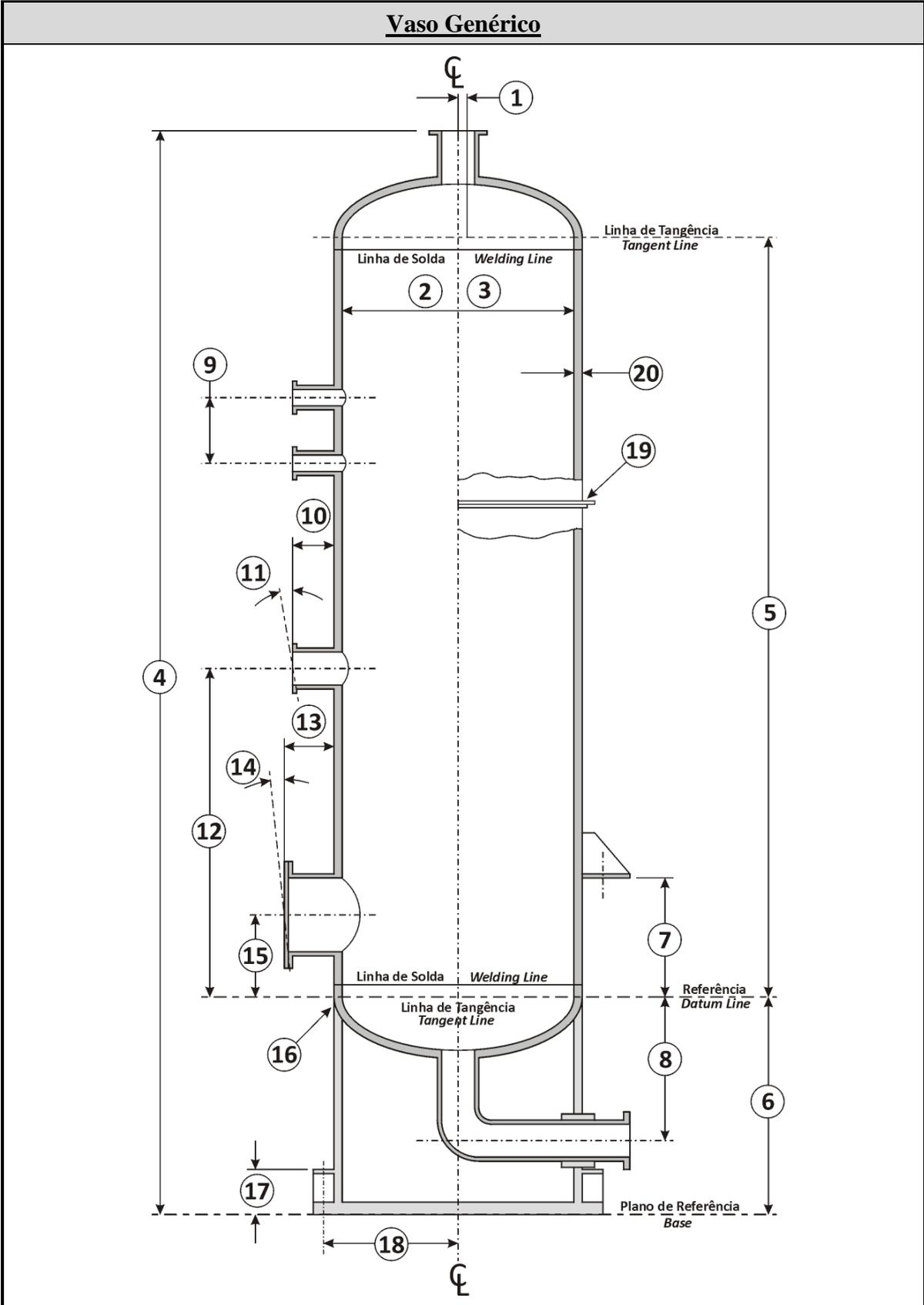
A ovalização nunca pode ser superior a 20 mm.

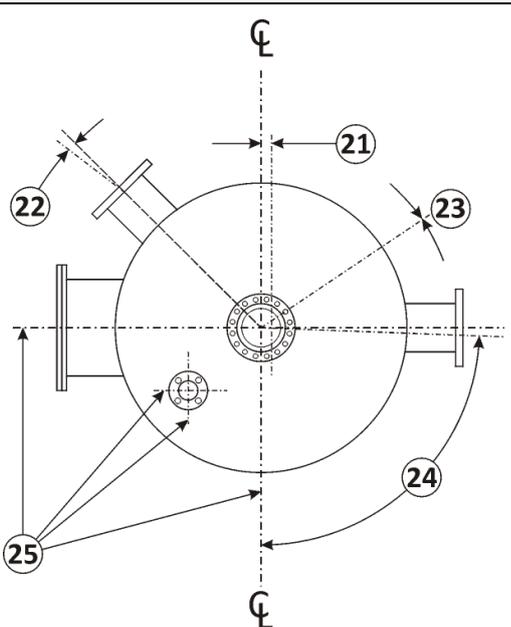
O perímetro dos bordos superior e inferior da cada seção deve atender a:

- a)  $\varphi \leq 1.200 \text{ mm}$ :  $\pm 9 \text{ mm}$ ;
- b)  $1.200 \text{ mm} < \varphi \leq 2.100 \text{ mm}$ :  $\pm 12 \text{ mm}$ ;
- c)  $2.100 \text{ mm} < \varphi \leq 5.000 \text{ mm}$ :  $\pm 18 \text{ mm}$ ;
- d)  $5.000 \text{ mm} < \varphi$ :  $\pm 24 \text{ mm}$ .

As tolerâncias de fabricação relacionadas na tabela X são aplicadas à construção de Itens do Código e seus elementos de suporte. Após exame dimensional de um Item do Código deve ser emitido o Relatório de Exame Dimensional Geral.

Caso as tolerâncias especificadas pelo Código sejam mais restritivas que as definidas nesta tabela, elas devem prevalecer.





Descrição		Tolerância	
1.	Desvio da perpendicular ao plano de referência	$\pm 1$ mm/m - Máximo $\pm 20$ mm	
2.	Ovalização	NA	
3.	Perímetro	NA	
4.	Altura total	$\pm 2$ mm/m - Máximo $\pm 25$ mm	
5.	Distância entre Linhas de Tangência	$\pm 2$ mm/m - Máximo $\pm 15$ mm	
6.	Distância da Linha de Tangência à Base.	+ 0 mm, - 6 mm	
7.	Distância da Linha de Tangência às sapatas	+ 6 mm, - 0 mm	
8.	Distância da Linha de Tangência ao Bocal Inferior	$\pm 3$ mm	
9.	Distância entre centros de bocais para instrumentos de nível	$\pm 2$ mm	
10.	Projeção dos bocais em relação ao lado externo do casco	$\pm 3$ mm	
11.	Perpendicularidade da face dos flanges em relação ao eixo do bocal	$\pm 1/2^\circ$	
12.	Locação das linhas de centro dos bocais em relação à linha de tangência	$\pm 6$ mm	
13.	Projeção das bocas de visita e acesso manual em relação ao lado externo do casco	$\pm 6$ mm	
14.	Perpendicularidade da face dos flanges em relação ao eixo da boca de visita/acesso	$\pm 1^\circ$	
15.	Locação das linhas de centro das bocas de visita/acesso em relação à linha de tangência	$\pm 12$ mm	
16.	Folga máxima entre o casco e a saia, antes da soldagem	3 mm	
17.	Altura do anel dos chumbadores	$\pm 3$ mm	
18.	Afastamento dos chumbadores em relação ao eixo do equipamento	$\pm 3$ mm	
19.	Folga máxima entre o diâmetro interno dos anéis de reforço e a face externa do casco	4 mm	
20.	Espessura	Tubos	- 12 1/2% t
		Chapa até 4 mm (5/32 in)	- 6% t
			+ 0,8 mm (+ 0,03 in)
		Chapa até 25 mm (1 in)	- 0,25 mm (- 0,01 in)
			+ 0,8 mm (+ 0,03 in)
Chapa acima de 25 mm (1 in) até 50 mm (2 in)	- 0,25 mm (- 0,01 in)		
	+ 1,5 mm (+ 0,06 in)		
21.	Desvio entre o eixo do bocal e do tampo	$\pm 3$ mm	
22.	Desvio angular do eixo do bocal, para bocais radiais ou não	$\pm 1/2^\circ$	
23.	Rotação máxima dos furos do flange em relação à posição indicada no projeto	$\pm 1,5$ mm	
24.	Desvio do eixo do bocal	$\pm 3$ mm	
25.	A vertical e os eixos principais devem sempre passar pelo meio do intervalo entre 2 furos adjacentes do flange	NA	

Tabela X – Tolerâncias de fabricação.

- Teste Hidrostático

Todos os equipamentos completos fabricados pela empresa devem passar satisfatoriamente pelo teste hidrostático.

As pressões do teste hidrostático estão indicadas nos desenhos do equipamento. Não é permitido o uso de uma pressão de teste maior do que aquela indicada nos desenhos.

A água deve ser o fluido de teste. A temperatura durante o teste deve ser para vasos de pressão de acordo com a Seção VIII-1, a temperatura no metal deve ser no mínimo 17°C (30°F) acima da temperatura mínima de projeto do metal, mas não precisa exceder 48°C (120°F).

O responsável técnico pelo teste de pressão é o time de Produção, sendo que poderá ser delegada a execução e inspeção do teste a um Inspetor de Qualidade. O Relatório de Teste Hidrostático deve ser assinado pelo responsável técnico e também pelo inspetor do controle da qualidade designado para acompanhar e inspecionar o teste.

Para execução do teste, devem ser utilizados, no mínimo dois manômetros, e um terceiro registrador se o teste durar mais do que 6 horas.

Pelo menos um dos manômetros deve estar situado em local de fácil acesso, visível ao operador durante todo o tempo de pressurização e teste, e um dos manômetros deve estar situado no topo do equipamento. Deve-se sempre descontar a coluna de líquido no caso do manômetro localizado na parte inferior do equipamento.

Os manômetros devem ser verificados quanto validade da calibração antes do início do teste, a qual deve ser efetuada usando-se calibrador padronizado de peso-morto ou manômetro-mestre calibrado.

O valor máximo da escala deve estar sempre compreendido entre 1,5 e 4 vezes a pressão de teste, sendo preferencialmente igual a duas vezes a pressão do teste.

Para a segurança antes da execução do teste, deve-se verificar se todas as conexões e outros acessórios que não devem ser submetidos à pressão estão desconectados do equipamento. Também devem ser previstas condições de segurança antes de se iniciar o teste, bem como acesso às partes a serem inspecionadas durante o teste.

As conexões de linhas auxiliares do vaso devem ter classe de pressão compatível com a pressão de teste. Respiros devem ser posicionados na parte superior do equipamento de maneira que, durante o enchimento permita que bolhas de ar sejam eliminadas e durante o esvaziamento não permita que o equipamento sofra implosão.

No momento da execução do teste hidrostático, deve ser aplicado, aumentando gradativamente, a pressão até um valor não menor do que indicado no desenho. O tempo mínimo de permanência do equipamento na pressão de teste é de 30 minutos, antes de se proceder ao exame visual do equipamento.

A pressão de teste hidrostático deve então ser reduzida para uma pressão não menor do que a pressão de teste dividida por 1,3 e deve ser mantida enquanto o equipamento é cuidadosamente examinado. Esta inspeção deve ser feita em todas as juntas e conexões.

O Critério de Aceitação para o TH deve ser iniciado após o exame visual, pois o teste é considerado aprovado após não haver mais detecção de vazamentos, e nem deformações permanentes. Após o aceite sobre a realização do TH, deverá ser emitido relatório de execução do teste.

- Visual Interno após Teste Hidrostático (TH)

Após o TH, deve-se drenar todo o equipamento, e em bocais que ficarem abertos, devem-se proteger as faces dos flanges contra corrosão e danos mecânicos. Após toda a drenagem, deve-se verificar visualmente se há algum dano nas soldas entre tampos e costado, além de verificação quanto a deformação em algum ponto após execução do teste.

Após o término do TH, o Inspetor do CQ envolvido executa as inspeções finais. Ele assina e data o PIT quando o item atender a todos os requisitos dimensionais e do Código.

Quando o vaso de pressão não possuir uma abertura ou outros meios de acesso que permitam a inspeção interna, um ponto de inspeção no PIT deve ser previsto para que o Inspetor do CQ e o AI possam fazer a inspeção interna antes da execução da solda de fechamento final e TH.

## 6.7 ESTAMPAGEM DO CÓDIGO E DATA REPORTS

O CQ possui a custódia e o controle dos Selos do ASME e do National Board, sendo o setor responsável pela distribuição do selo para uso na fábrica ou no campo quando a fabricação e os testes estiverem concluídos.

A estampagem do Código deve ser feita diretamente no vaso ou parte, ou em uma placa de identificação que será mantida permanentemente anexada ao Item quando uma estampagem direta não puder ser realizada, a partir das informações contidas no desenho. O CQ deve verificar se a estampagem está correta antes de assinar e datar o PIT.

Após conclusão da fabricação de um Item do Código na fábrica, o setor de Engenharia deverá preparar o Relatório de Dados do Fabricante (“Manufacturer’s Data Report”) a partir dos relatórios finais e o submete para verificação do CQ, que o certifica se estiver correto.

O Relatório de Dados do Fabricante (“Manufacturer’s Data Report”) completo, juntamente com os registros finais, é então apresentado ao AI para sua revisão. Após a verificação se todos os requisitos do Código foram atendidos, o AI autoriza e verifica a estampagem do Símbolo do Código na placa de identificação, no Item do Código correto, e assina e data o Relatório de Dados do Fabricante (“Manufacturer’s Data Report”).

Todos os relatórios e anotações devem retornar ao CQ para arquivamento.

## 7 CONCLUSÃO

Após a avaliação dos cálculos usando o código ASME Secção VIII Div. 1 para vaso de pressão, podemos concluir que para qualquer projeto se faz necessário atribuir uma metodologia de cálculo que torne o projeto confiável. Para tanto, alguns itens são imprescindíveis avaliação de forma assertiva considerando o aspecto de segurança em equipamentos cuja operação apresente risco potencial de acidentes.

O cálculo de espessura de tampos e costados, avaliação da elongação de fibra, junções de tampos/costados e cálculo da pressão de teste, são alguns dos itens mais importantes avaliados. Como um dos resultados chave é a avaliação de tratamento térmico, seja por espessura ou elongação de fibra, devendo realizar.

Além dos cálculos mecânicos, a determinação dos processos de soldagem a ser utilizado durante a fabricação do vaso está condicionada aos resultados de espessuras e tipos de padrões de chanfro definidos na norma. Estes por sua vez devem ser atribuídos considerando, também, o conhecimento prático. Para isso é importante que o projeto antes de sua consolidação final seja enviado para o setor de fabricação para as revisões necessárias possibilitando a execução.

Durante a consolidação do projeto, após estudos feitos, chegar-se-á conclusão que não há projeto sem que haja padrão e regras de qualidade. Estes padrões/regras são mensurados a partir de um documento técnico baseado nos requisitos normativos. Neste caso o código ASME Secção VIII Div.1, que contempla quais inspeções devem ser realizadas durante a fabricação do vaso de pressão, devendo ser atendida de forma criteriosa para validação. Qualquer não conformidade encontrada deverá ser registrada e tratada antes da entrega do equipamento.

Por fim, todo o processo de cálculo, qualidade, fabricação e entrega do equipamento, deverá seguir as etapas de validação do código ASME contendo a rastreabilidade sobre todos os passos. Para tanto, foi visto a certificação a qual uma empresa é credenciada a fabricar vasos de pressão com autorização da entidade ASME, embora não haja no Brasil à obrigatoriedade. Vale ressaltar que sendo contratual, mesmo no Brasil, uma empresa fabricante sem a credencial da certificação ASME deve atender as etapas supracitadas, assegurando assim as exigências requeridas no código ASME Secção VIII Div.1.

## REFERÊNCIAS

American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, **ASME**, USA, 2010.

- Section VIII, Division 1 – Rules for Construction of Pressure Vessels
- Section II – Materials
  - Part A – Ferrous Materials
  - Part B – Nonferrous Materials
  - Part D – Properties
- Section IX – QUALIFICATION STANDARD FOR WELDING AND BRAZING PROCEDURES, WELDERS, BRAZERS, AND WELDING AND BRAZING OPERATORS

BEDNAR, Henry, **Pressure Vessel Design Handbook**, USA, 1986.

BALL, Bruce, **CASTI Guidebook to ASME Section VIII Div.1 Pressure Vessels**, Canada, CASTI, 2001.

CALLISTER, Willian, **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, Rio de Janeiro, LTC, 2004.

CHATTOPADHYAY, Somnath, **Pressure Vessel Design and Practice**, 2005.

CHUSE, Robert, **Unfired Pressure Vessel**, 1960

FALCÃO, Carlos, **PROJETO MECÂNICO VASOS de PRESSÃO e TROCADORES DE CALOR CASCO e TUBOS**, 2008.

HICKS, John, **Welded design theory and practice**, England, 2000.

JAWAD, M. H., **Design of Plate & Shell Structures ASME Press**, 2004.

KOU, Sindo, **WELDING METALLURGY**, Canada, 2003.

MARCZAK, R., **INTRODUÇÃO À TEORIA DE MEMBRANAS**, 1999.

MOSS, Dennis, **Pressure Vessel Design Manual**, USA, GPP, 2004.

ROSA, **Análise de Resistencia Mecânica de Peças e Componentes Estruturais**, 2002.

SCOTTI, Américo, **Soldagem MIG/MAG**, 2007.

TELLES, Pedro C. Silva, **Vasos de Pressão**, Rio de Janeiro, LTC, 2007.

TELLES, Pedro C. Silva, **Materiais para Equipamentos de Processo**, Rio de Janeiro, LTC, 2003.

WAINER, Emilio, **Soldagem, Processos e Metalurgia**, 1992.

ZEMAN, Josef, **Pressure Vessel Design: The Direct Route**, 2006

SOFTWARE de Projetos para Vasos de Pressão na norma ASME. Disponível em: <https://www.codeware.com/compress/index.html>. Acesso em julho de 2012.

Discutidos no PROCESSO POR ARAME TUBULAR as principais funções de cada etapa. Disponível em: <http://www.guiadasiderurgia.com.br/novosb/links/1728-tira-de-aco-transformada-em-arama-tubular-para-soldagem--parte-1>. Acesso em março de 2013.

Instrução de PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG. Disponível em: [http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/processos\\_soldagem/soldagem\\_tig.cfm](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/processos_soldagem/soldagem_tig.cfm). Acesso em Junho de 2013.

Informação geral sobre o PROCESSO DE SOLDAGEM SMAW. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/SMAW>. Acesso em Junho de 2013.

Informação geral sobre o PROCESSO DE SOLDAGEM ARCO SUBMERSO. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Soldagem\\_por\\_arco\\_submerso](http://pt.wikipedia.org/wiki/Soldagem_por_arco_submerso). Acesso em Agosto de 2013.

MKS CALDEIRARIA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, **Arquivo Técnico de Engenharia e Qualidade da MKS**, Camaçari-BA, 2012.