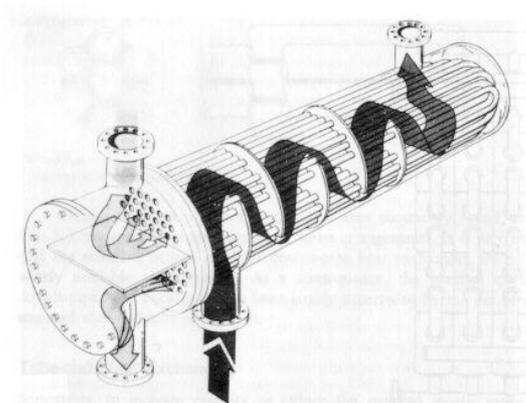
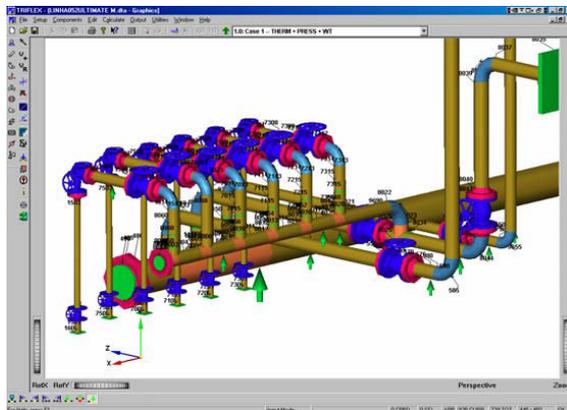


## DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS I VOLUME I (VASOS DE PRESSÃO)



E  
N  
G<sup>o</sup>  
A  
L  
E  
X  
A  
N  
D  
R  
E  
M  
A  
R  
C  
H  
O  
N  
R  
E  
D  
D  
O





**ÍNDICE:**

<b>1.0- VISÃO GLOBAL DE UMA PLANTA DE PROCESSO.....</b>	<b>PG.04</b>
<b>1.1 EQUIPAMENTOS DE PROCESSO.....</b>	<b>PG.05</b>
<b>1.2 GRAU DE IMPORTÂNCIA DOS EQUIPAMENTOS DE PROCESSO.....</b>	<b>PG.06</b>
<b>1.3 CLASSES DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO.....</b>	<b>PG.06</b>
<b>2.0- VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.08</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>PG.08</b>
<b>2.2 CLASSES E FINALIDADES DOS VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.08</b>
<b>2.3 PROJETO DOS VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.12</b>
<b>2.4 FORMATOS, PARTES PRINCIPAIS, TIPOS PRINCIPAIS.....</b>	<b>PG.12</b>
<b>2.4.1 ACESSÓRIOS DE VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.15</b>
<b>2.4.2 PEÇAS INTERNAS DE VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.16</b>
<b>2.4.3 TAMPOS DOS VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.19</b>
<b>2.4.4 TRANSIÇÃO DE FORMA E DE ESPESSURA.....</b>	<b>PG.26</b>
<b>2.4.5 ESPESSURAS DE CASCOS E DE TAMPOS.....</b>	<b>PG.27</b>
<b>2.4.5.1 ESPESSURAS NOMINAIS (COMERCIAIS).....</b>	<b>PG.29</b>
<b>2.5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E DA CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>PG.29</b>
<b>2.5.1 ETAPAS DO PROJETO E DA CONSTRUÇÃO.....</b>	<b>PG.29</b>
<b>2.5.1.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS GERAIS DE PROJETO.....</b>	<b>PG.30</b>
<b>2.5.1.2 DEFINIÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO (OU DE OPERAÇÃO) DO VASO.....</b>	<b>PG.30</b>
<b>2.5.1.3 PROJETO DE PROCESSO DO VASO.....</b>	<b>PG.31</b>
<b>2.5.1.4 PROJETO TÉRMICO.....</b>	<b>PG.32</b>
<b>2.5.1.5 PROJETO MECÂNICO.....</b>	<b>PG.32</b>
<b>2.6 MATERIAIS PARA VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.34</b>
<b>2.6.1 O PROBLEMA GERAL DA SELEÇÃO DE MATERIAIS.....</b>	<b>PG.36</b>
<b>2.6.2 AÇOS CARBONO.....</b>	<b>PG.39</b>
<b>2.6.3 AÇOS-LIGA E INOXIDÁVEIS – CASOS GERAIS DE EMPREGO.....</b>	<b>PG.43</b>
<b>2.6.3.1 AÇOS-LIGA.....</b>	<b>PG.45</b>
<b>2.6.3.2 AÇOS-INOXIDÁVEIS.....</b>	<b>PG.47</b>
<b>2.7 NORMAS DE PROJETO/ TENSÕES EM VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.51</b>
<b>2.7.1 NATUREZA E FINALIDADE DAS NORMAS DE PROJETO.....</b>	<b>PG.51</b>
<b>2.7.2 RESUMO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS DE PROJETO.....</b>	<b>PG.51</b>
<b>2.7.3 PRINCIPAIS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.53</b>
<b>2.7.4 TENSÕES ADMISSÍVEIS E COEFICIENTES DE SEGURANÇA.....</b>	<b>PG.54</b>
<b>2.7.4.1 CRITÉRIO DE ESCOAMENTO.....</b>	<b>PG.57</b>
<b>2.7.4.2 CATEGORIAS DE TENSÕES EM UM VASO DE PRESSÃO (ASME SÉC. VIII, DIV.2 APÊ.4).....</b>	<b>PG.61</b>
<b>2.7.4.3 TENSÕES PRIMÁRIAS.....</b>	<b>PG.62</b>
<b>2.7.4.4 TENSÕES SECUNDÁRIAS.....</b>	<b>PG.63</b>
<b>2.7.4.5 TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS.....</b>	<b>PG.63</b>
<b>2.7.4.6 RELAXAMENTO ESPONTÂNEO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS.....</b>	<b>PG.64</b>
<b>2.7.5 CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1.....</b>	<b>PG.65</b>
<b>2.7.6 CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2.....</b>	<b>PG.67</b>
<b>2.7.7 NORMA INGLESA BS-5500.....</b>	<b>PG.69</b>
<b>2.7.8 NORMAS ALEMÃS A.D. MERKBLATT.....</b>	<b>PG.70</b>
<b>2.8 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO.....</b>	<b>PG.71</b>
<b>2.8.1 DIVERSOS CONCEITOS DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA.....</b>	<b>PG.71</b>
<b>2.8.2 PRESSÃO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO.....</b>	<b>PG.71</b>
<b>2.8.3 PRESSÃO E TEMPERATURA DE PROJETO.....</b>	<b>PG.72</b>
<b>2.8.4 PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL - PRESSÃO DE ABERTURA DA VÁLVULA DE SEGURANÇA.....</b>	<b>PG.73</b>



2.8.5 NATUREZA E FINALIDADE DO TESTE HIDROSTÁTICO.....	PG.76
2.8.6 PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO.....	PG.77
2.9 CÁLCULO DE VASOS DE PRESSÃO PELO CÓDIGO ASME SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1.....	PG.79
2.9.1 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS PARA PRESSÃO INTERNA	PG.79
2.9.2 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA.....	PG.85
2.9.2.1 CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA (4 CONDIÇÕES).....	PG.85
2.9.3 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS DE GRANDE ESPESSURA.	PG.86
2.9.4 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS PARA A PRESSÃO INTERNA.....	PG.87
2.9.5 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA.....	PG.87
2.9.6 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS DE GRANDE ESPESSURA....	PG.87
2.9.7 CÁLCULO DE TAMPOS ELÍPTICOS PARA A PRESSÃO INTERNA.	PG.88
2.9.7.1 TAMPOS ELÍPTICOS COM RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS 2:1.....	PG.88
2.9.7.2 TAMPOS ELÍPTICOS COM OUTRA RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS...	PG.88
2.9.8 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS PARA A PRESSÃO INTERNA.....	PG.89
2.9.8.1 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS COM $r = 6\%D$ e $L=D$ ....	PG.89
2.9.8.2 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS COM OUTRAS PROPORÇÕES.....	PG.90
2.9.9 CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO.....	PG.91
2.9.10 EXERCÍCIOS SOBRE CÁLCULO DE VASOS DE PRESSÃO PELO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1.....	PG.92
3.0- BIBLIOGRAFIA.....	PG.104

## **1.0 VISÃO GLOBAL DE UMA PLANTA DE PROCESSO**

OS PARQUES INDUSTRIAIS DA ÁREA DE PROCESSO QUÍMICO E PETROQUÍMICO SÃO CONSTITUÍDOS DE PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE ELEVADA COMPLEXIDADE, CONSTITUÍDAS, POR SUA VEZ, DE EQUIPAMENTOS DE GRANDE PORTE COMO; REATORES, VASOS, PERMUTADORES, TURBINAS, BOMBAS, COMPRESSORES, ETC., E INTERLIGADOS POR QUILOMETROS DE TUBULAÇÕES, QUE SÃO CONSTRUÍDAS E INSTALADAS PARA A CONDUÇÃO DOS MAIS VARIADOS TIPOS DE FLUIDOS .

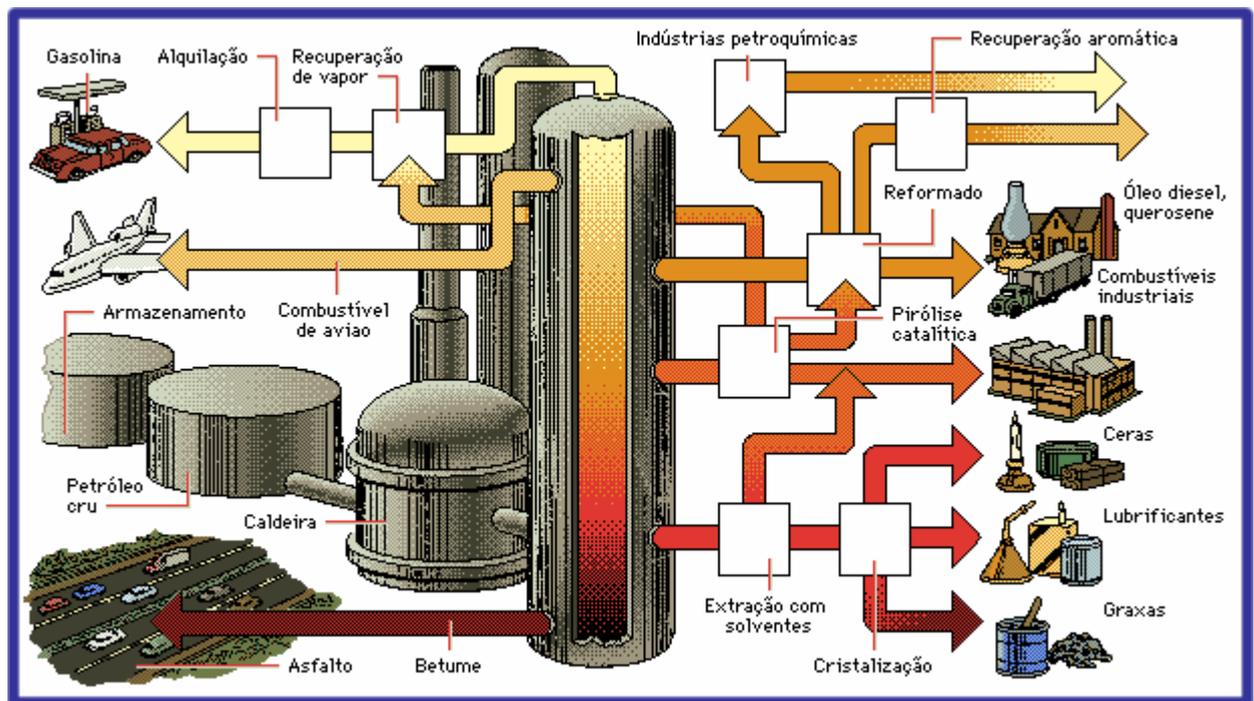
OS PROCESSOS, CONTIDOS POR ESTES EQUIPAMENTOS, QUASE SEMPRE COMPORTAM FLUIDOS AGRESSIVOS COM PRESSÕES E TEMPERATURAS ALTAS, NORMALMENTE MUITO DANOSOS ÀS PESSOAS E AO MEIO AMBIENTE. ESTA CONDIÇÃO OPERACIONAL TORNA AS ATIVIDADES DESTAS PLANTAS PERICULOSAS, EM VIRTUDE DA POSSIBILIDADE QUE ESTES FLUIDOS TEM EM PRODUIR DEGRADAÇÕES NESTES EQUIPAMENTOS, TORNANDO-SE NECESSÁRIO UM MÉTODO DE PROJETO CRITERIOSO DOS EQUIPAMENTOS ENVOLVIDOS, PARA QUE SUA OPERAÇÃO SE DÊ COM SEGURANÇA.

DENOMINAM-SE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO OS EQUIPAMENTOS EM INDÚSTRIA DE PROCESSAMENTO, QUE SÃO AS INDÚSTRIAS NAS QUAIS MATERIAIS SÓLIDOS OU FLUIDOS SOFREM TRANSFORMAÇÕES FÍSICAS OU QUÍMICAS OU AS QUE SE DEDICAM À ARMAZENAGEM, MANUSEIO OU DISTRIBUIÇÃO DE FLUIDOS.

ENTRE ESTAS INDÚSTRIAS PODEMOS CITAR AS REFINARIAS DE PETRÓLEO, AS INDUSTRIAS QUÍMICAS E PETROQUÍMICAS, GRANDE PARTE DAS INDÚSTRIAS ALIMENTARES E FARMACÊUTICAS, A PARTE TÉRMICA DAS CENTRAIS TERMOELÉTRICAS, OS TERMINAIS DE ARMAZENAGEM E DISTRIBUIÇÃO DE PRODUTOS DE PETRÓLEO, BEM COMO AS INSTALAÇÕES DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO E/OU GÁS NATURAL, EM TERRA OU NO MAR.



**EXEMPLO DE UMA PLANTA DE PROCESSO**



EXEMPLO DE CADEIA PRODUTIVA ENVOLVENDO UMA PLANTA DE PROCESSO

## 1.1 EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

OS EQUIPAMENTOS DE PROCESSO PODEM SER CLASSIFICADOS EM 03 GRUPOS GERAIS:

- EQUIPAMENTOS DE CALDEIRARIA;
- MÁQUINAS;
- TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS.

SENDO QUE ESTE ÚLTIMO GRUPO COMPOSTO PELOS ELEMENTOS FÍSICOS DE INTERLIGAÇÃO ENTRE OS DEMAIS EQUIPAMENTOS.

OS EQUIPAMENTOS DE CALDEIRARIA INCLUEM OS VASOS DE PRESSÃO EM GERAL E TAMBÉM TANQUES, ESFERAS, TORRES, REATORES, GASÔMETROS, FORNOS, CALDEIRAS, PERMUTADORES DE CALOR, RESFRIADORES, AQUECEDORES, FILTROS, SEPARADORES, SILOS, ETC.

AS MÁQUINAS USUALMENTE EXISTENTES SÃO AS BOMBAS, COMPRESSORES, EJETORES, CENTRIFUGADORES, E OUTROS EQUIPAMENTOS ENVOLVENDO A DINÂMICA DE FLUIDOS.

AS TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS, DE UMA FORMA GERAL, SÃO COMPOSTAS PELO CONJUNTO DE TUBOS E SEUS ACESSÓRIOS, COMO POR EXEMPLO, AS VÁLVULAS INDUSTRIAIS, QUE SÃO DISPOSITIVOS DESTINADOS A ESTABELEÇER, CONTROLAR E INTERROMPER O FLUXO EM UMA TUBULAÇÃO.

NAS INDÚSTRIAS DE PROCESSAMENTO EXISTEM **TRÊS CONDIÇÕES ESPECÍFICAS CARACTERÍSTICAS** QUE TORNAM NECESSÁRIO UM MAIOR GRAU DE CONFIABILIDADE PARA OS EQUIPAMENTOS (E, CONSEQÜENTEMENTE, PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ESSES EQUIPAMENTOS), EM COMPARAÇÃO COM O QUE É NORMALMENTE EXIGIDO PARA AS DEMAIS INDÚSTRIAS EM GERAL:



- AS INDÚSTRIAS DE PROCESSAMENTO TRABALHAM QUASE SEMPRE EM REGIME CONTÍNUO, DIA E NOITE, DURANTE MUITOS MESES A FIO. OS EQUIPAMENTOS FICAM, PORTANTO, SUBMETIDOS A UM REGIME SEVERO DE OPERAÇÃO, POIS FICAM SEM PARADAS PARA MANUTENÇÃO E INSPEÇÃO;
- OS DIVERSOS EQUIPAMENTOS FORMAM UMA CADEIA CONTÍNUA, ATRAVÉS DA QUAL CIRCULAM OS FLUIDOS DE PROCESSO. DESSE MODO, A FALHA OU PARALISAÇÃO DE UM ÚNICO EQUIPAMENTO, POR QUALQUER MOTIVO, OBRIGA GERALMENTE À PARALISAÇÃO, OU REDUÇÃO DE PRODUÇÃO, DE TODA A INSTALAÇÃO. É EVIDENTE QUE TODA A PARALISAÇÃO NÃO-PROGRAMADA DE UMA INDÚSTRIA RESULTA SEMPRE EM VULTUOSOS PREJUÍZOS DE PERDA DE PRODUÇÃO E DE LUCROS CESSANTES, VINDO DAÍ A NECESSIDADE DO MÁXIMO DE SEGURANÇA E CONFIABILIDADE DE FUNCIONAMENTO DESSES EQUIPAMENTOS;
- NESSAS INDÚSTRIAS EXISTEM, MUITAS VEZES, CONDIÇÕES DE GRANDE RISCO, DEVIDO AO MANUSEIO DE FLUIDOS INFLAMÁVEIS, TÓXICOS, EXPLOSIVOS OU EM ELEVADAS PRESSÕES OU TEMPERATURAS, CONDIÇÕES ESTAS PARA AS QUAIS UMA PEQUENA FALHA OU VAZAMENTO PODE RESULTAR EM UM ACIDENTE GRAVE OU MESMO EM UM DESASTRE DE GRANDES PROPORÇÕES.

### **1.2 GRAU DE IMPORTÂNCIA DOS EQUIPAMENTOS DE PROCESSO**

OS EQUIPAMENTOS DE PROCESSO CONSTITUEM NÃO SÓ A PARTE MAIS IMPORTANTE DA MAIORIA DAS INDUSTRIAS DE PROCESSAMENTO, COMO TAMBÉM SÃO GERALMENTE OS ITENS DE MAIOR TAMANHO, PESO E CUSTO UNITÁRIO NESSAS INDÚSTRIAS. ESSES MESMOS EQUIPAMENTOS ESTÃO IGUALMENTE PRESENTES, COMO ITENS DE MAIOR OU MENOR IMPORTÂNCIA, EM QUASE TODAS AS DEMAIS INDÚSTRIAS DE OUTROS RAMOS.

### **1.3 CLASSES DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO**

AS CLASSES DE **EQUIPAMENTOS DE PROCESSO ESTÁTICOS**, OBJETO DE NOSSO ESTUDO, PODEM SER SUBDIVIDIDAS CONFORME ABAIXO:

#### **VASOS DE PRESSÃO:**

- TORRES DE DESTILAÇÃO;
- TORRES DE FRACIONAMENTO;
- TORRES DE RETIFICAÇÃO;
- TORRES DE ABSORÇÃO;
- VASOS DE ACUMULAÇÃO E PARA OUTROS FINS;
- REATORES;
- ESFERAS DE ARMAZENAMENTO DE GASES.



## **CALDEIRAS**

### **PERMUTADORES DE CALOR:**

- PERMUTADORES DE CALOR;
- REFERVEDORES;
- RESFRIADORES;
- AQUECEDORES;
- CONDENSADORES.

## **FORNOS**

**TANQUES DE ARMAZENAGEM E OUTROS RESERVATÓRIOS APENAS COM PRESSÃO HIDROSTÁTICA**

## **TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

- TUBULAÇÕES DE PROCESSO;
- TUBULAÇÕES DE UTILIDADE;
- TUBULAÇÕES DE TRANSPORTE;
- TUBULAÇÕES DE DRENAGEM.



## 2.0 VASOS DE PRESSÃO

### 2.1 INTRODUÇÃO

A EXPRESSÃO “**VASOS DE PRESSÃO**” (**PRESSURE VESSEL**) DESIGNA GENERICAMENTE TODOS OS RECIPIENTES ESTANQUES, DE QUALQUER TIPO, DIMENSÕES, FORMATO OU FINALIDADE, CAPAZES DE CONTER UM FLUIDO PRESSURIZADO, OU SUJEITO A VÁCUO TOTAL OU PARCIAL.

TAMBÉM PODE-SER DEFINIDO COMO SENDO TODOS OS RESERVATÓRIOS, DE QUALQUER TIPO, DIMENSÕES OU FINALIDADES, QUE CONTENHAM QUALQUER FLUIDO EM PRESSÃO MANOMÉTRICA IGUAL OU SUPERIOR A 1,05 KG/CM<sup>2</sup> (15 PSI OU 103 KPa) OU SUBMETIDOS À PRESSÃO EXTERNA.

DENTRO DE UMA DEFINIÇÃO TÃO ABRANGENTE INCLUI-SE UMA ENORME VARIEDADE DE EQUIPAMENTOS, DESDE UMA SIMPLES PANELA DE PRESSÃO DE COZINHA, ATÉ OS MAIS SOFISTICADOS REATORES NUCLEARES.

É IMPORTANTE ENFATIZAR QUE O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO SÃO ATIVIDADES DE ENGENHARIA, E POR ISSO, COMO QUALQUER OUTRA ATIVIDADE DE ENGENHARIA, DESTINA-SE A SATISFAZER, O MELHOR POSSÍVEL, UMA NECESSIDADE SOCIAL. ASSIM, É INDISPENSÁVEL QUE SEJAM DEVIDAMENTE CONSIDERADOS TODOS OS FATORES ÉTICOS E SOCIAIS QUE POSSAM ESTAR ENVOLVIDOS, AINDA QUE DE FORMA REMOTA OU INDIRETA. ALÉM DO ASPECTO DE SEGURANÇA EM EQUIPAMENTOS CUJA OPERAÇÃO APRESENTE RISCO POTENCIAL DE ACIDENTES, DEVEM TAMBÉM SER CONSIDERADOS A SEGURANÇA CONTRA ACIDENTES NA FABRICAÇÃO E NA MONTAGEM DO VASO, BEM COMO POSSÍVEIS PREJUÍZOS A TERCEIROS, DANOS ECOLÓGICOS, INFRAÇÕES DE MARCAS E PATENTES, ETC.

### 2.2 CLASSES E FINALIDADES DOS VASOS DE PRESSÃO

PODEMOS FAZER A SEGUINTE CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO:

#### **VASOS NÃO SUJEITOS A CHAMA**

CÓDIGO ASME SECÃO VIII

- VASOS DE ARMAZENAMENTO E DE ACUMULAÇÃO
- TORRES DE DESTILAÇÃO FRACIONADA, RETIFICAÇÃO, ABSORÇÃO, ETC..
- REATORES DIVERSOS (OCORREM REAÇÃO QUÍMICA)
- ESFERAS DE ARMAZENAMENTO DE GASES

**VASOS NÃO SUJEITOS A CHAMA**

CÓDIGO ASME SECÃO VIII

- TROCADORES DE CALOR PROPRIAMENTE DITOS
- AQUECEDORES
- RESFRIADORES
- CONDENSADORES
- REFERVEDORES
- RESFRIADORES A AR

**VASOS SUJEITOS A CHAMA**

CÓDIGO ASME SECÃO I

- CALDEIRAS
- FORNOS

**VASOS SUJEITOS Á RADIAÇÃO NUCLEAR**

CÓDIGO ASME SECÃO III

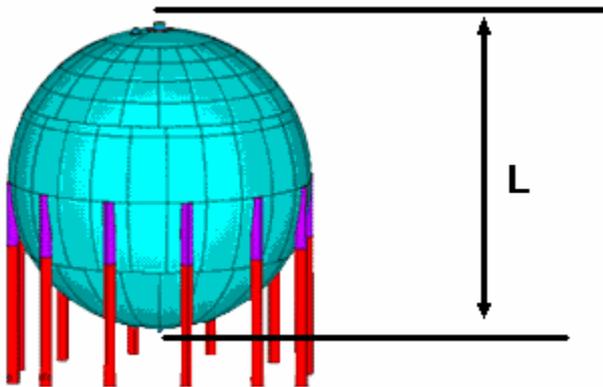
O OBJETO DE NOSSO ESTUDO SERÃO OS VASOS NÃO SUJEITOS A CHAMA, NEM A RADIAÇÃO NUCLEAR.

EM TODOS OS VASOS DE PRESSÃO EXISTE SEMPRE UM INVÓLUCRO ESTANQUE, EXTERNO E CONTÍNUO, QUE É DENOMINADO “PAREDE DE PRESSÃO” (PRESSURE WALL) DO VASO, OU SEJA, O ELEMENTO DO VASO QUE CONTÉM O FLUIDO PRESSURIZADO. A PAREDE DE PRESSÃO PODE SER SIMPLES OU MÚLTIPLA, BEM COMO PODE ASSUMIR VÁRIOS FORMATOS, DEPENDENDO PRINCIPALMENTE DAS DIMENSÕES E DA FINALIDADE DO EQUIPAMENTO, COMO SERÁ ESTUDADO. ALÉM DA PAREDE DE PRESSÃO, OS VASOS DE PRESSÃO POSSUEM SEMPRE OUTRAS PARTES, NÃO SUBMETIDAS À PRESSÃO, COMO É O CASO DO SUPORTE DO VASO, E FREQUENTEMENTE TAMBÉM OUTRAS PEÇAS, INTERNAS E EXTERNAS, PARA ATENDER A DIVERSAS FINALIDADES.

DE UMA FORMA GENÉRICA, OS VASOS DE PRESSÃO NÃO SUJEITOS A CHAMA SÃO EMPREGADOS EM TRÊS CASOS GERAIS DE USO:

- ARMAZENAGEM DE GASES SOB PRESSÃO,
- PROCESSAMENTO DE GASES E LÍQUIDOS,
- ACUMULAÇÃO INTERMEDIÁRIA DE GASES E LÍQUIDOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS.

OS GASES SÃO QUASE SEMPRE ARMAZENADOS SOB FORMA LIQUEFEITA, PARA QUE SE POSSA TER UMA GRANDE MASSA DO FLUIDO ARMAZENADA EM UM VOLUME RELATIVAMENTE PEQUENO. O ARMAZENAMENTO DE GASES NA FASE GASOSA É GERALMENTE ANTIECONÔMICA, DEVIDO À BAIXA MASSA ESPECÍFICA, UM VOLUME QUALQUER, NA FASE LÍQUIDA, OCUPA UM ESPAÇO 270 VEZES MENOR QUE A MESMA QUANTIDADE NA FASE GASOSA. UM GÁS PODE SER MANTIDO LIQUEFEITO PELA PRESSURIZAÇÃO, EM TEMPERATURA AMBIENTE, E, NESSE CASO OS RESERVATÓRIOS DE ARMAZENAGEM SÃO VASOS DE PRESSÃO, OU PODEM SER LIQUEFEITOS, EM PRESSÃO ATMOSFÉRICA, DESDE QUE MANTIDO EM TEMPERATURA INFERIOR AO SEU PONTO DE EBULIÇÃO, NESTE CASO, QUE É BEM MAIS RARO, OS RESERVATÓRIOS DE ARMAZENAMENTO NÃO SÃO CONSIDERADOS VASOS DE PRESSÃO.



#### EXEMPLO DE ARMAZENAMENTO DE GASES: ESFERA DE GLP

NUMEROSOS PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÕES FÍSICAS, BEM COMO MUITAS REAÇÕES QUÍMICAS PRECISAM SER EFETUADAS EM AMBIENTES SOB PRESSÃO. PARA ESTA FINALIDADE, QUE É JUSTAMENTE A MAIS IMPORTANTE DOS VASOS DE PRESSÃO, EMPREGAM-SE, POR EXEMPLO:

- TORRES DE BANDEJAS OU DE RECHEIOS: PROCESSOS DE DESTILAÇÃO FRACIONADA, RETIFICAÇÃO, ABSORÇÃO, ETC.
- REATORES DIVERSOS (CRAQUEAMENTO, REFORMA, DESSULFURIZAÇÃO, ETC.)
- VASOS SEPARADORES, SEPARANDO ÓLEOS DE ÁGUA, GASES DE LÍQUIDOS, ETC.

ALGUNS DOS PROCESSOS SÃO REALIZADOS EM AMBIENTE DE VÁCUO, OS VASOS PARA ESTES CASOS, TAMBÉM CHAMADOS DE VASOS DE PRESSÃO, TRABALHAM SUJEITOS À PRESSÃO ATMOSFÉRICA EXTERNA.

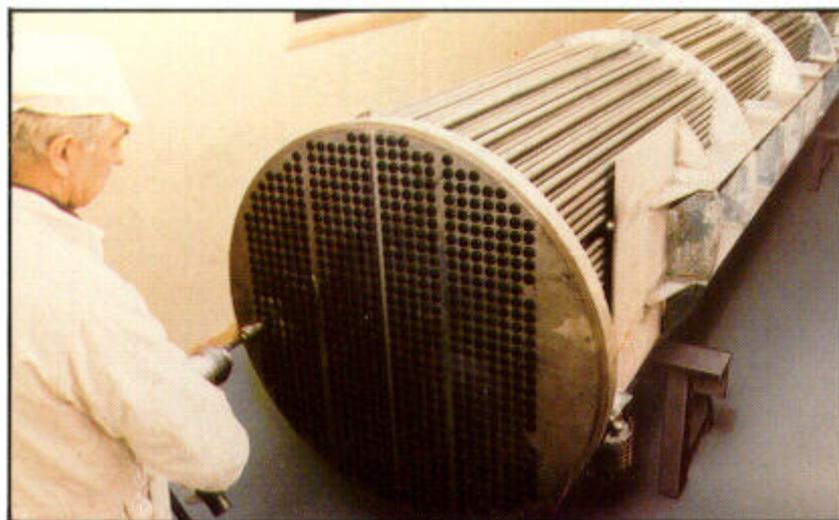
PARA OS PROCESSOS REALIZADOS SOB PRESSÃO É GERALMENTE NECESSÁRIA A ACUMULAÇÃO INTERMEDIÁRIA DE LÍQUIDOS OU DE GASES, ENTRE AS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO, OU ENTRE UM PROCESSO E OUTRO, PARA ESTABILIZAR A OPERAÇÃO, COMPENSANDO VARIAÇÕES TRANSITÓRIAS DE VAZÃO OU DE NÍVEL, E TAMBÉM PARA EVITAR QUE OS FLUIDOS SEJAM DESCOMPRIMIDOS E DEPOIS RECOMPRIMIDOS PARA ETAPA SEGUINTE, O QUE SERIA UM DESPERDÍCIO INÚTIL DE ENERGIA. ESSA ACUMULAÇÃO INTERMEDIÁRIA TAMBÉM É FEITA EM VASOS DE PRESSÃO.

OS VASOS PARA ARMAZENAMENTO DE GASES COSTUMAM SER CILÍNDRICOS, QUANDO DE CAPACIDADE PEQUENA (ATÉ 100M<sup>3</sup> APROXIMADAMENTE), E ESFÉRICO QUANDO DE CAPACIDADE MAIOR. OS VASOS PARA AS DEMAIS FINALIDADES SÃO NA MAIORIA DAS VEZES CILÍNDRICOS VERTICAIS OU HORIZONTAIS, OU CILÍNDRICOS MODIFICADOS, CONTENDO DOIS OU MAIS CORPOS CILÍNDRICOS E TRANSIÇÕES CÔNICAS, COMO VEREMOS MAIS ADIANTE.

**TROCADOR DE CALOR** É UM NOME GENÉRICO PARA DESIGNAR UMA GRANDE VARIEDADE DE EQUIPAMENTOS DESTINADOS A EFETUAR TROCAS DE CALOR ENTRE DOIS FLUIDOS. OS FLUIDOS CIRCULANTES PODEM SER LÍQUIDOS OU GASES. PARA PERMITIR UMA GRANDE SUPERFÍCIE DE TROCA DE CALOR, AUMENTANDO ASSIM A EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO, QUASE TODOS OS TROCADORES DE CALOR TEM FEIXES TUBULARES, DE TAL FORMA QUE UM DOS FLUIDOS CIRCULA POR DENTRO DOS TUBOS E O OUTRO PELO LADO DE FORA. A GRANDE MAIORIA DOS TROCADORES DE CALOR TRABALHA PRESSURIZADO, ÀS VEZES COM GRANDE DIFERENCIAL DE PRESSÃO ENTRE OS DOIS FLUIDOS. SÃO, PORTANTO, TAMBÉM VASOS DE PRESSÃO. QUASE TODOS OS TROCADORES DE CALOR TEM CASCO CILÍNDRICO HORIZONTAL.

DEPENDENDO DA FINALIDADE E DO TIPO, ESSES EQUIPAMENTOS PODEM RECEBER, ENTRE OUTRAS, AS DENOMINAÇÕES DE TROCADORES, REFERVEDORES, CONDENSADORES, RESFRIADORES, AQUECEDORES, ETC.

EXISTEM ALGUNS TROCADORES DE CALOR EM QUE UM DOS FLUIDOS CIRCULANTES É O PRÓPRIO AR, IMPULSIONADO POR VENTILADORES QUE FORÇAM UMA CORRENTE DE AR SOBRE O FEIXE TUBULAR.



**FEIXE TUBULAR DE UM TROCADOR CASCO E TUBO**



A FAIXA DE VARIAÇÃO DE PRESSÕES E DE TEMPERATURAS DE TRABALHO DOS VASOS DE PRESSÃO É MUITO EXTENSA. EXISTEM VASOS DE PRESSÃO TRABALHANDO DESDE O VÁCUO ABSOLUTO ATÉ CERCA DE 4000 KG/CM<sup>2</sup> ( $\approx$  400 MPa), E DESDE PRÓXIMO DE ZERO ABSOLUTO ATÉ TEMPERATURAS DA ORDEM DE 1.500°C. OS VASOS DE PRESSÃO PODEM TER GRANDES DIMENSÕES E PESO, HAVENDO ALGUNS COM MAIS DE 60 M DE COMPRIMENTO, E OUTROS COM MAIS DE 200 Ton DE PESO.

IGUALMENTE, É ENORME A QUANTIDADE DE FLUIDOS QUE PODEM ESTAR CONTIDOS NOS VASO, INCLUINDO-SE PRATICAMENTE TODOS OS QUE SEJAM DE USO INDUSTRIAL: LÍQUIDOS, GASES, MISTURA DE LÍQUIDOS E GASES, LÍQUIDOS OU GASES COM SÓLIDOS EM SUSPENSÃO, ETC.

### **2.3 PROJETO DOS VASOS DE PRESSÃO**

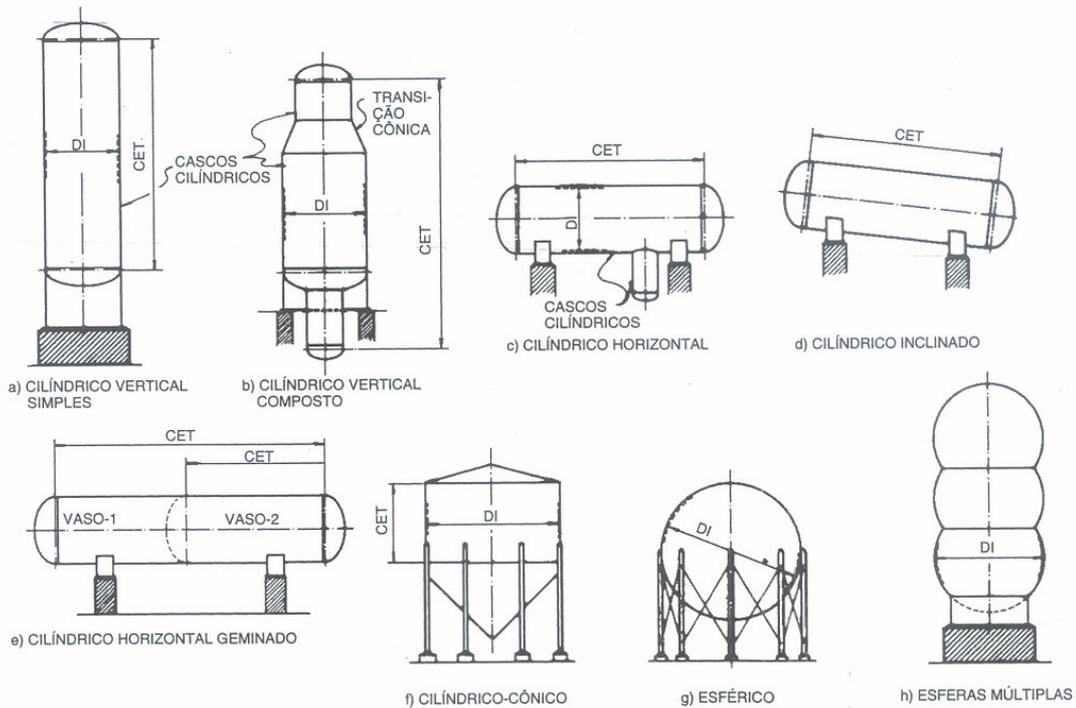
CONTRARIAMENTE AO QUE ACONTECE COM QUASE TODOS OS OUTROS EQUIPAMENTOS, MÁQUINAS, VEÍCULOS, OBJETOS E MATERIAIS DE USO CORRENTE, A GRANDE MAIORIA DOS VASOS DE PRESSÃO NÃO É UM ITEM DE LINHA DE FABRICAÇÃO DE ALGUMA INDÚSTRIA, SALVO RARA EXCEÇÕES, OS VASOS SÃO, QUASE TODOS, PROJETADOS E CONSTRUÍDOS POR ENCOMENDA (“TAYLOR-MADE”), SOB MEDIDA, PARA ATENDER, EM CADA CASO, A DETERMINADA FINALIDADE OU A DETERMINADAS CONDIÇÕES DE DESEMPENHO. COMO CONSEQÜÊNCIA, O PROJETO É QUASE 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 A PRESSÃO E DEMAIS CARGAS ATUANTES, COMO TAMBÉM A SELEÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DOS MATERIAIS ADEQUADOS, DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, DETALHES, PEÇAS INTERNAS, ETC.

### **2.4 FORMATOS, PARTES PRINCIPAIS, TIPOS PRINCIPAIS**

A PAREDE DE PRESSÃO DE UM VASO COMPÕE-SE BASICAMENTE DO **CASCO** (OU CASCOS) DO VASO (**SHELL**) E DOS TAMPOS DE FECHAMENTOS (HEADS).

O CASCO DOS VASOS DE PRESSÃO TEM SEMPRE O FORMATO DE UMA SUPERFÍCIE DE REVOLUÇÃO. QUASE TODOS OS VASOS, COM RARAS EXCEÇÕES, TÊM O CASCO COM UMA DAS TRÊS FORMAS BÁSICAS: CILÍNDRICA, CÔNICA E ESFÉRICA, OU COMBINAÇÕES DESTAS FORMAS, SÃO COMUNS, POR EXEMPLO, VASOS COM VÁRIOS CASCOS CILÍNDRICOS E CÔNICOS. É COMUM TAMBÉM O FORMATO TOROIDAL, PRINCIPALMENTE PARA SEÇÕES DE CONCORDÂNCIA.

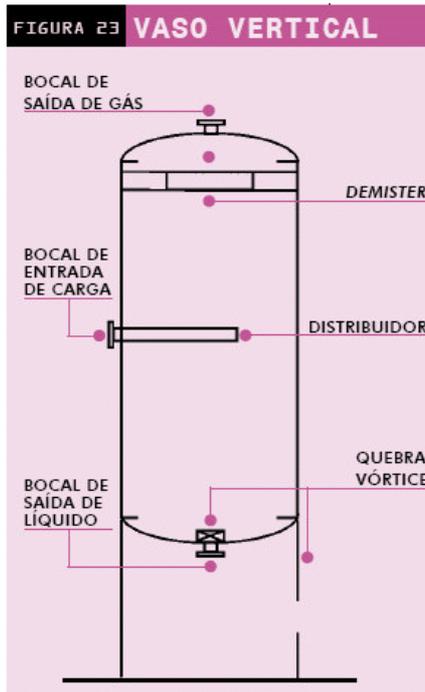


### PRINCIPAIS FORMATOS DE VASOS DE PRESSÃO

QUANTO À DISPOSIÇÃO DE INSTALAÇÃO, OS VASOS DE PRESSÃO PODEM SER VERTICAIS, HORIZONTAIS OU INCLINADOS.

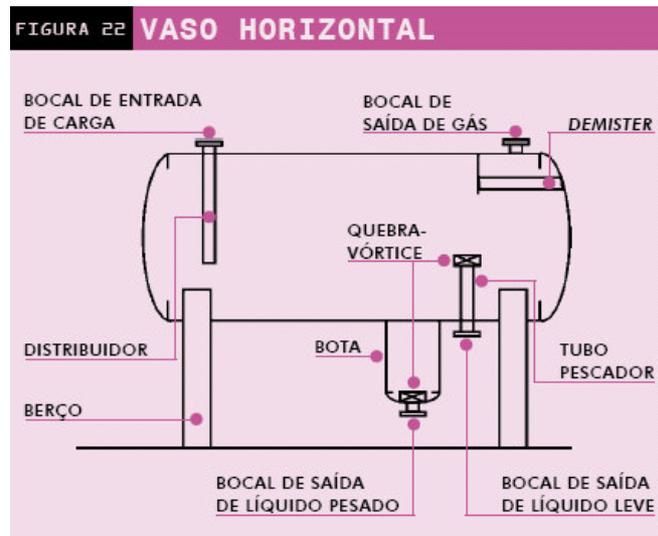
NA MAIORIA DAS VEZES O FORMATO E A POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO DE UM VASO DECORREM, OU SÃO UMA IMPOSIÇÃO, DA FINALIDADE OU DO SERVIÇO DO MESMO.

OS VASOS VERTICAIS SÃO USADOS PRINCIPALMENTE QUANDO É NECESSÁRIA A AÇÃO DA GRAVIDADE PARA O FUNCIONAMENTO DO VASO OU PARA O ESCOAMENTO DO FLUIDO.



DE UM MODO GERAL, OS VASOS VERTICAIS SÃO MAIS CAROS DO QUE OS HORIZONTAIS, PRINCIPALMENTE QUANDO DE GRANDE COMPRIMENTO, EM COMPENSAÇÃO OCUPAM MENOR ÁREA DE TERRENO, SENDO POR ISSO PREFERIDOS QUANDO HÁ NECESSIDADE DE ECONOMIA DE TERRENO.

OS VASOS HORIZONTAIS, MUITO COMUNS, SÃO USADOS, ENTRE OUTROS CASOS, PARA TROCADORES DE CALOR E PARA A MAIORIA DOS VASOS DE ACUMULAÇÃO. OS VASOS EM POSIÇÕES INCLINADAS SÃO EXCEÇÕES, EMPREGADOS SOMENTE QUANDO O SERVIÇO EXIGIR, COMO, POR EXEMPLO, PARA ESCOAMENTO POR GRAVIDADE DE MATERIAIS DE DIFÍCIL ESCOAMENTO.



PARA A MAIOR PARTE DOS VASOS O CASCO É CILÍNDRICO. ESSA PREFERÊNCIA DEVE-SE AO FATO DE QUE O FORMATO CILÍNDRICO É O MAIS FÁCIL DE SE FABRICAR E TRANSPORTAR, PRESTA-SE BEM À MAIORIA DOS SERVIÇOS, E É O QUE PERMITE O APROVEITAMENTO DE CHAPAS INTEIRAS PARA A FABRICAÇÃO DO VASO. QUANDO A VAZÃO AO LONGO DO VASO É APROXIMADAMENTE A MESMA EM TODAS AS SEÇÕES TRANSVERSAIS, O CASCO SERÁ UM CILINDRO SIMPLES. QUANDO, ENTRETANTO, HOUVER GRANDE VARIAÇÃO DE VAZÃO ENTRE UMA SEÇÃO E OUTRA DO MESMO VASO, DEVIDO À EXISTÊNCIA DE VÁRIOS PONTOS IMPORTANTES DE ENTRADA E SAÍDA DE FLUIDOS, FAZ-SE O CASCO COMO UM CILINDRO COMPOSTO, COM DOIS OU MAIS CORPOS CILÍNDRICOS DE DIÂMETROS DIFERENTES INTERLIGADOS POR SEÇÕES CÔNICAS OU TOROIDAIS DE CONCORDÂNCIA, DE TAL MANEIRA QUE A VELOCIDADE GERAL DE ESCOAMENTO DOS FLUIDOS AO LONGO DO VASO SEJA APROXIMADAMENTE CONSTANTE, AUMENTANDO-SE O DIÂMETRO ONDE A VAZÃO FOR MAIOR, E VICE-VERSA. A VELOCIDADE GERAL DE ESCOAMENTO, APROXIMADAMENTE CONSTANTE AO LONGO DO VASO, É UMA CONDIÇÃO EXIGIDA PELA MAIORIA DAS REAÇÕES E TRANSFORMAÇÕES DE PROCESSO.

TEORICAMENTE, O FORMATO IDEAL PARA UM VASO DE PRESSÃO É UMA ESFERA, COM O QUAL SE CHEGA À MENOR ESPESSURA DE PAREDE E AO MENOR PESO, EM IGUALDADE DE CONDIÇÕES DE PRESSÃO E DE VOLUME CONTIDO (TEORIA DE RECIPIENTES DE PAREDE FINA). ENTRETANTO, OS VASOS ESFÉRICOS, ALÉM DE SOMENTE SE PRESTAREM COMO VASOS DE ARMAZENAMENTO, SÃO CAROS E DIFÍCEIS DE FABRICAR, OCUPAM MUITO ESPAÇO E RARAMENTE PODEM SER TRANSPORTADOS INTEIROS. POR ESTES MOTIVOS, OS VASOS ESFÉRICOS SÓ SÃO ECONÔMICOS PARA GRANDES DIMENSÕES, SENDO EMPREGADOS NESSES CASOS, PARA ARMAZENAGEM DE GASES SOB PRESSÃO.



O FORMATO CÔNICO É EMPREGADO PARA A SEÇÃO DE TRANSIÇÃO ENTRE DOIS CORPOS CILÍNDRICOS DE DIÂMETROS DIFERENTES. EMBORA BEM MAIS RAROS, SÃO TAMBÉM USADOS OS FORMATOS DE ESFERAS MÚLTIPLAS E DE OVOÍDE.

OS VASOS CILÍNDRICOS HORIZONTAIS OU VERTICAIS PODEM, EM ALGUNS CASOS, SER GEMINADOS, ISTO É, DOIS OU MAIS VASOS DE MESMO DIÂMETRO, FORMANDO UM ÚNICO CONJUNTO. ESSA DISPOSIÇÃO, QUE RESULTA EM ECONOMIA DE TAMPOS, DE SUPORTES E DE ESPAÇO OCUPADO, PODE SER VANTAJOSA QUANDO A PRESSÃO PELO LADO CONVEXO DO TAMPO INTERMEDIÁRIO É MODERADA.

AS DIMENSÕES QUE CARACTERIZAM UM VASO DE PRESSÃO SÃO O “DIÂMETRO INTERNO”(Di) E O “COMPRIMENTO ENTRE TANGENTES” (CET). O DIÂMETRO INTERNO APLICA-SE A QUALQUER FORMATO DO VASO E, COMO O NOME INDICA, É O DIÂMETRO MEDIDO PELA FACE INTERNA DA PAREDE. O COMPRIMENTO ENTRE TANGENTES, QUE SE APLICA APENAS AOS VASOS COM CORPOS CILÍNDRICOS OU CILÍNDRICOS COMPOSTOS, É O COMPRIMENTO TOTAL DO CORPO CILÍNDRICO, OU A SOMA DOS COMPRIMENTOS DOS CORPOS CILÍNDRICOS E CÔNICOS SUCESSIVOS. AS “LINHAS DE TANGÊNCIA”, QUE LIMITAM O COMPRIMENTO ENTRE TANGENTES, SÃO AS LINHAS TRAÇADAS, PRÓXIMO A AMBOS OS EXTREMOS DO VASO, NA TANGÊNCIA ENTRE OS CORPOS CILÍNDRICOS E OS TAMPOS DE FECHAMENTO. NOS VASOS EM POSIÇÃO VERTICAL, É REGRA USUAL TOMAR-SE A LINHA DE TANGÊNCIA INFERIOR, COMO PLANO DE REFERÊNCIA PARA TODAS AS COTAS VERTICAIS.

### **2.4.1 ACESSÓRIOS DE VASOS DE PRESSÃO**

OBSERVANDO OS DESENHOS ESQUEMÁTICOS DOS VASOS DE PRESSÃO VERTICAL E HORIZONTAL, APRESENTADOS RESPECTIVAMENTE NAS PÁGINAS 13 E 14 ACIMA, IDENTIFICAMOS QUE SÃO ENUMERADOS ALGUNS ACESSÓRIOS TÍPICOS DE VASOS DE PRESSÃO NOS MESMOS. A SEGUIR DESCREVEREMOS CADA UM DESTES ACESSÓRIOS.

#### **➤ DISTRIBUIDORES E TUBOS PESCADORES**

SÃO EXTENSÕES DOS BOCAIS QUE SE PROJETAM PARA DENTRO DOS VASOS. OS PRIMEIROS(DISTRIBUIDORES) SÃO INSTALADOS NOS BOCAIS DE CARGA COM O OBJETIVO DE REDUZIR A AGITAÇÃO COM A ENTRADA DO LÍQUIDO. OS TUBOS PESCADORES SÃO INSTALADOS NOS BOCAIS DE SAÍDA PARA LÍQUIDOS LEVES, NA SEPARAÇÃO VAPOR-LÍQUIDO-LÍQUIDO, A FIM DE EVITAR O ESCOAMENTO DO FLUIDO PESADO POR ESTA TUBULAÇÃO.

#### **➤ ELIMINADOR DE NÉVOA (DEMISTER)**

CONSISTE EM BLOCOS DE MATERIAIS ESTRUTURADOS, COMO POR EXEMPLO, COLMÉIAS, MONTADOS ANTES DA RETIRADA DE VAPOR, PARA NÃO PERMITIR A PASSAGEM DE GOTÍCULAS DE LÍQUIDO EM SUSPENSÃO, QUE PODEM CAUSAR EROSIÃO E CORROSÃO, PRINCIPALMENTE EM VASOS DE SUCÇÃO DE COMPRESSORES.

#### **➤ BOTA**

CONSISTE EM UMA SEÇÃO VERTICAL DE MENOR DIÂMETRO, SOLDADO NO FUNDO DE VASOS HORIZONTAIS DE SEPARAÇÃO VAPOR-LÍQUIDO-LÍQUIDO. É USADA PARA ACUMULAR O FLUIDO PESADO QUANDO SUA VAZÃO É MUITO GRANDE EM RELAÇÃO À DO LÍQUIDO LEVE, REDUZINDO COM ISSO O DIÂMETRO DO VASO.

➤ **BOCAS DE VISITA**

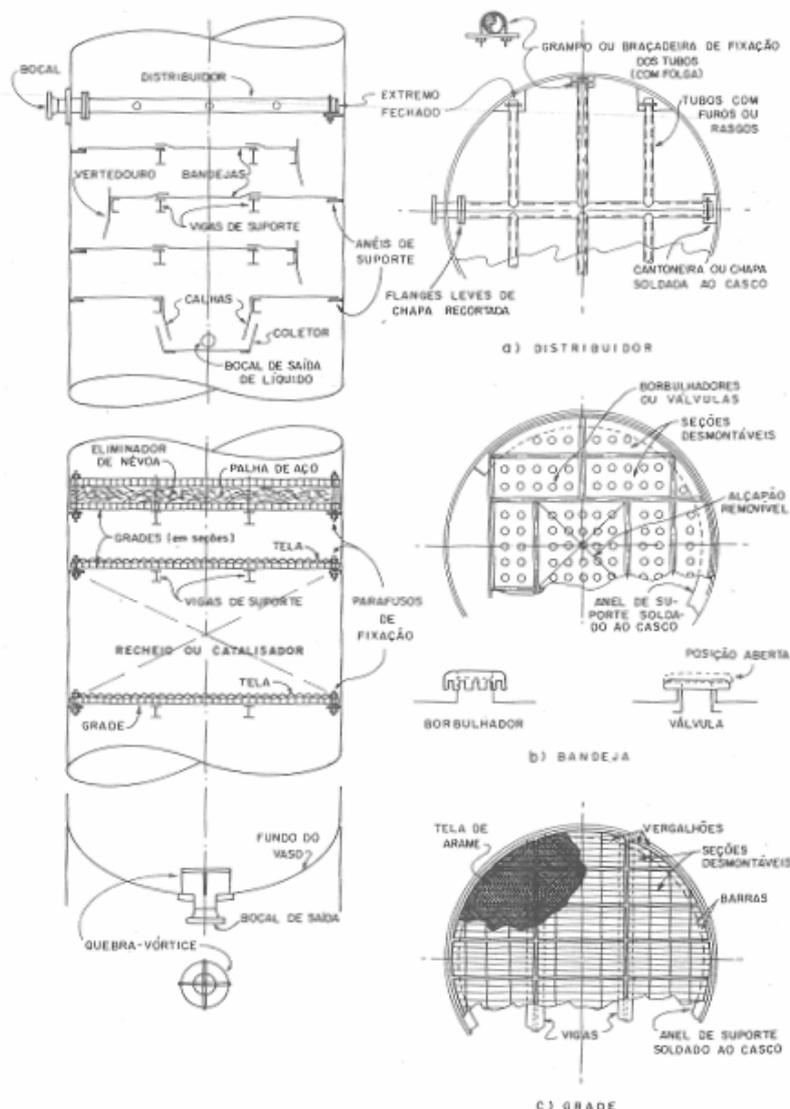
SÃO BOCAIS EM TORNO DE 20" UTILIZADOS PARA DAR ACESSO AO INTERIOR DO VASO PARA MONTAGEM, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO.

➤ **OUTROS ACESSÓRIOS**

ESTÃO SEMPRE PRESENTES BOCAIS AUXILIARES (PARA INSTRUMENTOS DIVERSOS, DRENOS, RESPIROS, DE PURGA COM VAPOR ETC.), QUEBRA-VÓRTICES E SUPORTAÇÃO ("SAIAS" PARA VASOS VERTICAIS E "BERÇOS" PARA HORIZONTAIS). PODEM SER UTILIZADOS AINDA OUTROS ACESSÓRIOS, COMO: CHAPAS DEFLETORAS, CHICANAS VERTEDORAS, COALESCEDORES, SERPENTINAS OU "BAIONETAS" ETC.

**2.4.2 PEÇAS INTERNAS DE VASOS DE PRESSÃO**

É MUITO GRANDE A VARIEDADE DE PEÇAS INTERNAS QUE PODEM EXISTIR EM VASOS DE PRESSÃO, DEPENDENDO BASICAMENTE DA FINALIDADE DO VASO.



**PEÇAS INTERNAS DE VASOS DE PRESSÃO**



CONFORME FIGURA ILUSTRATIVA ACIMA, PODEMOS IDENTIFICAR:

AS **BANDEJAS (TRAYS)**, CONSTRUÍDAS DE CHAPAS, DESTINAM-SE A CONTER **BORBULHADORES (BUBBLE-CAPS)** OU VÁLVULAS, EM TORRES DE DESTILAÇÃO FRACIONADA OU DE RETIFICAÇÃO. AS BANDEJAS TÊM SEMPRE UM **VERTEDOURO (WEIR)**, E SÃO CORTADAS ALTERNADAMENTE À DIREITA E À ESQUERDA (OU NO CENTRO E NAS EXTREMIDADES), DEVEM TER UM ALÇAPÃO REMOVÍVEL PARA PERMITIR A PASSAGEM DE PESSOAS DURANTE A MONTAGEM OU MANUTENÇÃO.

OS **DISTRIBUIDORES** SÃO TUBOS INTERNOS, COM OU SEM RAMIFICAÇÕES, PARA ESPALHAR O LÍQUIDO QUE ENTRA NO VASO, DEVENDO PARA ISSO POSSUIR FUROS OU RASGOS CONVENIENTEMENTE COLOCADOS. OS FLANGES INTERNOS PARA PERMITIR A DESMONTAGEM DOS DISTRIBUIDORES COSTUMAM SER PEÇAS LEVES, RECORTADAS DE CHAPAS, PELO FATO DE NÃO ESTAREM SUJEITOS A ESFORÇOS DE PRESSÃO.

AS **GRADES (GRATING)**, CONSTRUÍDAS DE BARRAS CHATAS E DE VERGALHÕES, DESTINAM-SE A SUSTENTAR RECHEIOS, LEITOS DE CATALISADOR, ELIMINADORES DE NÉVOA (DEMISTER), ETC.

TANTO AS BANDEJAS COMO AS GRADES SÃO GERALMENTE CONSTRUÍDAS EM SEÇÕES RETANGULARES DESMONTÁVEIS. AS GRADES E AS BANDEJAS SÃO SUSTENTADAS POR UM ANEL PERIFÉRICO DE CHAPA OU DE BARRA CHATA SOLDADO AO CASCO, EXCETO EM VASOS DE DIÂMETRO MUITO PEQUENO, DEVE HAVER TAMBÉM VIGAS INTERMEDIÁRIAS DE SUSTENTAÇÃO. AS VIGAS TAMBÉM SÃO DESMONTÁVEIS, SENDO GERALMENTE PARAFUSADAS EM AMBAS AS EXTREMIDADES EM ORELHAS DE CHAPA, SOLDADAS AO INTERIOR DO CASCO.

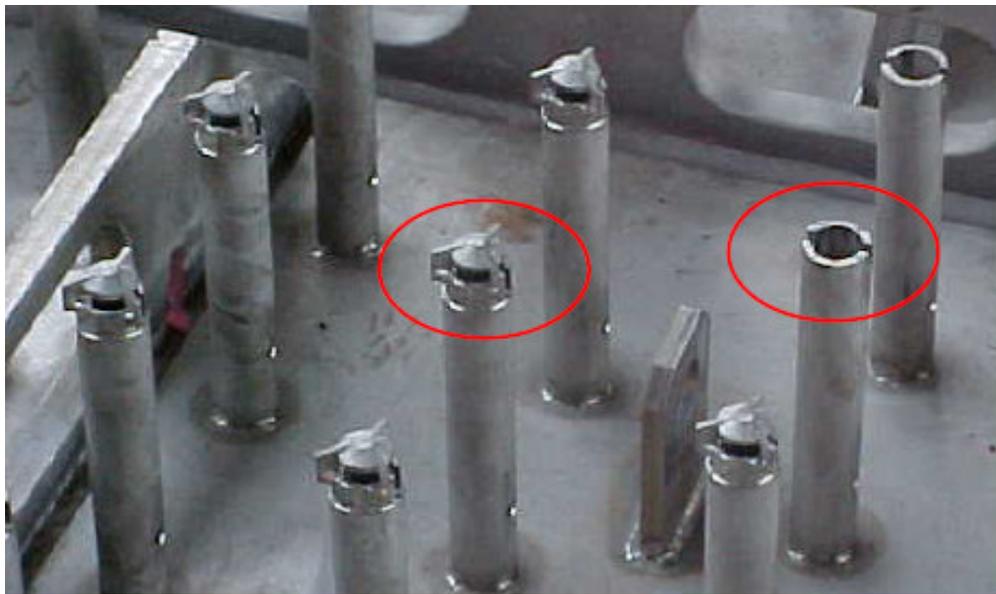
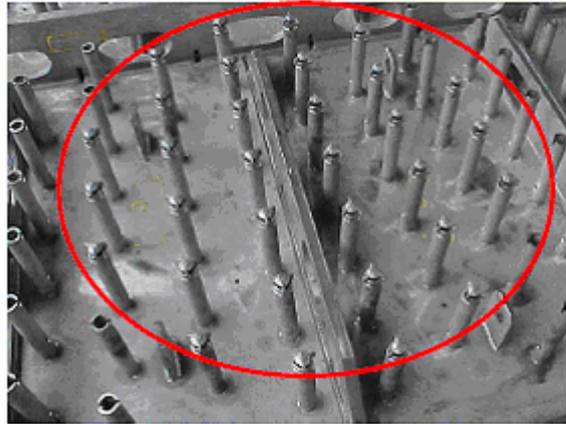
OUTRAS PEÇAS INTERNAS COMUNS EM VASOS DE PRESSÃO SÃO OS **DEFLETORES, CHICANAS (BAFFLES), CALHAS (DOWN COMERS), COLETORES (SUMPS), CHAMINÉS (RISERS), POTES DE SELAGEM (SEAL PANS) E QUEBRA-VÓRTICES (VORTEX BREAKERS)**.

OS DEFLETORES, CHICANAS, CALHAS E COLETORES SÃO PEÇAS COM A FINALIDADE DE DIRIGIR A CORRENTE FLUIDA, EVITAR IMPACTOS, OU COLETAR A SAÍDA DE LÍQUIDOS.

OS QUEBRA VÓRTICES DESTINAM-SE A EVITAR A FORMAÇÃO DE VÓRTICES, SENDO RECOMENDÁVEL A SUA COLOCAÇÃO NOS BOCAIS LIGADOS À LINHA DE SUÇÃO DE QUALQUER BOMBA, EVITANDO A ENTRADA DE AR E CAVITAÇÃO NA BOMBA. SÃO GERALMENTE CONSTITUÍDOS POR DUAS CHAPAS RETANGULARES EM CRUZ, SOBRE AS QUAIS É SOLDADO UM DISCO CIRCULAR DE CHAPA.

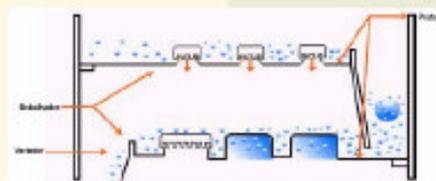
DEVEM SER COLOCADOS TAMBÉM DEFLETORES INTERNOS NOS BOCAIS SUPERIORES DE INSTRUMENTOS DE NÍVEL EM VASOS VERTICAIS, BEM COMO QUEBRA-JATOS NOS BOCAIS DE ENTRADA DE LÍQUIDOS QUANDO FOR JULGADO PREJUDICIAL O IMPACTO DA CORRENTE LÍQUIDA EM PARTES INTERNAS OU NA PAREDE DO VASO.

AS PEÇAS INTERNAS DESMONTÁVEIS, COM EXCEÇÃO DAS VIGAS PRINCIPAIS DE SUSTENTAÇÃO, DEVEM SER PROJETADAS DE FORMA QUE TENHAM, SEMPRE QUE POSSÍVEL, O PESO MÁXIMO DE 25 Kg, E DIMENSÕES QUE FACILITEM SUA PASSAGEM PELAS BOCAS DE VISITA DO VASO.



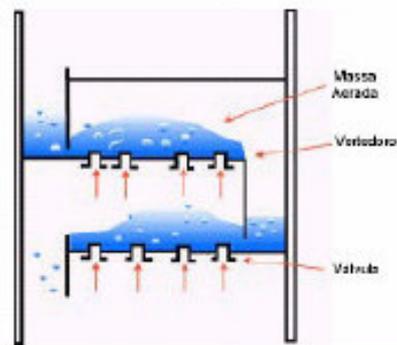
DETALHE DA DISPOSIÇÃO DOS DISTRIBUIDORES

**Bandejas com Borbulhadores**



As bandejas com borbulhadores consistem basicamente de uma chapa com furos, sobre os quais são montados os borbulhadores. O uso deste tipo é, atualmente, muito pouco encontrado, estando presente apenas em equipamentos, mais antigos.

**Bandejas Valvuladas**



Contêm furos nos quais são colocadas as válvulas, cuja abertura varia com o fluxo de vapor, de maneira a não permitir vazamentos de líquidos. Seu uso é cada vez maior devido ao baixo custo e alto rendimento.



### 2.4.3 TAMPÓS DOS VASOS DE PRESSÃO

DENOMINAM-SE TAMPÓS (HEADS) AS PEÇAS DE FECHAMENTO DOS CASCOS CILÍNDRICOS DOS VASOS DE PRESSÃO. OS TAMPÓS PODEM TER VÁRIOS FORMATOS, DOS QUAIS OS MAIS USUAIS SÃO OS SEGUINTE:

- ELÍPTICO;
- TORIESFÉRICO;
- HEMISFÉRICO;
- CÔNICO;
- PLANO.

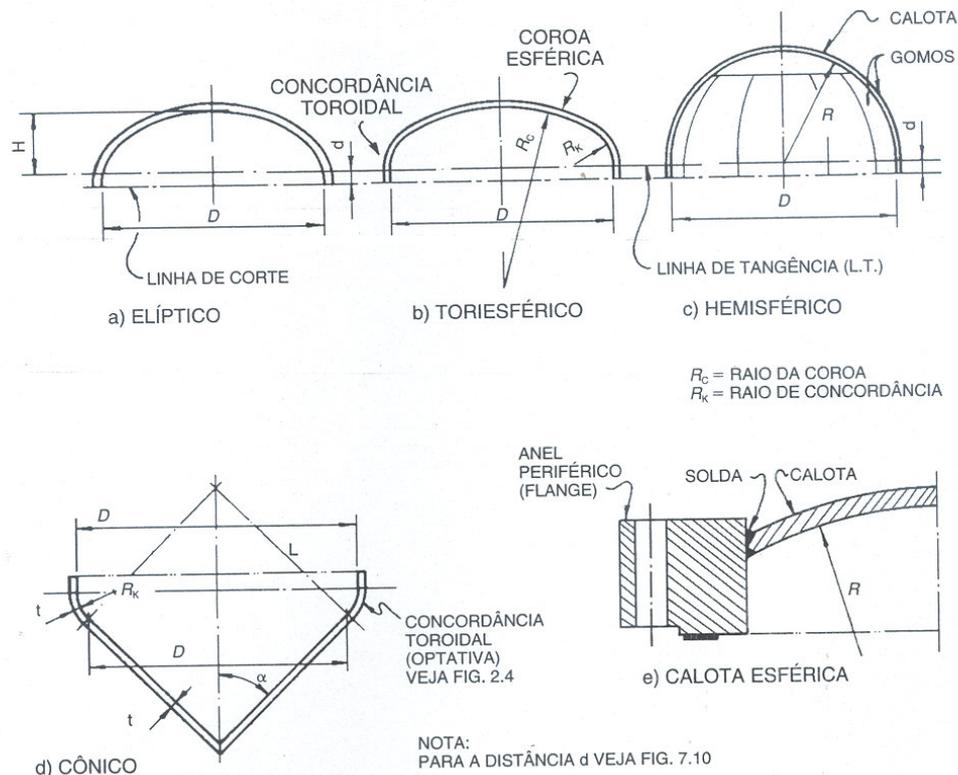
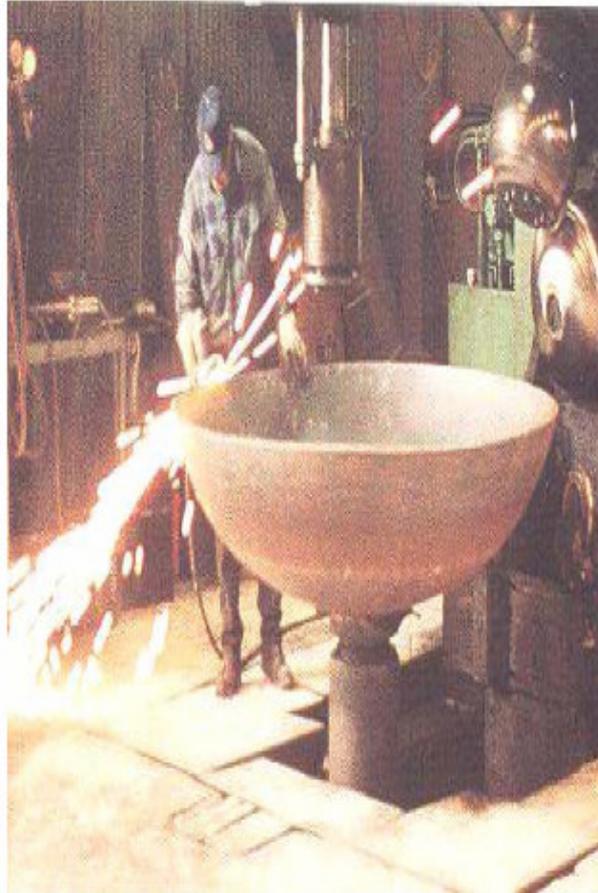


Fig. 2.2 Alguns tipos de tampos. (Baseada nas Figs. 1.4 e 1.6 do código ASME, Seção VIII, Divisão 1.)

## TAMPO ELÍPTICO

O TAMPO ELÍPTICO TEM, TEORICAMENTE, AS SEÇÕES TRANSVERSAIS COMO UMA ELIPSE GEOMÉTRICA PERFEITA. NO TAMPO ELÍPTICO DENOMINADO "NORMAL", A RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS É 2:1, ISTO É, O DIÂMETRO DO TAMPO É QUATRO VEZES A SUA ALTURA. ESSE TAMPO QUASE SEMPRE PODE SER CONSTRUÍDO COM CHAPAS DA MESMA ESPESSURA USADA NO CASCO CILÍNDRICO DO VASO, PORQUE A SUA RESISTÊNCIA À PRESSÃO INTERNA É PRATICAMENTE IGUAL À DO CILINDRO DE MESMO DIÂMETRO.



PREPARAÇÃO DO CHANFRO PARA SOLDAGEM DE  
UM TAMPO ELÍPTICO

### TAMPO TORIESFÉRICO

OS TAMPOS TORIESFÉRICOS SÃO CONSTITUÍDOS POR UMA CALOTA CENTRAL ESFÉRICA (CROWN), DE RAIO  $R_C$ , E POR UMA SEÇÃO TOROIDAL DE CORCONDÂNCIA (KNUCKLE), DE RAIO  $R_K$ . O TAMPO TORIESFÉRICO É BEM MAIS FÁCIL DE FABRICAR DO QUE O ELÍPTICO, E ESSA FACILIDADE É TANTO MAIOR QUANTO MENOS PROFUNDO FOR, ISTO É, QUANTO MENOR FOR O RAIO  $R_K$ . INVERSAMENTE, A SUA RESISTÊNCIA SERÁ TANTO MAIOR QUANTO MAIOR FOR  $R_K$ , PERMITINDO CHAPAS DE MENOR ESPESSURA. QUALQUER TAMPO TORIESFÉRICO É SEMPRE MENOS RESISTENTE DO QUE UM ELÍPTICO DE MESMO DIÂMETRO E COM MESMA RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS.

O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 (PARÁGRAFO UG-32) E DIVISÃO 2 (PARÁGRAFO AD-204), EXIGE PARA OS TAMPOS TORIESFÉRICOS QUE O RAIO  $R_K$  SEJA NO MÍNIMO 6% DI DIÂMETRO, OU 3 VEZES A ESPESSURA DA CHAPA, O QUE FOR MAIOR, E QUE O RAIO  $R_C$  SEJA NO MÁXIMO IGUAL AO DIÂMETRO EXTERNO DO TAMPO. OS TAMPOS TORIESFÉRICOS COM ESSES VALORES LIMITES, ISTO É,  $R_K = 0,06 D$  e  $R_C = D$ , SÃO OS MENOS RESISTENTES DE TODOS AO EFEITO DA PRESSÃO INTERNA, EXIGINDO POR ISSO MAIOR ESPESSURA DE CHAPA.

QUALQUER TAMPO TORIESFÉRICO É TANTO MAIS RESISTENTE QUANTO MAIS SEU PERFIL SE APROXIMA DE UMA ELIPSE PERFEITA. DE TODOS OS PERFIS TORIESFÉRICOS COM RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS 2:1, O PERFIL EM QUE SE TEM  $R_K = 0,1727 D$  e  $R_C = 0,9045 D$  (OU SEJA,  $R_K / R_C = 0,1909$ ) É O QUE MAIS SE APROXIMA DA ELIPSE. ESSE PERFIL É CONHECIDO

COMO “FALSA ELIPSE”, OU TAMBÉM COMO “PERFIL FOGGLES”, É O MAIS EMPREGADO DE TODOS OS PERFIS TORIESFÉRICOS, E FREQUENTEMENTE CONFUNDIDO COM O TAMPO ELÍPTICO VERDADEIRO. O TAMPO TORIESFÉRICO “FALSA ELIPSE” DE ACORDO COM O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII PODE SER CONSIDERADO EQUIVALENTE AO TAMPO ELÍPTICO.

OS TAMPÓS ELÍPTICOS E TORIESFÉRICOS PODEM SER INSTALADOS EM POSIÇÃO REVERSA, ISTO É, COM A PRESSÃO PELO LADO CONVEXO, ESSA DISPOSIÇÃO PODE SER VANTAJOSA PARA O TAMPO INFERIOR DE VASOS VERTICAIS DE PEQUENOS DIÂMETROS (ATÉ 1M POR EXEMPLO), E DE BAIXA PRESSÃO, PARA FACILITAR O SUPORTE OU O APOIO DO VASO SOBRE UMA SUPERFÍCIE PLANA.



TAMPO TORIESFÉRICO DE GRANDE PORTE

### TAMPO HEMISFÉRICO

O TAMPO HEMISFÉRICO É PROPORCIONALMENTE O MAIS RESISTENTE DE TODOS, PODENDO TER CERCA DA METADE DA ESPESSURA DE UM CASCO CILÍNDRICO DE MESMO DIÂMETRO. POR OUTRO LADO, É DIFÍCIL DE CONSTRUIR E OCUPA MAIS ESPAÇO DEVIDO À SUA MAIOR ALTURA. É EMPREGADO PARA OS VASOS HORIZONTAIS EM GERAL, VASOS VERTICAIS DE DIÂMETRO MUITO GRANDE (10 M, OU MAIS), QUANDO AS CONDIÇÕES DE PROCESSO PERMITIREM, E TAMBÉM PARA VASOS PEQUENOS E MÉDIOS PARA ALTAS PRESSÕES, CASO EM QUE O TAMPO É DE CONSTRUÇÃO FORJADA INTEGRAL. PARA GRANDE DIÂMETRO ESSES TAMPÓS SÃO CONSTRUIDOS DE DIVERSAS PARTES

SOLDADAS ENTRE SI, INCLUINDO UMA CALOTA CENTRAL E VÁRIOS GOMOS EM SETORES ESFÉRICOS.

A PARTE UHT DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, REFERENTE A VASOS FABRICADOS COM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA, ADMITE TODOS OS TIPOS DE TAMPOS MENCIONADOS, EXIGINDO ENTRETANTO QUE OS TAMPOS TORIESFÉRICOS SEJAM CALCULADOS PARA UMA TENSÃO ADMISSÍVEL DE 1408 KG/CM<sup>2</sup> (138 MPa), QUANDO À TEMPERATURA AMBIENTE, DEVENDO-SE, PARA OUTRAS TEMPERATURAS, REDUZIR PROPORCIONALMENTE ESSE VALOR DE ACORDO COM A REDUÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

EMPREGAM-SE TAMBÉM OS TAMPOS COM O FORMATO DE UMA CALOTA ESFÉRICA, FABRICADOS DE CHAPA PRENSADA (**FIG. E**).

ESSES TAMPOS TÊM GERALMENTE A CALOTA SOLDADA A UM FLANGE APARAFUSADO, SENDO ASSIM FACILMENTE REMOVÍVEIS, É O TIPO TRADICIONALMENTE USADO PARA TAMPAS DE ESPELHOS FLUTUANTES DE TROCADORES DE CALOR.



**SOLDAGEM DE UM TAMPO HEMISFÉRICO**

### TAMPO CÔNICO

OS TAMPOS CÔNICOS, EMBORA FÁCEIS DE CONSTRUIR, SÃO POUCO USADOS POR SEREM BEM MENOS RESISTENTES DO QUE QUALQUER UM DOS ANTERIORES. O SEU EMPREGO LIMITA-SE PRATICAMENTE AO TAMPO INFERIOR DE VASOS EM QUE SEJA NECESSÁRIO O ESVAZIAMENTO RÁPIDO COMPLETO, OU QUE TRABALHEM COM FLUIDOS DIFÍCEIS DE ESCOAR (FLUIDOS VISCOSOS OU COM SÓLIDOS EM SUSPENSÃO, POR EXEMPLO). NOS TAMPOS CÔNICOS EXISTE ALGUMAS VEZES UMA CONCORDÂNCIA TOROIDAL NA LIGAÇÃO COM O CILINDRO. PARA TAMPOS CÔNICOS COM O SEMI-ÂNGULO NO VÉRTICE MAIOR DO QUE 30°, O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 EXIGE A CONCORDÂNCIA TOROIDAL, QUE PODE SER DISPENSADA SOMENTE QUANDO FOR FEITO UM ESTUDO ESPECIAL DE ANÁLISE DE TENSÕES.

EM QUALQUER UM DESSES TAMPOS MENCIONADOS, COM EXCEÇÃO DO CÔNICO, A LINHA DE CORTE PARA A SOLDA NO CASCO CILÍNDRICO DO VASO COSTUMA ESTAR A UMA CERTA DISTÂNCIA DA LINHA DE TANGÊNCIA (LT) ENTRE A SUPERFÍCIE CILÍNDRICA E O

TAMPO, ISTO É, COSTUMA HAVER, INTEGRAL COM O TAMPO, UM PEQUENO TRECHO CILÍNDRICO MESMO QUANDO NÃO É UMA EXIGÊNCIA DE NORMA.

O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII EXIGE ESSA SAIA CILÍNDRICA SEMPRE QUE A ESPESSURA DO TAMPO FORMA MAIOR DO QUE A ESPESSURA DO CASCO CILÍNDRICO A ELE LIGADO.



TAMPO CÔNICO EM UM TAMBOR DE COQUE

## TAMPO PLANO

EXISTE UMA GRANDE VARIEDADE DE TAMPÓS PLANOS, COMO MOSTRAM ALGUNS EXEMPLOS DA FIGURA 2.3 ABAIXO.

OS TIPOS (a) E (b) SÃO TAMPÓS NÃO REMOVÍVEIS PARA VASOS DE BAIXA PRESSÃO. O TIPO (c) TEM UM FLANGE CEGO APARAFUSADO REMOVÍVEL, E O TIPO (d) TAMBÉM É REMOVÍVEL MEDIANTE A RETIRADA DE UM ANEL ROSQUEADO NO CORPO CILÍNDRICO, QUE O MANTÉM NO LUGAR. OS TIPOS (e), (f) E (g) SÃO TAMPÓS FORJADOS, NÃO REMOVÍVEIS, PARA VASOS DE ALTA PRESSÃO. AS EXIGÊNCIAS DIMENSIONAIS DE ESPESSURAS, SOLDAS, DISTÂNCIAS, ETC, MOSTRADAS NA FIGURA 2.3, SÃO DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII.

EXCETO NOS CASOS EM QUE O FORMATO DO TAMPO DECORRE DE UMA EXIGÊNCIA DE SERVIÇO (COMO EM MUITOS CASOS DE TAMPÓS CÔNICOS INFERIORES), A ESCOLHA ENTRE OS DIVERSOS TIPOS É FEITA EM BASE ECONÔMICA, DEPENDENDO DO DIÂMETRO, PRESSÃO DE TRABALHO E RECURSOS DE FABRICAÇÃO.

DE UMA FORMA GERAL, OS TAMPÓS TORIESFÉRICOS, PRINCIPALMENTE OS DE “FALSA ELIPSE”, SÃO OS EMPREGADOS, NA MAIORIA DOS CASOS, PARA VASOS DE QUAISQUER DIÂMETROS.

OS TAMPOS ELÍPTICOS VERDADEIROS SÃO DE USO BASTANTE RARO NO BRASIL, DEVIDO À DIFICULDADE DE FABRICAÇÃO. OS TAMPOS PLANOS PODEM SER ECONÔMICOS PARA DIÂMETROS PEQUENOS (ATÉ 1M), PRINCIPALMENTE QUANDO O TAMPO TIVER QUE SER REMOVÍVEL.

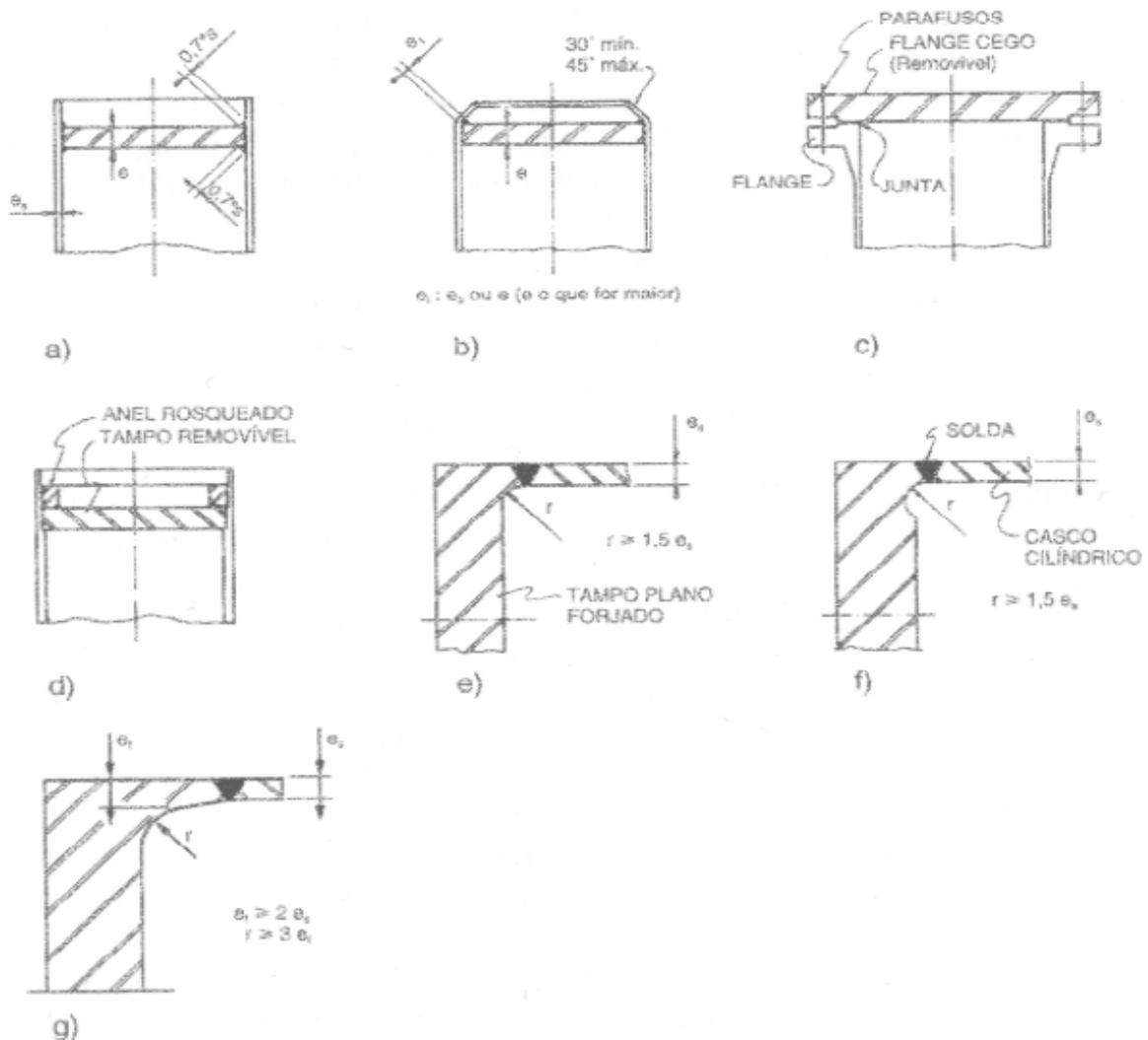


Fig. 2.3 Alguns tipos de tampos planos. (Baseada nas Figs. UG-34 e UW-13.3, do código ASME, Seção VIII, Divisão 1.)

**2.4.4 TRANSIÇÃO DE FORMA E DE ESPESSURA**

QUALQUER TRANSIÇÃO GEOMÉTRICA (FORMA E/ OU ESPESSURA) RESULTA EM UMA DISTRIBUIÇÃO IRREGULAR E CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO, EFEITOS ESSES QUE SERÃO TANTO MAIS GRAVES QUANTO MAIS FORTE FOR A MUDANÇA DE FORMA OU DE ESPESSURA. POR ESTE MOTIVO, OS CÓDIGOS DE PROJETO FAZEM UMA SÉRIE DE EXIGÊNCIAS DE MANEIRA A MINORAR ESTE EFEITO.

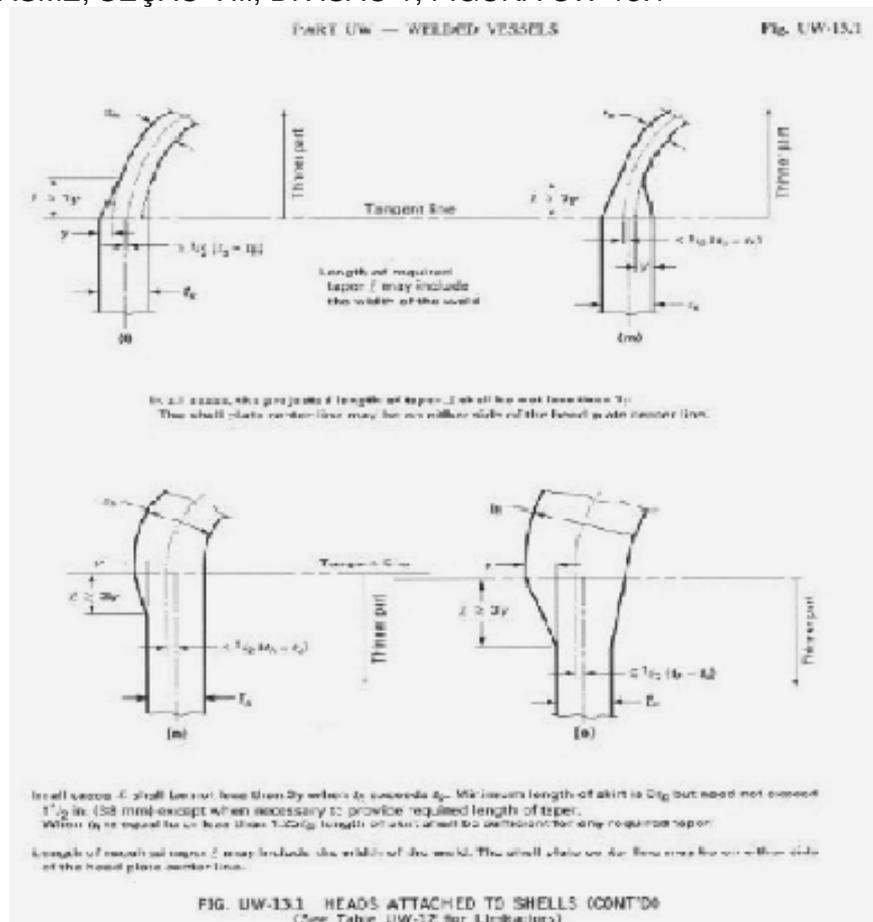
NA LIGAÇÃO DE UM CORPO CILÍNDRICO COM UM TAMPO HEMISFÉRICO DE MESMO DIÂMETRO, A TRANSIÇÃO DE FORMATO É MUITO PEQUENA, DESDE QUE HAJA TANGÊNCIA PERFEITA, PODE-SE ADMITIR QUE A CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES E A FLEXÃO NA PAREDE DO VASO ESTEJAM DENTRO DE LIMITES ACEITÁVEIS, NÃO SENDO NECESSÁRIO NEM EXIGIDO PELAS NORMAS NENHUM REFORÇO OU OUTRA PRECAUÇÃO ADICIONAL.

PARA A LIGAÇÃO DE UM CORPO CILÍNDRICO COM UM TAMPO ELÍPTICO OU TORIESFÉRICO, A TRANSIÇÃO DE FORMATO É MAIS FORTE, E POR ISSO MESMO EM GERAL EXISTE UMA PEQUENA SEÇÃO CILÍNDRICA INTEGRAL COM O TAMPO, ISTO É, UMA CERTA DISTÂNCIA ENTRE A LINHA DE TANGÊNCIA E A LINHA DE CORTE (OU DE SOLDA).

NA LIGAÇÃO DE UM CORPO CILÍNDRICO COM UM TAMPO ESFÉRICO, POR EXEMPLO, É EXIGIDO QUE A DIFERENÇA ENTRE AS BORDAS SEJA DE  $3y$  (VER FIGURA), DE TAL MANEIRA A SUAVIZAR A TRANSIÇÃO DE FORMA.

CONTUDO, DEVEMOS NOS LEMBRAR QUE ESTA TRANSIÇÃO DEVE SER FEITA DO LADO DO TAMPO ESFÉRICO, DE FORMA A GARANTIR A CONTINUIDADE DE ESPESSURA DO CASCO CILÍNDRICO.

EXTRAÍDO DO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, FIGURA UW-13.1



E  
N  
G<sup>o</sup>  
A  
L  
E  
X  
A  
N  
D  
R  
E  
M  
A  
R  
C  
H  
O  
N  
R  
E  
D  
D  
O

#### 2.4.5 ESPESSURAS DE CASCOS E DE TAMPOS

A ESPESSURA DA PAREDE DE PRESSÃO DE UM VASO DEVE SER, NO MÍNIMO, O MAIOR DOS DOIS SEGUINTE VALORES:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_c + C \\ e_s \end{array} \right.$$

EM QUE:

$e_c$  = ESPESSURA CALCULADA MÍNIMA NECESSÁRIA PARA RESISTIR À PRESSÃO (INTERNA OU EXTERNA) E DEMAIS CARREGAMENTOS ATUANTES SOBRE O VASO;

$C$  = MARGEM OU SOBRESPESSURA PARA CORROSÃO;

$e_s$  = ESPESSURA MÍNIMA DE RESISTÊNCIA ESTRUTURAL. ESTA ESPESSURA DESTINA-SE A GARANTIR A ESTABILIDADE ESTRUTURAL DO VASO, PARA PERMITIR A SUA MONTAGEM, E EVITAR O COLAPSO PELO PRÓPRIO PESO OU POR AÇÃO DO VENTO. A ESPESSURA DE RESISTÊNCIA ESTRUTURAL PODE PREVALECER SOBRE A ESPESSURA CALCULADA PARA OS VASOS DE DIÂMETRO MUITO GRANDE E PARA PRESSÕES MUITO BAIXAS. RECOMENDA-SE ADOPTAR PARA A ESPESSURA MÍNIMA ESTRUTURAL O VALOR DADO PELA SEGUINTE FÓRMULA, COM O MÍNIMO DE 4,0 MM;

$$e_s = 2,5 + 0,001 D_i + C$$

ONDE:

$D_i$  = DIÂMETRO INTERNO (mm) DA PARTE CONSIDERADA DO VASO.

LOGO, DEVERÁ SER ESCOLHIDO O **MAIOR VALOR** ENTRE:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,0 \text{ mm} \\ \text{OU} \\ e_s = 2,5 + 0,001 D_i + C \end{array} \right.$$



A MARGEM OU SOBRESPESSURA PARA CORROSÃO (*CORROSION ALLOWANCE*) É UM ACRÉSCIMO DE ESPESSURA DESTINADO A SER CONSUMIDO PELA CORROSÃO (OU EROSÃO) AO LONGO DA VIDA ÚTIL PREVISTA PARA O VASO. TEORICAMENTE ESSA ESPESSURA SERÁ PRODUTO DA TAXA ANUAL DE CORROSÃO (mm/ANO) PELO NÚMERO DE ANOS DE VIDA ÚTIL CONSIDERADA. É PRÁTICA USUAL ADOTAR-SE OS SEGUINTE VALORES DE MARGEM PARA CORROSÃO EM VASOS DE AÇO-CARBONO OU AÇOS DE BAIXA LIGA:

MEIOS POUCO CORROSIVOS: 1,5 mm;  
MEIOS MEDIANAMENTE CORROSIVOS (NORMAIS): 3,0 mm;  
MEIOS MUITO CORROSIVOS: 4,0 a 6,0 mm.

ESSES VALORES PODERÃO SER EMPREGADOS QUANDO NÃO FOR POSSÍVEL ESTABELECEM VALORES CONFIÁVEIS PARA A TAXA ANUAL DE CORROSÃO.

A MARGEM PARA CORROSÃO SÓ PODE SER DISPENSADA NOS CASOS EM QUE A CORROSÃO FOR RECONHECIDAMENTE NULA OU DESPREZÍVEL, OU QUANDO HOUVER UMA PINTURA OU OUTRO REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ADEQUADO.

O **CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1**, EXIGE AS SEGUINTE ESPESSURAS MÍNIMAS PARA AS PARTES DO VASO SUJEITAS A PRESSÃO:

- VASOS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA (PARTE UHT): 6,4 mm;
- VASOS PARA ÁGUA, VAPOR OU AR COMPRIMIDO (QQ MATERIAL): 2,4 mm;
- VASOS EM GERAL, NÃO INCLUÍDOS NOS CASOS ACIMA: 1,6 mm.

O **CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2**, EXIGE AS SEGUINTE ESPESSURAS MÍNIMAS PARA AS PARTES DO VASO SUJEITAS A PRESSÃO:

- PARTES EM AÇO-CARBONO OU AÇOS DE BAIXA LIGA: 6,4 mm;
- PARTES EM AÇOS INOXIDÁVEIS OU EM METAIS NÃO-FERROSOS: 3,2 mm

#### **2.4.5.1 ESPESSURAS NOMINAIS (COMERCIAIS)**

DEVEM SER ADOTADAS DE PREFERÊNCIA, COMO ESPESSURAS NOMINAIS (COMERCIAIS) OS SEGUINTE VALORES:

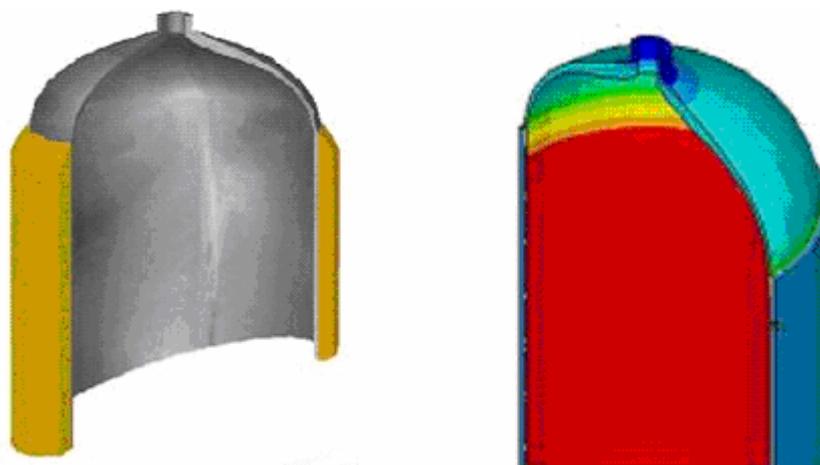
4,75 - 6,30 - 8,00 - 9,50 - 11,20 - 12,50 - 14,00 - 16,00 - 17,50 - 19,00 - 20,60 - 22,40 -  
23,60 - 25,00 - 28,60 - 31,50 - 34,90 - 37,50 - 41,30 - 44,40 - 47,50 - 50,00.

PARA ESPESSURAS SUPERIORES A 50,00 mm, DEVEM SER ADOTADOS VALORES INTEIROS EM MILÍMETROS. (DE ACORDO COM ASTM A-20)

## 2.5 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E DA CONSTRUÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO

COMO JÁ FOI DITO ANTERIORMENTE, A GRANDE MAIORIA DOS VASOS DE PRESSÃO SÃO EQUIPAMENTOS FEITOS POR ENCOMENDA, SOB MEDIDA, PARA ATENDEREM, EM CADA CASO, A DETERMINADOS REQUISITOS E ESPECIFICAÇÕES, SENDO BASTANTE RAROS OS CASOS EM QUE ESSES EQUIPAMENTOS SEJAM ITENS PADRONIZADOS DE LINHAS DE FABRICAÇÃO DE ALGUM FABRICANTE.

POR ESTE MOTIVO PRINCIPALMENTE, AS ETAPAS EM QUE SE DESENVOLVE O PROJETO, A FABRICAÇÃO E A MONTAGEM DOS VASOS DE PRESSÃO SÃO MAIS NUMEROSAS E MAIS COMPLEXAS, E DIFEREM BASTANTE DA ROTINA USUALMENTE SEGUIDAS PARA OUTRAS CLASSES DE MATERIAIS E DE EQUIPAMENTOS DE USO INDUSTRIAL, QUE, PELO CONTRÁRIO, SÃO NORMALMENTE ITENS DE LINHAS NORMAIS DE FABRICAÇÃO.



ANÁLISE COM MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DE UM VASO DE PRESSÃO

### 2.5.1 ETAPAS DO PROJETO E DA CONSTRUÇÃO

NO CASO MAIS GERAL, O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO PODEM COMPREENDER AS ETAPAS DESCRITAS A SEGUIR. A SEQUÊNCIA EM QUE ESSAS ETAPAS ESTÃO LISTADAS AQUI É A ORDEM CRONOLÓGICA USUALMENTE SEGUIDA, EMBORA NÃO OBRIGATÓRIA, PODENDO EM CERTOS CASOS, SER NECESSÁRIAS OU CONVENIENTES PEQUENAS ALTERAÇÕES NESSA ORDEM. EM MUITOS CASOS, PRINCIPALMENTE PARA VASOS DE PRESSÃO SIMPLES E DE BAIXA RESPONSABILIDADE, VÁRIAS DAS ETAPAS DESCRITAS A SEGUIR PODEM SER DISPENSADAS.

### **2.5.1.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS GERAIS DE PROJETO**

A DEFINIÇÃO DOS DADOS GERAIS DE PROJETO CONSISTE NA INFORMAÇÃO DE UMA SÉRIE DE DADOS RELATIVOS ÀS CONDIÇÕES LOCAIS, E NA DEFINIÇÃO DE PONTOS QUE ENVOLVEM DECISÃO OU PREFERÊNCIA DO USUÁRIO.

TODAS ESTAS INFORMAÇÕES IRÃO SERVIR DE BASE PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL ONDE FICARÁ O VASO EM QUESTÃO, E POR ESTE MOTIVO SÃO USUALMENTE APRESENTADAS EM CONJUNTO PARA TODO O PROJETO, E NÃO PARA CADA EQUIPAMENTO EM PARTICULAR.

É GERALMENTE NECESSÁRIO DEFINIR OS SEGUINTE DADOS BÁSICOS GERAIS:

- NORMAS QUE DEVEM SER ADOTADAS PARA O PROJETO E CONSTRUÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO, PODEM SER NORMAS OFICIAIS (DE SOCIEDADE DE NORMALIZAÇÃO NACIONAIS OU ESTRANGEIRAS), NORMAS DO USUÁRIO DO VASO, OU NORMAS DO FABRICANTE. AQUI NO BRASIL É OBRIGATÓRIO POR LEI QUE OS VASOS DE PRESSÃO OBEDEÇAM AO PRESCRITO NA NORMA NR-13, DO MINISTÉRIO DO TRABALHO,
- TEMPO DE VIDA ÚTIL MÍNIMO DESEJADO PARA O VASO,
- PREFERÊNCIA QUANTO A TIPOS DE VASOS E/OU SISTEMAS DE CONSTRUÇÃO (QUANDO HOVER),
- EXIGÊNCIA QUANTO A MATERIAIS, MINIMIZAR IMPORTAÇÕES, POR EXEMPLO (QUANDO HOVER),
- CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS LOCAIS,
- LIMITAÇÕES DE ÁREA DISPONÍVEL,
- DIMENSÕES E PESO MÁXIMO PARA TRANSPORTE,
- ALTITUDE DO LOCAL DE INSTALAÇÃO,
- DADOS SOBRE UTILIDADES DISPONÍVEIS (ÁGUA, VAPOR, ENERGIA ELÉTRICA, ETC)
- NÍVEIS MÁXIMOS DE RUÍDO E/OU POLUIÇÃO ADMITIDOS,
- DADOS DE SUBSOLO,
- CONDIÇÕES E FACILIDADE DE MONTAGEM NO LOCAL,

### **2.5.1.2 DEFINIÇÃO DOS DADOS DE PROCESSO (OU DE OPERAÇÃO) DO VASO**

ESSA ETAPA DO PROJETO CONSISTE NA DETERMINAÇÃO OU CÁLCULO DOS DADOS RELATIVOS AO DESEMPENHO OPERACIONAL DO VASO, DADOS ESSES QUE NORMALMENTE FIGURAM NOS FLUXOGRAMAS DE PROCESSO REFERENTES À INSTALAÇÃO DA QUAL O VASO FAZ PARTE.

ESSES DADOS INCLUEM-SE OS SEGUINTE:

- TIPO GERAL DO VASO DE PRESSÃO (TORRE DE FRACIONAMENTO, VASO DE ARMAZENAMENTO, REATOR, TROCADOR DE CALOR, ETC)

- NATUREZA, PROPRIEDADES (COMPOSIÇÃO QUÍMICA, CONCENTRAÇÃO, DENSIDADE, IMPUREZAS E CONTAMINANTES PRESENTES, 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, VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS POSSÍVEIS E RESPECTIVAS VARIAÇÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO, QUANDO FOR O CASO),
- VOLUME ARMazenado, OU TEMPO DE RESIDÊNCIA NECESSÁRIO, (NO CASO DE VASOS QUE APRESENTEM NÍVEL LIVRE DE LÍQUIDOS, É NECESSÁRIO AINDA INDICAR A POSIÇÃO NORMAL DE REGIME E AS POSIÇÕES EXTREMAS DESSE NÍVEL), PARA OS EQUIPAMENTOS DE TROCA DE CALOR, OS DADOS DE PROCESSO DEVEM AINDA INCLUIR AS SEGUINTEs INFORMAÇÕES QUE SE APLICAREM:
  - CARGA TÉRMICA, TEMPERATURA, VISCOSIDADE E PESO MOLECULAR DOS FLUIDOS (CONDIÇÕES DE ENTRADA E DE SAÍDA), COEFICIENTE DE DEPÓSITO, PERDA DE CARGA MÁXIMA ADMITA.

### 2.5.1.3 PROJETO DE PROCESSO DO VASO

O PROJETO DE PROCESSO DO VASO TAMBÉM CHAMADO DE “PROCESSO ANALÍTICO”, CONSISTE BASICAMENTE NA DETERMINAÇÃO OU NO CÁLCULO DAS DIMENSÕES GERAIS DO EQUIPAMENTO (QUE INTERFERIRAM NO SEU FUNCIONAMENTO), E NA DEFINIÇÃO DE TODOS OS DETALHES DO PRÓPRIO EQUIPAMENTO OU DAS PEÇAS INTERNAS (QUE TAMBÉM INTERFERIRAM NO FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO), TUDO COM BASE NOS DADOS DE PROCESSO.

\* O PROJETO DE PROCESSO DOS VASOS DE PRESSÃO E O PROJETO TÉRMICO DOS TROCADORES DE CALOR SÃO GERALMENTE ATRIBUIÇÕES DO ENGENHEIRO QUÍMICO.

ENTRE AS INFORMAÇÕES QUE FAZEM PARTE DO PROJETO DE PROCESSO INCLUEM-SE:

- FORMATO DO VASO (CILÍNDRICO, ESFÉRICO, CILÍNDRICO COMPOSTO, ETC),
- DIMENSÕES GERAIS (DIÂMETROS E COMPRIMENTOS),
- TIPO DE TAMPOS (ELÍPTICO, CÔNICO, PLANO, ETC),
- POSIÇÃO DE INSTALAÇÃO (VERTICAL, HORIZONTAL, INCLINADA),
- PRESSÃO E TEMPERATURA DO PROJETO,
- DIÂMETRO NOMINAL DE TODOS OS BOCAIS LIGADOS A TUBULAÇÕES,
- POSIÇÃO E ELEVAÇÃO DOS BOCAIS ( SOMENTE QUANDO INTERFEREM COM O FUNCIONAMENTO),
- TIPO, LOCALIZAÇÃO, FORMATO, DIMENSÕES GERAIS, ESPAÇAMENTO E DETALHES DE PEÇAS INTERNAS (BANDEJAS, VERTEDOUROS, GRADES, RECHEIOS, DEFLETORES, CHICANAS, QUEBRA-VÓRTICES, DISTRIBUIDORES, DESNEBULIZADORES, SERPENTINAS, ETC.),

- ELEVAÇÃO NECESSÁRIA DO VASO (SOMENTE QUANDO INTERFERIR COM O FUNCIONAMENTO),
- INDICAÇÃO DOS BOCAIS PARA TODOS OS INSTRUMENTOS LIGADOS AO EQUIPAMENTO,
- NECESSIDADE OU NÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO, REVESTIMENTO REFRAATÁRIO, OU OUTRO QUALQUER REVESTIMENTO INTERNO OU EXTERNO, E FINALIDADE DO ISOLAMENTO OU DO REVESTIMENTO,
- EXIGÊNCIA DE NÃO-CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO CONTIDO (QUANDO FOR O CASO),
- EXIGÊNCIAS ESPECIAIS, OU NÃO USUAIS, QUANTO AO TRANSPORTE, MONTAGEM, DESMONTAGEM, MANUTENÇÃO, VISITA, INSPEÇÃO OU REMOÇÃO DE PEÇAS INTERNAS,
- INSTRUÇÕES PARA CONDICIONAMENTO DO EQUIPAMENTO PARA A PARTIDA (LIMPEZA ESPECIAL, POR EXEMPLO), QUANDO FOR O CASO.

EM MUITOS CASOS INCLUI-SE TAMBÉM NO PROJETO DO PROCESSO A INDICAÇÃO BÁSICA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DO VASO, BEM COMO DOS MATERIAIS DE PEÇAS INTERNAS E DE REVESTIMENTOS INTERNOS, QUANDO EXISTENTES. NOTE-SE QUE NÃO SE TRATA DE ESPECIFICAÇÃO COMPLETA DE MATERIAIS, QUE É SEMPRE PARTE DO PROJETO MECÂNICO. NO PROJETO DE PROCESSO, O QUE MUITAS VEZES SE FAZ É A INDICAÇÃO BÁSICA, DIZENDO-SE SIMPLEMENTE, POR EXEMPLO, AÇO-CARBONO OU AÇO INOXIDÁVEL, SEM CONTUDO ESPECIFICAR COMPLETAMENTE O MATERIAL. O PROJETO DE PROCESSO RESULTA NO DESENHO DE PROCESSO DO VASO, QUE SÃO DESENHOS ESQUEMÁTICOS, SEM ESCALA, QUE SÃO USUALMENTE FEITOS PARA VASOS DE PRESSÃO EM GERAL.

#### **2.5.1.4 PROJETO TÉRMICO**

O PROJETO TÉRMICO (QUE É APLICÁVEL SOMENTE AOS EQUIPAMENTOS DE TROCA TÉRMICA) CONSISTE NO CÁLCULO OU NA DEFINIÇÃO DOS SEGUINTE DADOS QUE SE APLICAREM A CADA CASO:

- TIPO DO EQUIPAMENTO,
- ÁREAS DE TROCA DE CALOR E DIMENSÕES GERAIS DO EQUIPAMENTO,
- NÚMERO E ARRANJO DE CASCOS (QUANDO MAIS DE UM), NÚMERO DE PASSAGENS
- QUANTIDADE, ARRANJO E ESPAÇAMENTO DE TUBOS, ESPELHOS, SERPENTINAS,
- TIPO DOS TUBOS DE TROCA TÉRMICA (LISOS, ALETADOS, ETC.), BEM COMO DIÂMETRO E ESPESSURA DESSES TUBOS,
- QUANTIDADE, TIPO, ARRANJO E ESPAÇAMENTO DE CHICANAS, DEFLETORES E OUTRAS PEÇAS INTERNAS.

#### **2.5.1.5 PROJETO MECÂNICO**

O PROJETO MECÂNICO INCLUI A DEFINIÇÃO OU O CÁLCULO DOS SEGUINTE DADOS REFERENTES AO VASO:

- SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO COMPLETA DE TODOS OS MATERIAIS DO VASO (CASCO E TAMPOS) E DE TODAS AS SUAS PARTES ACESSÓRIAS, TAIS COMO FLANGES, PESCOÇOS DE BOCAIS, SUPORTES, ESPELHOS, TUBOS INTERNOS, OUTRAS PEÇAS INTERNAS E EXTERNAS, PARAFUSOS, JUNTAS, ETC,



- DEFINIÇÃO DA NECESSIDADE OU NÃO DE MARGENS PARA CORROSÃO E OUTROS FINS, BEM COMO OS VALORES DESSAS ESPESSURAS, DEFINIÇÃO TAMBÉM DA NECESSIDADE OU NÃO DE QUAISQUER REVESTIMENTOS INTERNOS OU PINTURAS ESPECIAIS, E ESPECIFICAÇÃO DESSES REVESTIMENTOS, TODOS OS MATERIAIS;

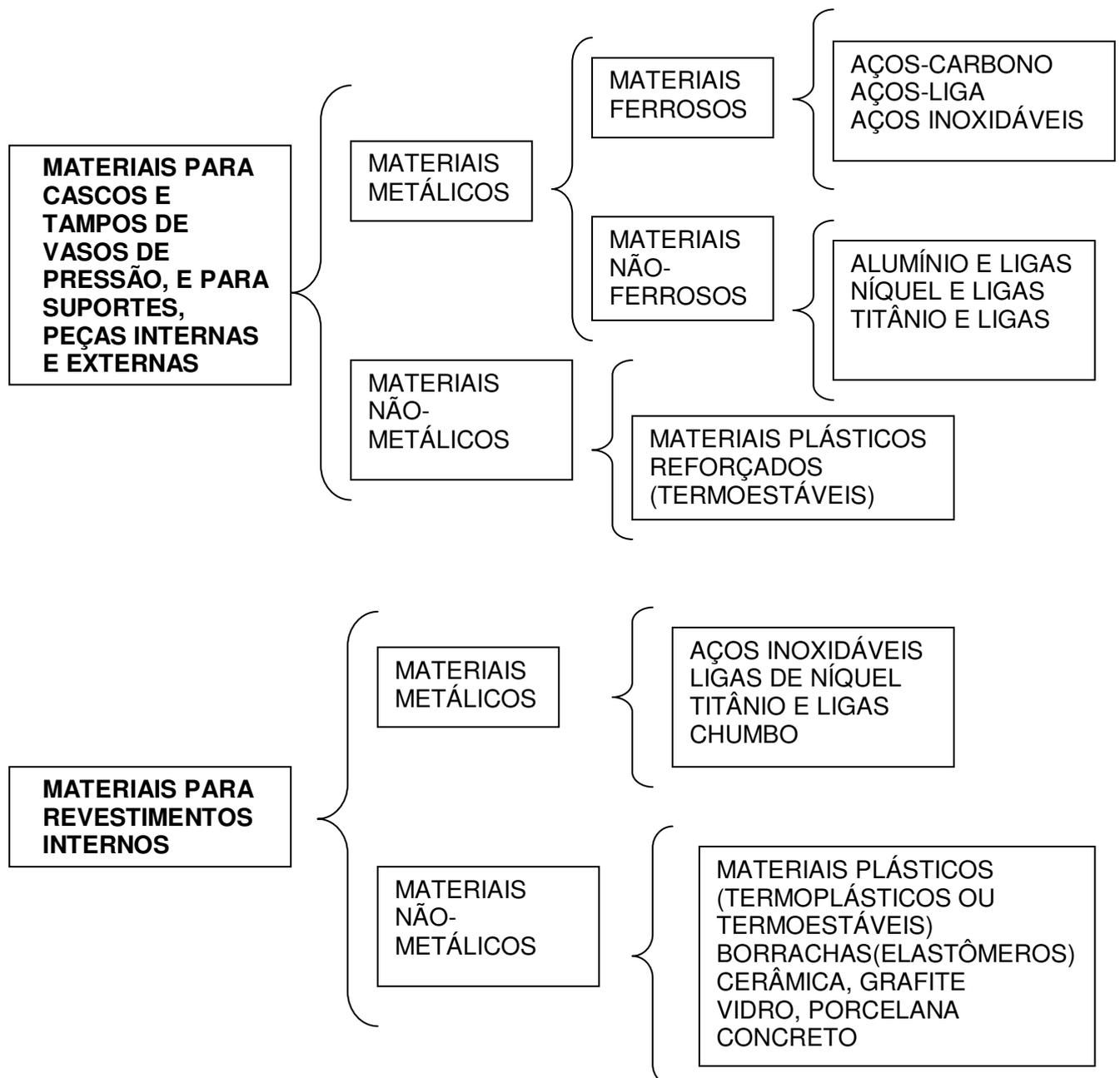
DEVEM SER DEFINIDOS PELA CITAÇÃO DE UMA ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL DE UMA SOCIEDADE DE NORMALIZAÇÃO RECONHECIDA, INDICANDO-SE, QUANDO FOR O CASO, A CLASSE, TIPO, OU GRAU DO MATERIAL,

- DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES FINAIS DO VASO (BASEADAS NAS DIMENSÕES GERAIS DO PROJETO DE PROCESSO),
- SELEÇÃO DO TIPO DE TAMPOS, SE NÃO FOR DEFINIDO POR EXIGÊNCIA DO PROCESSO,
- DEFINIÇÃO DAS NORMAS DE PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSPEÇÃO QUE DEVAM SER EMPREGADAS,
- DEFINIÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE SOLDAS E DO TIPO E GRAU DE INSPEÇÃO DAS SOLDAS,
- CÁLCULO MECÂNICO (ESTRUTURAL) COMPLETO DO VASO, INCLUINDO AS ESPESSURAS DE TODAS AS PARTES DE PRESSÃO DO VASO, BEM COMO DE REFORÇOS, FLANGES ESPECIAIS, ESPELHOS, PEÇAS INTERNAS E EXTERNAS,
- DIMENSÕES E ESPESSURAS DAS CHAPAS DE BASE DAS SAIA, COLUNAS, BERÇOS OU OUTROS SUPORTES DO VASO,
- POSIÇÃO COTADA, TIPO E DIÂMETRO DE TODOS OS PARAFUSOS CHUMBADORES,
- DEFINIÇÃO DAS POSIÇÕES FINAIS (ELEVAÇÃO E ORIENTAÇÃO) DE BOCAIS, BOCAS DE VISITA, INSTRUMENTOS, PEÇAS INTERNAS E EXTERNAS (INTERFACE COM A EQUIPE DE PROJETO DE TUBULAÇÕES),
- CÁLCULO DA PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL (PMTA) E DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO,
- CÁLCULO DOS PESOS APROXIMADOS DO VASO QUANDO VAZIO, EM OPERAÇÃO, EM PARADA E EM TESTE HIDROSTÁTICO,
- DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRANSPORTE DO VASO (VASO TRANSPORTADO INTEIRO OU EM SEÇÕES),
- DESENHO MECÂNICO COMPLETO DO VASO, INCLUINDO TODOS OS SEUS ACESSÓRIOS E DETALHES,
- DIAGRAMA DE CARGAS SOBRE AS FUNDAÇÕES,
- ESPECIFICAÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS, QUANDO DIFERENTES OU ALÉM DO EXIGIDO EM NORMA,
- SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO, DOS TIPOS DE SUPORTE DO ISOLAMENTO TÉRMICO E DISTÂNCIA ENTRE ESTES SUPORTES,

- ESPECIFICAÇÃO DE SOLDAGEM(EPS),
- VERIFICAÇÃO DE TENSÕES DEVIDO A CARGAS LOCALIZADAS OU À FADIGA,
- CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS DEVIDO À DILATAÇÃO TÉRMICA DO VASO,
- CÁLCULO DAS FORÇAS E MOMENTOS MÁXIMOS ADMISSÍVEIS SOBRE OS BOCAIS DO VASO.

## 2.6 MATERIAIS PARA VASOS DE PRESSÃO

MUITOS MATERIAIS PODEM SER EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO E DE SEUS COMPONENTES, SENDO AS SEGUINTE AS PRINCIPAIS CLASSES DESSES MATERIAIS:





DE TODOS ESSES MATERIAIS O AÇO-CARBONO É O DE MAIOR USO E EMPREGADO NA CONSTRUÇÃO DA GRANDE MAIORIA DOS VASOS DE PRESSÃO. O AÇO CARBONO É DENOMINADO “MATERIAL DE USO GERAL”, PORQUE, AO CONTRÁRIO DOS OUTROS MATERIAIS, NÃO TEM CASOS ESPECÍFICOS DE EMPREGO, SENDO USADO EM TODOS OS CASOS, EXCETO QUANDO ALGUMA CIRCUNSTÂNCIA NÃO PERMITIR O SEU EMPREGO. TODOS OS DEMAIS MATERIAIS SÃO EMPREGADOS JUSTAMENTE NESSES CASOS EM QUE, POR QUALQUER MOTIVO, NÃO É POSSÍVEL O USO DO AÇO CARBONO.

A RAZÃO DISSO É QUE O AÇO CARBONO, ALÉM DE SER UM MATERIAL DE BOA CONFORMABILIDADE, BOA SOLDABILIDADE, DE FÁCIL OBTENÇÃO E ENCONTRÁVEL SOB TODAS AS FORMAS DE APRESENTAÇÃO, É O MATERIAL DE MENOR PREÇO EM RELAÇÃO À SUA RESISTÊNCIA MECÂNICA. PARA EXEMPLIFICAR A ENORME PREDOMINÂNCIA DO AÇO CARBONO, PODE-SE DIZER QUE EM UMA REFINARIA DE PETRÓLEO CONVENCIONAL O AÇO CARBONO CORRESPONDE A CERCA DE 95% DO PESO TOTAL DOS EQUIPAMENTOS DE PROCESSO.

É IMPORTANTE OBSERVAR QUE TODOS OS MATERIAIS, METÁLICOS OU NÃO, EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO DEVEM TER SUAS PROPRIEDADES PERFEITAMENTE CONHECIDAS E GARANTIDAS, E, POR ISSO, SÓ SÃO USUALMENTE ADMITIDOS OS MATERIAIS QUE OBEDEÇAM A ALGUMA ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL. ESSAS ESPECIFICAÇÕES SÃO DOCUMENTOS NORMATIVOS EMITIDOS POR SOCIEDADES DE NORMALIZAÇÃO RECONHECIDAS, PÚBLICAS OU PARTICULARES, OU POR ALGUNS FABRICANTES, CONTENDO GERALMENTE AS SEGUINTE INFORMAÇÕES E EXIGÊNCIAS:

DESCRIÇÃO E FINALIDADES DO MATERIAL, COMPOSIÇÃO QUÍMICA, PROPRIEDADES MECÂNICAS, ENSAIOS E TESTES EXIGIDOS OU RECOMENDADOS, CONDIÇÕES DE ACEITAÇÃO, REJEIÇÃO E MARCAÇÃO DO MATERIAL, PODERÃO AINDA CONTER DADOS DIMENSIONAIS, PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS, EXIGÊNCIAS SUPLEMENTARES OPCIONAIS, ETC. CADA ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL É DESIGNADA POR UMA SIGLA NUMÉRICA OU ALFANUMÉRICA QUE SERVE TAMBÉM COMO DESIGNAÇÃO DOS MATERIAIS POR ELA DEFINIDOS.

A MAIORIA DAS ESPECIFICAÇÕES DE MATERIAL ABRANGE NÃO APENAS UM ÚNICO MATERIAL, MAS UM GRUPO DE MATERIAIS, QUE SE DISTINGUEM ENTRE SI POR “CLASSES” OU “GRAUS” DA ESPECIFICAÇÃO, POR ESTE MOTIVO, PARA ESPECIFICAR CORRETAMENTE UM MATERIAL, NÃO BASTA CITAR A SIGLA DA ESPECIFICAÇÃO, MAS TAMBÉM, A CLASSE OU GRAU DO MATERIAL, BEM COMO AS EXIGÊNCIAS OPCIONAIS QUE FOREM EXIGIDAS, QUANDO FOR O CASO.

TODAS AS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO FAZEM EXIGÊNCIAS E RESTRIÇÕES QUANTO AOS MATERIAIS QUE PODEM SER EMPREGADOS. O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 e 2, SÓ PERMITE QUE SEJAM EMPREGADOS PARA AS PARTES PRESSURIZADAS DOS VASOS (PARÁGRAFOS UG-4 e AM-100) OS MATERIAIS QUE CONSTAM NAS TABELAS DE TENSÕES ADMISSÍVEIS DA NORMA.

O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2 (ARTIGO M-2), FAZ AINDA ALGUMAS EXIGÊNCIAS ADICIONAIS QUANTO AOS ENSAIOS DE MATERIAIS E À RETIRADA DE CORPOS DE PROVA PARA ESSES ENSAIOS.

### 2.6.1 O PROBLEMA GERAL DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

A SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS ADEQUADOS PARA CADA SERVIÇO É FREQUENTEMENTE UM DOS PROBLEMAS MAIS DIFÍCEIS COM QUE SE CONFRONTA O PROJETISTA DE VASOS DE PRESSÃO. INDICAMOS A SEGUIR OS PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM A SELEÇÃO DE UM MATERIAL, EM ALGUNS CASOS, ENTRETANTO, PODERÁ HAVER OUTROS FATORES DETERMINANTES DESTA SELEÇÃO.

#### ➤ FLUIDO CONTIDO

DEVEM SER CONSIDERADOS OS SEGUINTE ASPECTOS RELATIVOS AO FLUIDO (OU AOS FLUIDOS) CONTIDO NO VASO: NATUREZA E CONCENTRAÇÃO DO FLUIDO, IMPUREZAS E CONTAMINANTES PRESENTES, EXISTÊNCIA OU NÃO DE GASES DISSOLVIDOS E DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO, TEMPERATURA, PH, CARÁTER OXIDANTE OU REDUTOR, FLAMABILIDADE, PONTO DE FULGOR, TOXIDEZ, EXPLOSIVIDADE OU OUTROS EFEITOS DELETÉRIOS DO FLUIDO, ATAQUE CORROSIVO AOS MATERIAIS, POSSIBILIDADE DE CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO PELOS RESÍDUOS DA CORROSÃO, MÁXIMO TOLERÁVEL DESSA CONTAMINAÇÃO (CONSEQÜÊNCIAS SOBRE A COR, O GOSTO, A TOXIDEZ OU SOBRE OUTRAS PROPRIEDADES DO FLUIDO).

#### ➤ CONDIÇÕES DE SERVIÇO (PRESSÃO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO)

O MATERIAL TEM DE SER CAPAZ DE RESISTIR À PRESSÃO EM TODA FAIXA POSSÍVEL DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA. É IMPORTANTE OBSERVAR QUE TODOS OS FATORES RELATIVOS AO SERVIÇO (FLUIDOS CONTIDOS, COM SUAS PRESSÕES, TEMPERATURA, PROPRIEDADES ETC) SÃO EM GERAL VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO, ISTO É, TEM-SE, FREQUENTEMENTE, UMA SÉRIE DE VALORES CONSIDERADOS NORMAIS, OU DE REGIME, E UMA FAIXA, ÀS VEZES AMPLA, DE VARIAÇÃO DESSOS VALORES, INCLUSIVE PARA CONDIÇÕES ANORMAIS OU EVENTUAIS QUE POSSAM OCORRER. INTERESSA, PORTANTO, PARA TODOS OS FATORES, CONHECER OS VALORES DE REGIME E TAMBÉM OS EXTREMOS, EM MUITOS CASOS, PODE AINDA SER NECESSÁRIO CONHECER A PROBABILIDADE E DURAÇÃO DE OCORRÊNCIA DESSOS EXTREMOS. NOTE-SE TAMBÉM QUE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS MATERIAIS, BEM COMO AS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS, SOFREM GRANDES VARIAÇÕES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.

#### ➤ NÍVEL DE TENSÕES NO MATERIAL

O MATERIAL DEVE RESISTIR AOS ESFORÇOS SOLICITANTES E, POR ISSO, A SUA RESISTÊNCIA MECÂNICA DEVE SER COMPATÍVEL COM O NÍVEL DE TENSÕES QUE SE TENHA, ISTO É, COM A ORDEM DE GRANDEZA DOS ESFORÇOS PRESENTES. PARA QUE AS ESPESSURAS SEJAM RAZOÁVEIS, DENTRO DOS LIMITES DE FABRICAÇÃO NORMAL, É NECESSÁRIO QUE SEJAM EMPREGADOS MATERIAIS DE GRANDE RESISTÊNCIA QUANDO OS ESFORÇOS FOREM GRANDES E VICE-VERSA. DEVE-SE OBSERVAR QUE EM QUALQUER VASO EXISTEM FREQUENTEMENTE NUMEROSOS ESFORÇOS ALÉM DA PRESSÃO INTERNA (QUE ÀS VEZES NÃO É O ESFORÇO PREDOMINANTE).

➤ **NATUREZA DOS ESFORÇOS MECÂNICOS**

INDEPENDENTEMENTE DO NÍVEL DE TENSÕES, A NATUREZA DOS ESFORÇOS EXISTENTES (TRAÇÃO, COMPRESSÃO, FLEXÃO, ESFORÇOS ESTÁTICOS OU DINÂMICOS, CHOQUES, VIBRAÇÕES ETC.), TAMBÉM CONDICIONA A ESCOLHA DO MATERIAL. OS MATERIAIS FRÁGEIS, POR EXEMPLO, NÃO DEVEM SER UTILIZADOS QUANDO OCORREREM ESFORÇOS DINÂMICOS, CHOQUES OU ALTAS CONCENTRAÇÕES DE TENSÕES.

➤ **CUSTO DO MATERIAL**

É EVIDENTE UM FATOR IMPORTANTÍSSIMO E FREQUENTEMENTE O DECISIVO NA ESCOLHA. PARA CADA APLICAÇÃO PRÁTICA EXISTEM QUASE SEMPRE VÁRIOS MATERIAIS POSSÍVEIS, O MELHOR SERÁ O QUE FOR MAIS ECONÔMICO. PARA A DECISÃO DE QUAL O MATERIAL MAIS ECONÔMICO, DEVE SER CONSIDERADO NÃO SÓ O CUSTO DIRETO DO MATERIAL, COMO TAMBÉM UMA SÉRIE DE OUTROS FATORES: CUSTO DE FABRICAÇÃO, TEMPO DE VIDA ÚTIL, CUSTO DE PARALISAÇÃO E DE REPOSIÇÃO DO EQUIPAMENTO, ETC. POR EXEMPLO, O CUSTO POR QUILO DE UM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO TIPO 304 É APROXIMADAMENTE 2,7 VEZES SUPERIOR AO CUSTO DE UM AÇO-LIGA 1 ¼ Cr – ½ Mo, ENTRETANTO, A CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO EM AÇO TIPO 304 PODE RESULTAR MAIS ECONÔMICA DO QUE EM AÇO-LIGA, PORQUE A SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL É MUITO MAIS FÁCIL, ALÉM DE SEREM DESNECESSÁRIOS OS TRATAMENTOS TÉRMICOS.

➤ **SEGURANÇA**

QUANDO O RISCO POTENCIAL DO VASO OU DO LOCAL ONDE O MESMO SE ENCONTRA FOR GRANDE, OU, AINDA, QUANDO O EQUIPAMENTO FOR ESSENCIAL AO FUNCIONAMENTO DE UMA INSTALAÇÃO IMPORTANTE, HÁ A NECESSIDADE DO EMPREGO DE MATERIAIS QUE OFEREÇAM O MÁXIMO DE SEGURANÇA, DE FORMA A EVITAR A OCORRÊNCIA DE RUPTURAS, VAZAMENTOS OU OUTROS ACIDENTES QUE POSSAM RESULTAR EM CUSTOSAS PARALISAÇÕES OU MESMO EM DESASTRES. SÃO FREQUENTES OS CASOS DE EQUIPAMENTOS ESSENCIAIS AO FUNCIONAMENTO DE TODA UMA INSTALAÇÃO QUE PODERÁ SER TOTALMENTE PARALISADA POR QUALQUER FALHA OU PROBLEMA COM O EQUIPAMENTO.

➤ **FORMA DE APRESENTAÇÃO DO MATERIAL**

AS MATÉRIAS-PRIMAS NECESSÁRIAS PARA A FABRICAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO (OU DE SUAS PARTES) PODEM SE APRESENTAR DE VÁRIAS FORMAS, DEPENDENDO DO TIPO DO EQUIPAMENTO OU DA PARTE A SER FABRICADA: CHAPAS GROSSAS, CHAPAS FINAS, TUBOS PARA CONDUÇÃO, TUBOS PARA TROCA DE CALOR, FORJADOS, FUNDIDOS, ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÃO, ETC. NA PRÁTICA, MUITOS DOS MATERIAIS NÃO SÃO ENCONTRADOS NO COMÉRCIO SOB TODAS AS FORMAS DE APRESENTAÇÃO. POR ESSE MOTIVO, DEPENDENDO DA FORMA DESEJADA DA MATÉRIA-PRIMA, ALGUNS MATERIAIS DEVEM SER PRELIMINARMENTE ELIMINADOS, PARA OS QUAIS A FORMA NECESSÁRIA NÃO EXISTA OU SEJA, DE MUITO DIFÍCIL OBTENÇÃO.

➤ **FACILIDADES DE FABRICAÇÃO E DE MONTAGEM**

TODOS OS MATERIAIS TÊM DETERMINADAS LIMITAÇÕES QUANTO ÀS POSSIBILIDADES DE FABRICAÇÃO E DE MONTAGEM. POR ESSA RAZÃO, INDEPENDENTEMENTE DE OUTRAS CONSIDERAÇÕES, O TIPO E O TAMANHO DA PEÇA OU DO VASO JÁ EXCLUEM O EMPREGO DE DETERMINADOS MATERIAIS, COM OS QUAIS NÃO SEJA POSSÍVEL OU NÃO SEJA ECONÔMICO FABRICAR OU MONTAR O VASO EM QUESTÃO. SOBRE ESSE ASSUNTO DEVEM AINDA SER CONSIDERADAS A SOLDABILIDADE, A USINABILIDADE, E A FACILIDADE DE CONFORMAÇÃO DO MATERIAL. SOLDABILIDADE NÃO É APENAS A POSSIBILIDADE DO EMPREGO DE SOLDA, MAS TAMBÉM A MAIOR OU MENOR DIFICULDADE DE SOLDAGEM E A NECESSIDADE OU NÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS E DE OUTROS CUIDADOS ESPECIAIS.

➤ **TEMPO DE VIDA PREVISTO**

O TEMPO DE DURAÇÃO MÍNIMO DO MATERIAL TEM DE SER COMPATÍVEL COM O TEMPO DE VIDA ÚTIL PREVISTO PARA O VASO OU PARA A PEÇA. O TEMPO DE VIDA ÚTIL DEPENDE DA NATUREZA DA APLICAÇÃO (EQUIPAMENTO PRINCIPAL OU SECUNDÁRIO, PEÇA DE REPOSIÇÃO, ETC.), DA IMPORTÂNCIA DO EQUIPAMENTO, DO TEMPO DE AMORTIZAÇÃO DO INVESTIMENTO E DO TEMPO PREVISÍVEL DE OBSOLESCÊNCIA DO EQUIPAMENTO OU DA INSTALAÇÃO.

➤ **EXPERIÊNCIA PRÉVIA**

A DECISÃO POR UM DETERMINADO MATERIAL OBRIGA SEMPRE A QUE SE CONSIDERE A EXPERIÊNCIA PRÉVIA QUE POSSA EXISTIR COM ESSE MATERIAL NO MESMO SERVIÇO. EM CASOS IMPORTANTES É, EM GERAL, MUITO ARRISCADO DECIDIR-SE POR UM MATERIAL PARA O QUAL NÃO EXISTA NENHUMA ESPECIFICAÇÃO ANTERIOR EM SERVIÇO SEMELHANTE.

➤ **FACILIDADE DE OBTENÇÃO DO MATERIAL**

DEVEM SER CONSIDERADAS A MAIOR OU MENOR FACILIDADE DE OBTENÇÃO DOS DIVERSOS MATERIAIS POSSÍVEIS, A NECESSIDADE OU NÃO DE IMPORTAÇÃO, OS PRAZOS DE ENTREGA, EXISTÊNCIA DE ESTOQUES, QUANTIDADE MÍNIMA DE COMPRAS, ETC.

➤ **VARIAÇÕES TOLERADAS DE FORMA OU DIMENSÕES DA PEÇA**

PARA A MAIORIA DOS VASOS DE PRESSÃO PODEM SER TOLERADAS VARIAÇÕES RELATIVAMENTE GRANDES NAS DIMENSÕES (DA ORDEM DE 1% OU ÀS VEZES MAIS), SEM QUE HAJA PREJUÍZO PARA O FUNCIONAMENTO, PODENDO, PORTANTO, SER SELECIONADOS MATERIAIS CAPAZES DE SOFRER TAIS VARIAÇÕES POR EFEITO DE DEFORMAÇÕES MECÂNICAS, DILATAÇÕES, DESGASTE POR CORROSÃO, ETC. EXISTEM, ENTRETANTO, ALGUMAS PEÇAS EM QUE ESSAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS NÃO PODEM SER ADMITIDAS, POR MOTIVO DE AJUSTAGEM MECÂNICA, VEDAÇÃO, PEÇAS DESMONTÁVEIS, PEÇAS EM MOVIMENTO, ETC, DEVENDO POR ISSO O MATERIAL SELECIONADO APRESENTAR MAIOR ESTABILIDADE DIMENSIONAL.

PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA ESCOLHA DOS MATERIAIS, A EXPERIÊNCIA DO PROJETISTA (OU DA ORGANIZAÇÃO DE PROJETOS) É INDISPENSÁVEL E INSUBSTITUÍVEL. SÓ A EXPERIÊNCIA PASSADA, RESULTANTE DO ACÚMULO DE INFORMAÇÕES E DE SOLUÇÕES ADOTADAS EM CASOS ANTERIORES, É CAPAZ DE JULGAR, COM OBJETIVIDADE E SEGURANÇA, O GRAU DE INFLUÊNCIA DE CADA UM DESTES FATORES MENCIONADOS.

### 2.6.2 ACOS-CARBONO

DEFINIÇÃO E PROPRIEDADES: LIGA DE Fe E 0,05 A 1,5 % DE C, COM LIMITE DE RESISTÊNCIA EM TEMPERATURA AMBIENTE DE 314 A 647 MPa E LIMITE DE ESCOAMENTO DE 167 A 274 MPa E ALONGAMENTO DE 18 A 35 %.

O AÇO-CARBONO É O “MATERIAL DE USO GERAL” PARA VASOS DE PRESSÃO, QUE POR ESTE MOTIVO É EMPREGADO PARA A CONSTRUÇÃO DA MAIORIA DOS VASOS DE PRESSÃO E DE SEUS COMPONENTES.

AS PROPRIEDADES DO AÇO-CARBONO SÃO GRANDEMENTE INFLUENCIADAS POR SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PELA TEMPERATURA.

O AUMENTO NA QUANTIDADE DE CARBONO NO AÇO PRODUZ BASICAMENTE UM AUMENTO NOS LIMITES DE RESISTÊNCIA E DE ESCOAMENTO E NA DUREZA E TEMPERABILIDADE DO AÇO, EM COMPENSAÇÃO, ESSE AUMENTO PREJUDICA BASTANTE A DUCTILIDADE E A SOLDABILIDADE DO AÇO. EMBORA SEJA DIFÍCIL ESTABELECEM-SE LIMITES RÍGIDOS PARA O TEOR DE CARBONO, SÃO USUAIS OS SEGUINTE VALORES COMO MÁXIMOS RECOMENDÁVEIS EM AÇOS PARA VASOS DE PRESSÃO:

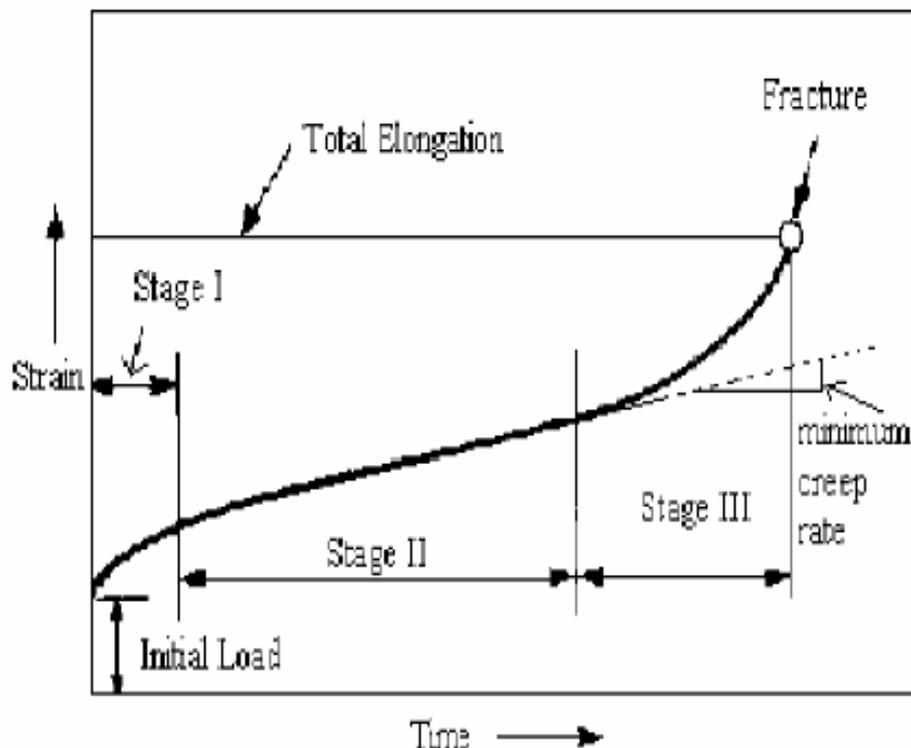
- PARTES SOLDADAS SUJEITAS À PRESSÃO OU A OUTROS ESFORÇOS PRINCIPAIS EM VASOS IMPORTANTES: 0,26%;
- OUTRAS PARTES SOLDADAS SUJEITAS À PRESSÃO EM VASOS EM GERAL: 0,30%;
- MÁXIMO ADMISSÍVEL PARA QUALQUER PARTE SOLDADA (MESMO NÃO SUBMETIDA À PRESSÃO): 0,35%.

OS AÇOS COM QUANTIDADE DE C SUPERIOR A 0,3% APRESENTAM ALTA SUSCETIBILIDADE A TRINCAS NAS SOLDAS DEVIDO À AÇÃO DO HIDROGÊNIO QUE FICA RETIDO NAS SOLDAS (TRINCAS A FRIO).

PARA PARTES NÃO SOLDADAS NÃO HÁ LIMITAÇÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO. OS AÇOS PODEM SER “ACALMADOS” (*KILLED-STEEL*), COM ADIÇÃO DE ATÉ 0,6% DE Si, PARA ELIMINAR OS GASES, OU “EFERVESCENTES” (*RIMED-STEEL*), QUE NÃO CONTÉM Si. OS AÇOS-CARBONO ACALMADOS TÊM ESTRUTURA METALÚRGICA MAIS FINA E UNIFORME E COM MENOR INCIDÊNCIA DE DEFEITOS INTERNOS, SENDO ASSIM DE QUALIDADE SUPERIOR AOS “EFERVESCENTES”. RECOMENDA-SE O EMPREGO DE AÇOS-CARBONO ACALMADOS SEMPRE QUE OCORREREM TEMPERATURAS ACIMA DE 400°C, AINDA QUE POR POUCO TEMPO, OU PARA TEMPERATURAS INFERIORES A 0°C.

OS AÇOS DE BAIXO CARBONO (ATÉ 0,25%) TÊM LIMITE DE RESISTÊNCIA DA ORDEM DE 310 A 370 MPa (~31 A 37 KG/MM<sup>2</sup>), E LIMITE DE ESCOAMENTO DE 150 A 220 MPa (~15 A 22 KG/MM<sup>2</sup>). PARA OS AÇOS DE MÉDIO CARBONO (ATÉ 0,35%C), ESSES VALORES SÃO RESPECTIVAMENTE 370 A 540 MPa (~37 A 54 KG/MM<sup>2</sup>), E 220 A 280 MPa (~22 A 28 KG/MM<sup>2</sup>).

A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO-CARBONO COMEÇA A SOFRER UMA FORTE REDUÇÃO EM TEMPERATURAS SUPERIORES A 400°C, EM FUNÇÃO DO TEMPO, DEVIDO PRINCIPALMENTE AO FENÔMENO DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES POR **FLUÊNCIA (CREEP)**, QUE COMEÇA A SER OBSERVADO A PARTIR DE 370°C, E QUE DEVE SER OBRIGATORIAMENTE CONSIDERADO PARA QUALQUER SERVIÇO EM TEMPERATURAS ACIMA DE 400°C. AS DEFORMAÇÕES POR FLUÊNCIA SERÃO TANTO MAIORES E MAIS RÁPIDAS QUANTO MAIS ELEVADA FOR A TEMPERATURA, MAIOR FOR A TENSÃO NO MATERIAL E MAIS LONGO FOR O TEMPO DURANTE O QUAL O MATERIAL ESTEVE SUBMETIDO À TEMPERATURA E À TENSÃO.



CURVA DE FLUÊNCIA

EM TEMPERATURAS SUPERIORES A 530°C O AÇO CARBONO SOFRE UMA INTENSA OXIDAÇÃO SUPERFICIAL (FORMAÇÃO DE CAREPAS – SCALING), QUANDO EXPOSTO AO AR, COM FORMAÇÃO DE GROSSAS CROSTAS DE ÓXIDOS, O QUE O TORNA INACEITÁVEL PARA QUALQUER SERVIÇO CONTÍNUO. DEVE SER OBSERVADO QUE EM CONTATO COM OUTROS MEIOS ESSA OXIDAÇÃO PODE-SE INICIAR EM TEMPERATURAS MAIS BAIXA. A EXPOSIÇÃO PROLONGADA DO AÇO-CARBONO A TEMPERATURAS SUPERIORES A 420°C PODE CAUSAR AINDA UMA PRECIPITAÇÃO DE CARBONO (GRAFITIZAÇÃO), QUE FAZ O MATERIAL FICAR QUEBRADIÇO.

POR TODOS OS MOTIVOS EXPOSTOS, RECOMENDAM-SE OS SEGUINTE LIMITES MÁXIMOS DE TEMPERATURAS PARA PARTES DE AÇO-CARBONO EM VASOS DE PRESSÃO:

- PARTES SUJEITAS A ESFORÇOS PRINCIPAIS, SERVIÇOS CONTÍNUO: 450°C;
- PARTES SECUNDÁRIAS, SERVIÇO CONTÍNUO: 480°C;
- MÁXIMOS DE TEMPERATURA DE CURTA DURAÇÃO E NÃO COINCIDENTES COM GRANDES ESFORÇOS MECÂNICOS: 520°C.

O AÇO-CARBONO APRESENTA UMA TRANSIÇÃO DE COMPORTAMENTO DE DÚCTIL PARA FRÁGIL EM BAIXAS TEMPERATURAS, FICANDO SUJEITO A **FRATURAS FRÁGEIS** REPENTINAS, QUE PODEM SER CATASTRÓFICAS, COM A PERDA TOTAL DO VASO. A TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO NÃO É UM VALOR DEFINIDO PARA UM DETERMINADO TIPO DE AÇO, SENDO MUITO INFLUENCIADA PELA **COMPOSIÇÃO QUÍMICA, TAMANHO DOS GRÃOS, ESPESSURA DA PEÇA, NÍVEL DE TENSÕES, E PRINCIPALMENTE PELA EXISTÊNCIA DE IRREGULARIDADES GEOMÉTRICAS NA PEÇA (ENTALHES – NOTCHES)**, INCLUSIVE CAUSADAS POR DEFEITOS INTERNOS DO MATERIAL OU POR DEFEITOS DE SOLDA.

DE UM MODO GERAL, NÃO SE EMPREGAM AÇOS-CARBONO PARA SERVIÇOS EM QUE POSSAM OCORRER TEMPERATURAS INFERIORES A  $-45^{\circ}\text{C}$ , AINDA QUE SEJAM EVENTUAIS OU DE CURTA DURAÇÃO. NA FAIXA DE ZERO ATÉ  $-45^{\circ}\text{C}$ , PODE SE USAR AÇO-CARBONO DENTRO DE DETERMINADOS REQUISITOS.



ANO: DEZ/1965  
MATERIAL: Cr-Mo-V  
ESPESSURA: 150 mm  
TEMPERATURA:  $10^{\circ}\text{C}$

### FRATURA FRÁGIL EM VASO DE PRESSÃO DURANTE TESTE HIDROSTÁTICO

O AÇO CARBONO É UM MATERIAL DE BAIXA RESISTÊNCIA À CORROSÃO, SENDO MUITO RAROS OS SERVIÇOS PARA OS QUAIS NÃO HAJA NENHUMA CORROSÃO. POR ESSA RAZÃO, É QUASE SEMPRE NECESSÁRIO O ACRÉSCIMO DE ALGUMA MARGEM PARA CORROSÃO EM TODAS AS PARTES DE AÇO-CARBONO EM CONTATO COM OS FLUIDOS DE PROCESSO OU COM A ATMOSFERA, EXCETO, SE HOUVER UMA PINTURA OU OUTRO REVESTIMENTO PROTETOR ADEQUADO. MESMO ASSIM, O AÇO-CARBONO PODE SER USADO, COM UMA VIDA ÚTIL ACEITÁVEL, PARA A MAIORIA DOS PROCESSOS INDUSTRIAIS.



O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 (PARÁGRAFO UCS-56 E 57), FAZ AS SEGUINTE EXIGÊNCIAS QUANTO A TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES NAS SOLDAS ENTRE PARTES DE AÇO-CARBONO E A RADIOGRAFIA TOTAL DESTAS SOLDAS:

- ESPESSURAS ATÉ 50 MM: TRATAMENTO TÉRMICO DURANTE 24 MIN PARA CADA 10 MM DE ESPESSURA, COM UM MÍNIMO DE 15 MINUTOS. ESSE TRATAMENTO É OBRIGATÓRIO PARA ESPESSURAS DE 32 MM, OU MAIORES, QUANDO NÃO É FEITO O PRAQUECIMENTO DO MATERIAL A UMA TEMPERATURA MÍNIMA DE 200°C, E, EM QUALQUER CASO, PARA ESPESSURAS DE 38 MM OU MAIORES,
  
- ESPESSURAS ACIMA DE 50 MM: TRATAMENTO TÉRMICO OBRIGATÓRIO DURANTE 2 HORAS, ACRESCIDAS DE 6 MIN PARA CADA 10 MM DE ESPESSURA ACIMA DE 50 MM;
  
- RADIOGRAFIA TOTAL DAS SOLDAS; OBRIGATÓRIO PARA ESPESSURAS ACIMA DE 32 MM.

O TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES DEVE SER FEITO, PARA QUALQUER ESPESSURA, NA TEMPERATURA MÍNIMA DE 595°C. É PRÁTICA CORRENTE FAZER-SE TAMBÉM O PRAQUECIMENTO DAS SOLDAS, NA TEMPERATURA MÍNIMA DE 100°C, PARA ESPESSURAS ACIMA DE 12 MM.

Tabela 4.3 Principais especificações de aço-carbono (os números indicam especificações da ASTM, exceto onde indicado diferentemente)

Formas de Apresentação	Classes de aços-carbono				
	Aços de baixo carbono	Aços de médio carbono (não-acalmados)	Aços de médio carbono acalmados — (temperaturas altas)	Aços de médio carbono acalmados — (baixas temperaturas)	Aços de qualidade estrutural
Chapas grossas	A-285 Gr A	A-285 Gr B, C	A-515 Gr 55, 60, 65 e 70	A-516 Gr 55, 60, 65 e 70 A-442 Gr. 55, 60	A-283 Gr C
Chapas finas					A-570 Gr C
Tubos condução (sem costura)	A-106 Gr A (com Si)		A-106 Gr B, C (com Si)		
Tubos condução (com ou sem costura)	A-53 Gr A API-5L Gr A	A-53 Gr B API-5L Gr B		A-333 Gr 6	A-120
Tubos condução (solda por eletrodo)	A-139 Gr A	A-134 A-139 Gr B A-671 (285 B)	A-672 (515 e 516)	A-671 (516)	
Tubos condução (solda por resistência elétrica)	A-135				
Tubos para trocadores	A-179 (s/costura) A-214 (solda por resistência elétrica)			A-334 Gr 6	
Tubos para caldeiras	A-178		A-210 A-192		
Peças forjadas		A-181	A-105	A-350 Gr LF1	
Peças fundidas		A-216 Gr WCB		A-352 Gr LCB	
Acessórios de tubulação	A-234 Gr WPA	A-234 Gr WPB		A-420 Gr WPL6	

### 2.6.3 AÇOS-LIGA E INOXIDÁVEIS – CASOS GERAIS DE EMPREGO

DENOMINAM-SE “AÇOS-LIGA” (*ALLOY-STEEL*) TODOS OS AÇOS QUE POSSUEM QUALQUER QUANTIDADE DE OUTROS ELEMENTOS, ALÉM DOS QUE ENTRAM NA COMPOSIÇÃO DOS AÇOS-CARBONO. DEPENDENDO DA QUANTIDADE TOTAL DE ELEMENTOS DE LIGA, DISTINGUEM-SE OS AÇOS DE BAIXA LIGA (*LOW ALLOY-STEEL*), COM ATÉ 5% DE ELEMENTOS DE LIGA, AÇOS DE LIGA INTERMEDIÁRIA (*INTERMEDIATE ALLOY-STEEL*), CONTENDO ENTRE 5% E 10%, E OS AÇOS DE ALTA LIGA (*HIGH ALLOY-STEEL*), COM MAIS DE 10%.

OS AÇOS INOXIDÁVEIS (*STAINLESS STEEL*) SÃO OS QUE CONTÊM PELO MENOS 12% DE CROMO, O QUE LHE CONFERE A PROPRIEDADE DE NÃO OXIDAREM MESMO EM EXPOSIÇÃO PROLONGADA A UMA ATMOSFERA NORMAL.

TODOS OS AÇOS LIGA SÃO BEM MAIS CAROS QUE O AÇO-CARBONO, SENDO DE UM MODO GERAL O CUSTO TANTO MAIS ALTO QUANTO MAIOR FOR A QUANTIDADE DE ELEMENTOS DE LIGA. ALÉM DISSO, A MONTAGEM E SOLDAGEM DESSES AÇOS TAMBÉM SÃO MAIS DIFÍCEIS E MAIS CARAS.

COMO TODAS AS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS ESTÃO SUJEITAS A SE TORNAREM OBSOLETAS EM RELATIVAMENTE POUCO TEMPO, NÃO É EM GERAL ECONÔMICO NEM RECOMENDÁVEL O USO DE AÇOS –LIGA APENAS PARA TORNAR MUITO MAIS LONGA A VIDA DE UM VASO.

OS PRINCIPAIS CASOS EM QUE SE JUSTIFICA O EMPREGO DOS AÇOS ESPECIAIS (AÇO-LIGA E INOXIDÁVEIS) SÃO OS SEGUINTE:

- **ALTAS TEMPERATURAS** – TEMPERATURAS ACIMA DOS LIMITES DE USO DOS AÇOS-CARBONO OU MESMO DENTRO DESTES LIMITES, QUANDO SEJA EXIGIDA MAIOR RESISTÊNCIA MECÂNICA, RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA, OU MAIOR RESISTÊNCIA À CORROSÃO.
- **BAIXAS TEMPERATURAS** – TEMPERATURAS INFERIORES A -45°C, DEVIDO AO ALTO RISCO DE FRATURAS FRÁGEIS COM O AÇO-CARBONO.
- **ALTA CORROSÃO** – SERVIÇOS COM FLUIDOS CORROSIVOS, MESMO QUANDO DENTRO DA FAIXA DE TEMPERATURAS DE EMPREGO DOS AÇOS-CARBONO. DE UM MODO GERAL, OS AÇOS-LIGA E INOXIDÁVEIS TÊM MELHORES QUALIDADES DE RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO QUE OS AÇOS-CARBONO. EXISTEM, ENTRETANTO, NUMEROSOS CASOS DE EXCEÇÃO: ÁGUA SALGADA, POR EXEMPLO, DESTRÓI A MAIORIA DOS AÇOS ESPECIAIS TÃO RAPIDAMENTE COMO OS AÇOS-CARBONO.
- **EXIGÊNCIAS DE NÃO CONTAMINAÇÃO** - SERVIÇOS PARA OS QUAIS NÃO SE POSSA ADMITIR A CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO CONTIDO (PRODUTOS ALIMENTARES E FARMACÊUTICOS, POR EXEMPLO). A CORROSÃO, AINDA QUE SÓ SEJA CAPAZ DE DESTRUIR O MATERIAL DO VASO DEPOIS DE MUITO TEMPO, PODE CAUSAR A CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO CIRCULANTE, QUANDO OS RESÍDUOS DA CORROSÃO SÃO CARREGADOS PELA CORRENTE FLUIDA. POR ESSA RAZÃO, NOS CASOS EM QUE NÃO POSSA HAVER CONTAMINAÇÃO, EMPREGAM-SE MUITAS VEZES OS AÇOS ESPECIAIS, EMBORA DO PÔNTO DE VISTA PROPRIAMENTE DA CORROSÃO NÃO FOSSEM NECESSÁRIOS.
- **SEGURANÇA** – SERVIÇOS COM FLUIDOS PERIGOSOS (EM TEMPERATURAS MUITO ELEVADAS, INFLAMÁVEIS, TÓXICOS, EXPLOSIVOS, ETC.), QUANDO SEJA EXIGIDO O MÁXIMO DE SEGURANÇA CONTRA POSSÍVEIS VAZAMENTOS E ACIDENTES. TAMBÉM NESSES CASOS, ESTRITAMENTE DEVIDO À CORROSÃO, NÃO SERIAM NORMALMENTE NECESSÁRIOS OS AÇOS ESPECIAIS.

NO QUE SE REFERE À CORROSÃO, CONVÉM OBSERVAR QUE, EXCETO QUANDO ENTRAM EM JOGO TAMBÉM A EXIGÊNCIA DE NÃO-CONTAMINAÇÃO DO FLUIDO OU A SEGURANÇA, O PROBLEMA É PURAMENTE ECONÔMICO: QUANTO MAIS RESISTENTE FOR O MATERIAL, TANTO MAIS LONGA A VIDA DO VASO. PORTANTO, A DECISÃO SERÁ TOMADA COMO RESULTADO DA COMPARAÇÃO DO CUSTO DOS DIVERSOS MATERIAIS POSSÍVEIS COM O CUSTO DE REPOSIÇÃO DO VASO, INCLUINDO-SE O CUSTO DE OPERAÇÃO E DE PARALISAÇÃO DO SISTEMA.

### 2.6.3.1 AÇOS-LIGA

EXISTEM TRÊS CLASSES PRINCIPAIS DE AÇOS-LIGA EMPREGADOS PARA VASOS DE PRESSÃO:

- AÇOS-LIGA MOLIBDÊNIO E CROMO E CROMO-MOLIBDÊNIO;
- AÇOS-LIGA NÍQUEL;
- AÇOS-LIGA MANGANÊS.

OS AÇOS-LIGA MOLIBDÊNIO E CROMO MOLIBDÊNIO CONTÊM ATÉ 1% DE Mo E ATÉ 9% DE Cr, EM DIVERSAS PROPORÇÕES, COMO MOSTRADO NA TABELA SOBRE AÇOS-LIGA, SENDO MATERIAIS FERRÍTICOS (MAGNÉTICOS), ESPECÍFICOS PARA EMPREGO EM TEMPERATURAS ELEVADAS. O CROMO CAUSA PRINCIPALMENTE UMA SENSÍVEL MELHORIA NA RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO, INCLUSIVE À FORMAÇÃO DE CAREPAS EM TEMPERATURAS ELEVADAS E NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO EM GERAL, SOBRETUDO AOS MEIOS OXIDANTES, SENDO ESSES EFEITOS TANTO MAIS ACENTUADOS QUANTO MAIOR FOR A QUANTIDADE DE CROMO. POR ESSA RAZÃO, ESSES AÇOS PODEM SER EMPREGADOS EM TEMPERATURAS MAIS ELEVADAS DO QUE O PERMITIDO PARA OS AÇOS-CARBONO.

ATÉ A QUANTIDADE DE 2,5% DE Cr, HÁ UM LIGEIRO AUMENTO NA RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA SENDO QUE PERCENTUAIS MAIORES DE Cr REDUZEM DE FORMA ACENTUADA ESSA RESISTÊNCIA (EXCETO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS, CONTENDO NÍQUEL).

POR ESSE MOTIVO, OS AÇOS-LIGA COM ATÉ 2,5% DE Cr SÃO ESPECÍFICOS PARA SERVIÇOS DE ALTA TEMPERATURA COM GRANDES ESFORÇOS MECÂNICOS E BAIXA CORROSÃO, PARA OS QUAIS A PRINCIPAL PREOCUPAÇÃO É A RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA, ENQUANTO QUE OS AÇOS COM MAIOR QUANTIDADE DE CROMO SÃO ESPECÍFICOS PARA SERVIÇOS EM ALTA TEMPERATURA, COM ESFORÇOS MECÂNICOS REDUZIDOS E ALTA CORROSÃO, ONDE SE DESEJA PRINCIPALMENTE RESISTÊNCIA À OXIDAÇÃO OU À CORROSÃO POR PITES.

O MOLIBDÊNIO É O ELEMENTO MAIS IMPORTANTE NA MELHORIA DA RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA DO AÇO, CONTRIBUINDO TAMBÉM PARA AUMENTAR A RESISTÊNCIA À CORROSÃO. UM CASO TÍPICO DO EMPREGO DOS AÇOS-LIGA Cr-Mo DE CROMO MAIS ALTO SÃO OS EQUIPAMENTOS PARA SERVIÇO COM HIDROCARBONETOS EM TEMPERATURAS ELEVADAS, PARA OS QUAIS O MATERIAL MAIS EMPREGADO É O AÇO-LIGA 5% Cr-1/2%Mo, CUJA VIDA É APROXIMADAMENTE DEZ VEZES A DO AÇO-CARBONO NO MESMO SERVIÇO.

DA MESMA FORMA QUE OS AÇOS-CARBONO, ESSES AÇOS-LIGA ESTÃO TAMBÉM SUJEITOS A FRATURAS FRÁGEIS REPENTINAS QUANDO SUBMETIDOS A TEMPERATURAS MUITO BAIXAS, NÃO DEVENDO POR ISSO SER EMPREGADOS EM NENHUM SERVIÇO COM TEMPERATURA INFERIOR A 0°C.

OS AÇOS-LIGA Mo E Cr-Mo TAMBÉM OXIDAM, EMBORA MAIS LENTAMENTE DO QUE OS AÇOS-CARBONO. O COMPORTAMENTO DESSES AÇOS EM RELAÇÃO AOS ÁCIDOS E ÁLCALIS É SEMELHANTE AO DO AÇO-CARBONO.

OS AÇOS-LIGA CONTENDO NÍQUEL SÃO MATERIAIS ESPECIAIS PARA USO EM TEMPERATURAS MUITO BAIXAS, SENDO A TEMPERATURA-LIMITE TANTO MAIS BAIXA QUANTO MAIOR FOR A QUANTIDADE DE NÍQUEL.

TANTO OS AÇOS-LIGA Mo E Cr-Mo, COMO AÇOS-LIGA Ni, SÃO MATERIAIS DIFÍCEIS DE SOLDAR, SENDO QUASE SEMPRE NECESSÁRIOS TRATAMENTOS TÉRMICOS.

OS AÇOS-LIGA MANGANÊS SÃO AÇOS COM ATÉ 1,6% Mn, ISTO É, COM QUANTIDADE DE MANGANÊS ACIMA DOS LIMITES USUAIS DESSE ELEMENTO NOS AÇOS-CARBONO, TENDO, ÀS VEZES, TAMBÉM PEQUENAS QUANTIDADES DE MOLIBDÊNIO E/OU NÍQUEL. O MAIOR TEOR DE MANGANÊS DESTINA-SE A AUMENTAR A RESISTÊNCIA MECÂNICA, PRINCIPALMENTE EM CHAPAS DE GRANDES ESPESSURAS (ACIMA DE 50 MM, POR EXEMPLO), O QUE DE OUTRA FORMA SÓ SERIA POSSÍVEL COM ALTA QUANTIDADE DE CARBONO, QUE PREJUDICARIA A SOLDABILIDADE E A TENACIDADE. ESSAS CHAPAS SÃO EMPREGADAS PARA ALGUNS VASOS DE PRESSÃO IMPORTANTES, DE GRANDES DIMENSÕES OU PARA PRESSÕES ELEVADAS, NECESSITANDO, EM QUALQUER CASO, DE PAREDES DE GRANDE ESPESSURA.

Tabela 4.1 Aços-liga: tipos usuais, composição química, exigências do código ASME; Seção VIII, Divisão 1

	Elementos de liga (%) Restante: ferro			Número "P"	Temperatura mínima de tratamento térmico (°C)	Exigências do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (parágrafo USC-56 e 57)			Preaquecimento nas soldas (prática usual)		
	Cr	Mo	Ni			Tempo mínimo para tratamento térmico nas soldas, de acordo com a espessura			Radiografia total nas soldas para espessuras acima de (mm)	Para espessuras acima de (mm)	Temperatura mínima (°C)
						Até 50 mm	>50 mm, até 125 mm	>125 mm			
Aços-liga Mo e Cr-Mo	—	1/2	—	3	595	24 min para cada 10mm mín. 15 min	2 horas mais 6 min para cada 10 mm, acima de 50 mm		19	12	100
	1	1/2	—	4	595		24 min para cada 10 mm		16	zero	200
	1 1/4	1/2	—	4	595		5 horas mais 6 min para cada 10 mm, acima de 125 mm		16	zero	200
	2 1/4	1	—	5	675		zero	zero	250		
	5	1/2	—	5	675		zero	zero	250		
	7	1/2	—	5	675		zero	zero	250		
	9	1	—	5	675		zero	zero	250		
Aços-liga Ni	—	—	2 1/4	9A	595	↓	↓	↓	16	—	—
	—	—	3 1/2	9B	595	↓	↓	↓	16	—	—

\*O número P é um índice de comparação de soldabilidade de metais do código ASME, Seção VIII; dois materiais de mesmo número P podem ser soldados entre si sem problemas.

Tabela 4.4 Especificações ASTM de aços-liga

Classe de material	Formas de apresentação							
	Chapas	Tubos para condução		Tubos para caldeiras	Tubos para permutadores	Peças forjadas	Peças fundidas	Acessórios para tubulação
		Sem costura	Com costura					
Aço-liga 1/2 Mo	A-204 Gr A,B	A-335 Gr P1	A-691 CM 65 A-691 CM 70	A-209 Gr T1		A-182 Gr F1	A-217 Gr WC1	A-234 Gr WP1
Aço-liga 1 Cr-1/2 Mo	A-387 Gr 12	A-335 Gr P12	A-691- 387-12	A-213 Gr T12		A-182 Gr F12		A-234 Gr WP12
Aço-liga 1 1/4 Cr-1/2 Mo	A-387 Gr 11	A-335 Gr P11	A-691- 387-11	A-213 Gr T11	A-199 Gr T11	A-182 Gr F11	A-217 Gr WC6	A-234 Gr WP11
Aço-liga 2 1/4 Cr-1 Mo	A-387 Gr 22	A-335 Gr P22	A-691- 387-22	A-213 Gr T22	A-199 Gr T22	A-182 Gr F22	A-217 Gr WC9	A-234 Gr WP22
Aço-liga 5 Cr-1/2 Mo	A-387 Gr 5	A-335 Gr P5	A-691- 387-5	A-213 Gr T5	A-199 Gr T5	A-182 Gr F5	A-217 Gr C5	A-234 Gr WP5
Aço-liga 7 Cr-1/2 Mo		A-335 Gr P7		A-213 Gr T7	A-199 Gr T7	A-182 Gr F7		A-234 Gr WP7
Aço-liga 9 Cr-1 Mo		A-335 Gr P9		A-213 Gr T9	A-199 Gr T9	A-182 Gr F9	A-217 Gr C12	A-234 Gr WP9
Aço-liga 2 1/2 Ni	A-203 Gr B	A-333 Gr 7			A-334 Gr 7		A-352 Gr LC2	
Aço-liga 3 1/2 Ni	A-203 Gr D	A-333 Gr 3			A-334 Gr 3	A-350 Gr LP3	A-352 Gr LC3	A-420 Gr WPL3
Aço-liga 9 Ni	A-353	A-333 Gr 8			A-334 Gr 8			A-420 Gr WPL 8

### 2.6.3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

EXISTEM TRÊS CLASSES PRINCIPAIS DE AÇOS INOXIDÁVEIS, DE ACORDO COM A ESTRUTURA METALÚRGICA PREDOMINANTE NA LIGA:

- AÇOS AUSTENÍTICOS, BASICAMENTE LIGAS Fe-Cr-Ni, NÃO TEMPERÁVEIS;
- AÇOS FERRÍTICOS, BASICAMENTE LIGAS Fe-Cr, NÃO TEMPERÁVEIS;
- AÇOS MARTENSÍTICOS, BASICAMENTE LIGAS Fe-Cr, TEMPERÁVEIS.

SOMENTE OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS (QUE SÃO TODOS FACILMENTE SOLDÁVEIS) SÃO EMPREGADOS TANTO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA CASCOS E TAMPOS DE VASOS DE PRESSÃO, COMO TAMBÉM PARA PEÇAS INTERNAS, TUBOS E ESPELHOS DE TROCA DE CALOR, BEM COMO PARA REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS. OS OUTROS INOXIDÁVEIS (FERRÍTICOS E MARTENSÍTICOS), DEVIDO À DIFICULDADE DE SOLDAGEM, NÃO PODEM SER EMPREGADOS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO, SENDO, ENTRETANTO, USADOS PARA PARTES INTERNAS, NÃO-SOLDADAS, DE VASOS DE PRESSÃO, INCLUSIVE MATERIAIS DE APARAFUSAMENTO, E PARA TUBOS DE TROCA DE CALOR. ALGUNS AÇOS FERRÍTICOS DE BAIXO CROMO (ATÉ 17%) SÃO DE SOLDAGEM POUCO MAIS FÁCIL E PODEM SER EMPREGADOS PARA REVESTIMENTOS ANTICORROSIVOS, APLICADOS SOBRE CHAPAS DE AÇO CARBONO-CARBONO OU DE BAIXA LIGA, SENDO MESMO PREFERIDOS PARA ESSA APLICAÇÃO PELO FATO DE TEREM COEFICIENTE DE DILATAÇÃO MUITO PRÓXIMO DO AÇO-CARBONO, ENQUANTO QUE PARA OS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS O COEFICIENTE DE DILATAÇÃO É CERCA DE 45% MAIOR DO QUE DO AÇO-CARBONO.

OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS APRESENTAM UMA EXTRAORDINÁRIA RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA E À OXIDAÇÃO, RAZÃO PELA QUAL SÃO BEM ELEVADOS OS VALORES DAS TEMPERATURAS-LIMITE DE UTILIZAÇÃO, EXCETO PARA OS TIPOS DE MUITO BAIXO CARBONO (TIPOS L e ELC), EM QUE O LIMITE É DE 400°C DEVIDO À MENOR RESISTÊNCIA MECÂNICA DESSES AÇOS. TODOS OS AÇOS AUSTENÍTICOS MANTÊM O COMPORTAMENTO DÚCTIL MESMO EM TEMPERATURAS EXTREMAMENTE BAIXAS, PODENDO ALGUNS SER EMPREGADO ATÉ PRÓXIMO DE ZERO ABSOLUTO. ESSES AÇOS SÃO TODOS MATERIAIS DE SOLDAGEM FÁCIL, NÃO EXIGINDO NENHUM TRATAMENTO TÉRMICO.

Tabela 4.2 Aços inoxidáveis: tipos, composição química, limites de temperatura

Designação AISI	Estrutura metalúrgica	Composição nominal % Restante: ferro	Limites de temperatura (°C)		Designação AISI	Estrutura metalúrgica	Composição nominal % Restante: ferro	Limites de temperatura (°C)	
			Normas	Resistência mecânica aceitável				Normas	Resistência mecânica aceitável
304	Austeníticos	0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni	815	600	403	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 0,5 Si 11,5 a 13 Cr		480
304L		0,03 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 12 Ni	430	400	405	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 14,5 Cr; 0,6 Ni; 0,1 a 0,3 Al	540	480
304H		0,04 a 0,1 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni	815	650	410	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,75 Ni	650	500
304N		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 8 a 10,5 Ni; 0,1 a 0,16 N	650	650	410S	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,6 Ni	650	480
310		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 24 a 26 Cr; 19 a 22 Ni	815	600	416	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 0,5 Si 12 a 14 Cr; 0,6 Mo		480
316		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	815	650	429	Martensítico	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 14 a 16 Cr; 0,75 Ni	650	500
316L		0,03 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	430	400	430	Ferrítico	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 0,75 Ni	370	550
316H		0,04 a 0,1 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	815	650	431	Martensítico	0,20 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 15 a 17 Cr; 1,5 Ni		500
316N		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si; 0,1 a 0,16 N 16 a 18 Cr; 10 a 14 Ni; 2 a 3 Mo	650	650	440	Martensítico	0,60 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 0,75 Mo		500
317		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 18 a 20 Cr; 11 a 15 Ni; 3 a 4 Mo	815	600	442	Ferrítico	0,20 C 18 a 23 Cr		550
321		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 12 Ni; 5x % C Ti	815	550	446	Ferrítico	0,35 C 23 a 27 Cr	370	550
347		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 13 Ni; 8x % C Cb + Ta	815	600					
348		0,08 C; 2,0 Mn; 1,0 Si 17 a 19 Cr; 9 a 13 Ni; 10x % C Cb + Ta	815	600					

Observações:

1. As percentagens de C, Mn, Si e Ni são máximas, exceto onde indicado em contrário.
2. Os aços tipos 429 e 431 são na realidade mistos ferrítico-martensíticos.

AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS EM GERAL, EXCETO OS ESTABILIZADOS, TIPOS 321, 347, ETC, E OS DE BAIXO CARBONO, TIPOS L e ELC, ESTÃO SUJEITOS A UM FENÔMENO DE PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS DE CROMO, DENOMINADO "SENSITIZAÇÃO", QUANDO SUBMETIDOS A TEMPERATURAS ENTRE 450°C E 850°C. OS AÇOS QUANDO SENSITIZADOS, PODEM APRESENTAR UMA FORMA GRAVE DE CORROSÃO (CORROSÃO INTERGRANULAR), PRINCIPALMENTE EM MEIOS ÁCIDOS. A SENSITIZAÇÃO PODE CONTROLADA PELA ADIÇÃO DE Ti OU Nb (AÇOS ESTABILIZADOS), OU PELA REDUÇÃO NO TEOR DE CARBONO (AÇOS DE BAIXO OU DE EXTRABAIXO CARBONO). A SENSITIZAÇÃO PODE SER CAUSADA PELO TRABALHO EM TEMPERATURAS ELEVADAS, E TAMBÉM PELA SOLDAGEM E POR TRATAMENTOS TÉRMICOS; A SENSITIZAÇÃO PELA SOLDAGEM OCORRE EM DUAS FAIXAS PARALELAS, PRÓXIMAS AO CORDÃO DE SOLDA, ONDE A TEMPERATURA DO MATERIAL ATINGIU O INTERVALO DE 450°C A 850°C. OS AÇOS DE BAIXO E DE EXTRABAIXO CARBONO PODEM SER SENSITIZADOS POR LONGA EXPOSIÇÃO EM TEMPERATURA ELEVADA, ISTO É, PELO SERVIÇO NESSAS TEMPERATURAS, MAS SÃO IMUNES A SENSITIZAÇÃO PELA SOLDAGEM OU POR TRATAMENTOS TÉRMICOS.

Tabela 4.5 Especificações ASTM de aços inoxidáveis

Classe de Material (designação AISI)	Formas de Apresentação							
	Chapas	Tubos para condução		Tubos para troca de calor		Peças forjadas	Peças fundidas	Acessórios de tubulação
		Sem costura	Com costura	Sem costura	Com costura			
Tipo 304	A-240 Gr 304	A-312 Gr 304	A-358 Gr 304	A-213 Gr 304	A-249 Gr 304	A-182 F 304	A-351 CF 8	A-403 WP 304
Tipo 304 H	A-240 Gr 304 H	A-312 Gr 304 H	A-358 Gr 304 H	A-213 Gr 304 H	A-249 Gr 304 H	A-182 F 304 H		A-403 WP 304 H
Tipo 304 L	A-240 Gr 304 L	A-312 Gr 304 L	A-358 Gr 304 L	A-213 Gr 304 L	A-249 Gr 304 L	A-182 F 304 L	A-351 CF 3	A-403 WP 304 L
Tipo 304 N	A-240 Gr 304 N	A-312 Gr 304 N	A-358 Gr 304 N	A-213 Gr 304 N	A-249 Gr 304 N	A-182 F 304 N		A-403 WP 304 N
Tipo 310	A-240 Gr 310	A-312 Gr 310	A-358 Gr 310	A-213 Gr 310	A-249 Gr 310	A-182 F 310	A-351 CK 20	A-403 WP 310
Tipo 316	A-240 Gr 316	A-312 Gr 316	A-358 Gr 316	A-213 Gr 316	A-249 Gr 316	A-182 F 316	A-351 CF 8 M	A-403 WP 316
Tipo 316 H	A-240 Gr 316 H	A-312 Gr 316 H	A-358 Gr 316 H	A-213 Gr 316 H	A-249 Gr 316 H	A-182 F 316 H		A-403 WP 316 H
Tipo 316 L	A-240 Gr 316 L	A-312 Gr 316 L	A-358 Gr 316 L	A-213 Gr 316 L	A-249 Gr 316 L	A-182 F 316 L	A-351 CF 3 M	A-403 WP 316 L
Tipo 316 N	A-240 Gr 316 N	A-312 Gr 316 N	A-358 Gr 316 N	A-213 Gr 316 N	A-249 Gr 316 N	A-182 F 316 N		A-403 WP 316 N
Tipo 317	A-240 Gr 317	A-312 Gr 317	A-358 Gr 317		A-249 Gr 317			A-403 WP 317
Tipo 321	A-240 Gr 321	A-312 Gr 321	A-358 Gr 321	A-213 Gr 321	A-249 Gr 321	A-182 F 321		A-403 WP 321
Tipo 347	A-240 Gr 347	A-312 Gr 347	A-358 Gr 347	A-213 Gr 347	A-249 Gr 347	A-182 F 347	A-351 CF 8 C	A-403 WP 347
Tipo 348	A-240 Gr 348	A-312 Gr 348	A-358 Gr 348	A-213 Gr 348	A-249 Gr 348	A-182 F 348	A-351 10 MC	A-403 WP 348
Tipo 405	A-240 Gr 405			A-268 Gr 405				
Tipo 410	A-240 Gr 410			A-268 Gr 410		A-182 F 6 a		
Tipo 410 S	A-240 Gr 410 S							
Tipo 429	A-240 Gr 429			A-268 Gr 429		A-182 F 429		
Tipo 430	A-240 Gr 430			A-268 Gr 430		A-182 F 430		
Tipo 446				A-268 Gr 446				

ASSIM, SÃO AS SEGUINTE AS RECOMENDAÇÕES DE EMPREGO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS QUANTO A SENSITIZAÇÃO E CORROSÃO INTERGRANULAR:

**VASOS OU PARTES DE VASOS COM TEMPERATURA DE OPERAÇÃO ATÉ 450°C**

**PARTES NÃO SOLDADAS:**  
QUALQUER AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO PODE SER USADO

**PARTES SOLDADAS:**

MEIOS CORROSIVOS NÃO CAPAZES DE CAUSAR CORROSÃO INTERGRANULAR:  
**QUALQUER AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO PODE SER USADO.**

MEIOS CORROSIVOS CAPAZES DE CAUSAR CORROSÃO INTERGRANULAR:  
**PREFERIR OS AÇOS DE BAIXO CARBONO. OS AÇOS ESTABILIZADOS PODEM SER USADOS PARA PARTES MUITO TENSIONADAS.**

VASOS OU PARTES  
DE VASOS COM  
TEMPERATURA DE  
OPERAÇÃO ACIMA  
DE 450°C

MEIOS CORROSIVOS  
**NÃO CAPAZES** DE  
CAUSAR CORROSÃO  
INTERGRANULAR:  
**QUALQUER AÇO  
INOXIDÁVEL  
AUSTENÍTICO PODE SER  
USADO.**

MEIOS CORROSIVOS  
**CAPAZES** DE CAUSAR  
CORROSÃO  
INTERGRANULAR:  
**RECOMENDA-SE O  
EMPREGO DE AÇOS  
INOXIDÁVEIS  
ESTABILIZADOS.**

PARA QUALQUER REVESTIMENTO ANTICORROSIVO SÓ DEVEM SER EMPREGADOS AÇOS NÃO SENSITIZÁVEIS.

A PRESENÇA MESMO DE ÍNFIMAS QUANTIDADES DE HCL, CLORETOS, HIPOCLORITOS, ETC. (ÍON CLORO EM GERAL) PODE CAUSAR SEVERA CORROSÃO POR PITES E SOB TENSÃO EM TODOS OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS, DEVENDO POR ISSO SER SEMPRE EVITADA.

OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS SÃO USADOS, ENTRE OUTROS SERVIÇOS, PARA TEMPERATURAS MUITO ELEVADAS, TEMPERATURAS MUITO BAIXAS (SERVIÇOS CRIOGÊNICOS), SERVIÇOS CORROSIVOS OXIDANTES, PRODUTOS ALIMENTARES E FARMACÊUTICOS E OUTROS SERVIÇOS COM EXIGÊNCIA DE NÃO-CONTAMINAÇÃO, HIDROGÊNIO EM PRESSÕES E TEMPERATURAS ELEVADAS ETC.

OS AÇOS AUSTENÍTICOS TIPO H SÃO CHAMADOS AÇOS DE “CARBONO CONTROLADO”, QUE APRESENTAM MELHOR COMPORTAMENTO MECÂNICO EM TEMPERATURAS MUITO ELEVADAS. OS AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS E MARTENSÍTICOS APRESENTAM, EM RELAÇÃO AOS AUSTENÍTICOS, BEM MENOR RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA E À CORROSÃO EM GERAL, ASSIM COMO MENOR TEMPERATURA DE INÍCIO DE OXIDAÇÃO, SENDO POR ISSO MAIS BAIXAS AS TEMPERATURAS-LIMITE DE USO. EM COMPENSAÇÃO, SÃO MATERIAIS MAIS BARATOS DO QUE OS AUSTENÍTICOS E MENOS SUJEITOS AOS FENÔMENOS DE CORROSÃO POR PITES E SOB TENSÃO. TODOS ESSES AÇOS NÃO SÃO ADEQUADOS PARA SERVIÇOS EM BAIXA TEMPERATURAS, ESTANDO SUJEITOS A FRATURAS FRÁGEIS, ASSIM COMO O AÇO-CARBONO.

AS TABELAS 4.3, 4.4 e 4.5, ACIMA, MOSTRAM AS PRINCIPAIS ESPECIFICAÇÕES DA ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS) PARA DIVERSAS CLASSES DE AÇOS-CARBONO, AÇOS-LIGA E INOXIDÁVEIS RESPECTIVAMENTE, DE MAIOR USO PARA VASOS DE PRESSÃO, PODEMOS OBSERVAR QUE PARA AS VÁRIAS CLASSES DE MATERIAIS, NEM TODOS SÃO ENCONTRÁVEIS SOB TODAS AS FORMAS DE APRESENTAÇÃO.



## **2.7 NORMAS DE PROJETO/ TENSÕES EM VASOS DE PRESSÃO**

### **2.7.1 NATUREZA E FINALIDADE DAS NORMAS DE PROJETO**

AS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO A QUE JÁ NOS REFERIMOS VÁRIAS VEZES EM CAPÍTULOS ANTERIORES, SÃO, COMO O PRÓPRIO NOME INDICA, TEXTOS NORMATIVOS DESENVOLVIDOS POR ASSOCIAÇÕES TÉCNICAS OU POR SOCIEDADES DE NORMALIZAÇÃO PÚBLICAS OU PARTICULARES DE DIVERSOS PAÍSES.

A EXTENSÃO DOS ASSUNTOS ABRANGIDOS PELAS NORMAS DE PROJETO É MUITO VARIÁVEL, DIFERINDO BASTANTE EM CADA CASO. AS NORMAS AMERICANAS DE VASOS DE PRESSÃO, POR EXEMPLO (CÓDIGO ASME), QUE VEREMOS A SEGUIR COM MAIS DETALHES, ASSIM COMO A NORMA INGLESA (BS-5500) ABRANGEM NÃO SÓ CRITÉRIOS, FÓRMULAS DE CÁLCULO E EXIGÊNCIAS DE DETALHES DE PROJETO, MAS TAMBÉM REGRAS DE DETALHES E EXIGÊNCIAS RELATIVOS À FABRICAÇÃO, MONTAGEM E INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO, ASSIM COMO EXIGÊNCIAS E LIMITAÇÕES REFERENTES A MATERIAIS. A NORMA FRANCESA DO SNCTTI, QUE INCLUI APENAS DADOS RELATIVOS A PROJETO, CONTÉM, ENTRETANTO, ALÉM DAS REGRAS E RECOMENDAÇÕES PROPRIAMENTE DITAS, EXTENSOS E VALIOSOS COMENTÁRIOS JUSTIFICATIVOS QUE FALTAM EM OUTRAS NORMAS.

O CAMPO DE APLICAÇÃO DAS NORMAS É TAMBÉM VARIÁVEL, EM GERAL NÃO ESTÃO INCLUÍDOS OS VASOS ATMOSFÉRICOS OU PARA PRESSÕES MUITO BAIXAS (ATÉ 1 KG/MM<sup>2</sup>), BEM COMO OS DESTINADOS A PRESSÕES EXTREMAMENTE ALTAS, QUE EXIGEM PROCEDIMENTOS ESPECIAIS DE CÁLCULO E DE FABRICAÇÃO, ESTÃO INCLUÍDOS ENTRETANTO OS VASOS PARA PRESSÕES EXTERNAS (VASOS DE VÁCUO).

AS NORMAS DE PROJETO FORAM ESTABELECIDAS NÃO SÓ COM A FINALIDADE DE PADRONIZAR E SIMPLIFICAR O CÁLCULO E PROJETO DOS VASOS DE PRESSÃO, MAS PRINCIPALMENTE GARANTIR CONDIÇÕES MÍNIMAS DE SEGURANÇA PARA A OPERAÇÃO. A EXPERIÊNCIA COMPROVOU QUE A EXATA OBSERVÂNCIA DE TODAS AS EXIGÊNCIAS DESSAS NORMAS TORNA MUITO MAIS BAIXA A PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ACIDENTES GRAVES. POR ESSA RAZÃO, EMBORA AS NORMAS DE PROJETO RARAMENTE SEJAM DE CARÁTER LEGAL OBRIGATÓRIO, SÃO EM GERAL EXIGIDAS COMO REQUISITO MÍNIMO DE SEGURANÇA POR QUASE TODOS OS PROJETISTAS E USUÁRIOS DE VASOS DE PRESSÃO, PORQUE REPRESENTAM UM CONSIDERÁVEL ACÚMULO DE EXPERIÊNCIA NA TECNOLOGIA DESSES EQUIPAMENTOS.

QUALQUER NORMA DE PROJETO É UM CONJUNTO COERENTE, ISTO É, AS EXIGÊNCIAS QUE A NORMA ESTABELECE SOBRE MATERIAIS, DETALHES DE PROJETO, TENSÕES ADMISSÍVEIS, FÓRMULAS E MÉTODOS DE CÁLCULO, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO DO VASO, ETC, SÃO TODAS INTER-RELACIONADAS E MUTUAMENTE INTERDENPENDENTES. POR ESSE MOTIVO, QUALQUER NORMA DEVE SER EMPREGADA POR COMPLETO, NÃO TENDO CABIMENTO NEM COERÊNCIA O USO, NO MESMO VASO DE PRESSÃO, DE ALGUMAS EXIGÊNCIAS DE UMA NORMA E ALGUMAS EXIGÊNCIAS DE OUTRA NORMA QUALQUER.

### **2.7.2 RESUMO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DAS NORMAS DE PROJETO**

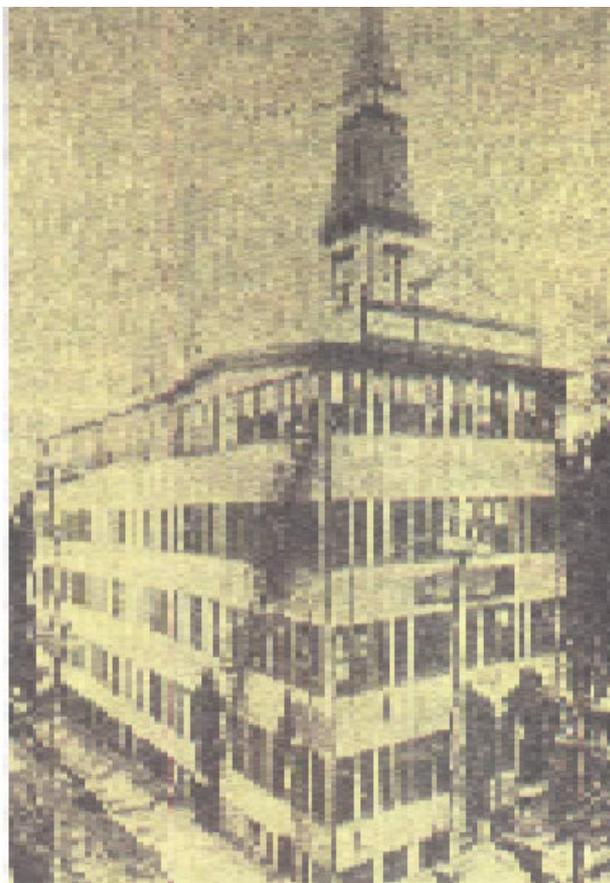
A NECESSIDADE DE REGULAMENTAR O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO SE FEZ SENTIR JÁ NOS PRIMÓRDIOS DO SÉCULO XIX, COMO CONSEQÜÊNCIA PRINCIPALMENTE DAS FREQUENTES EXPLOSÕES DE CALDEIRAS, QUE OCORRIAM NESSA ÉPOCA EM QUE SE INICIAVA, COM A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL O USO INTENSIVO DAS MÁQUINAS A VAPOR.

UMA EXPLOSÃO CATASTRÓFICA EM LONDRES, EM 1815, DEU ORIGEM A UMA INVESTIGAÇÃO, PELO PARLAMENTO BRITÂNICO, QUE CHEGOU À CONCLUSÃO DE QUE O ACIDENTE DEVEU-SE À MÁ CONSTRUÇÃO, A MATERIAIS NÃO ADEQUADOS E À PRESSÃO EXCESSIVA. FOI EXIGIDO ENTÃO QUE AS CALDEIRAS FOSSEM CONSTRUÍDAS DE FERRO FORJADO, COM TAMPOS HEMISFÉRICOS, E COM DUAS VÁLVULAS DE SEGURANÇA.

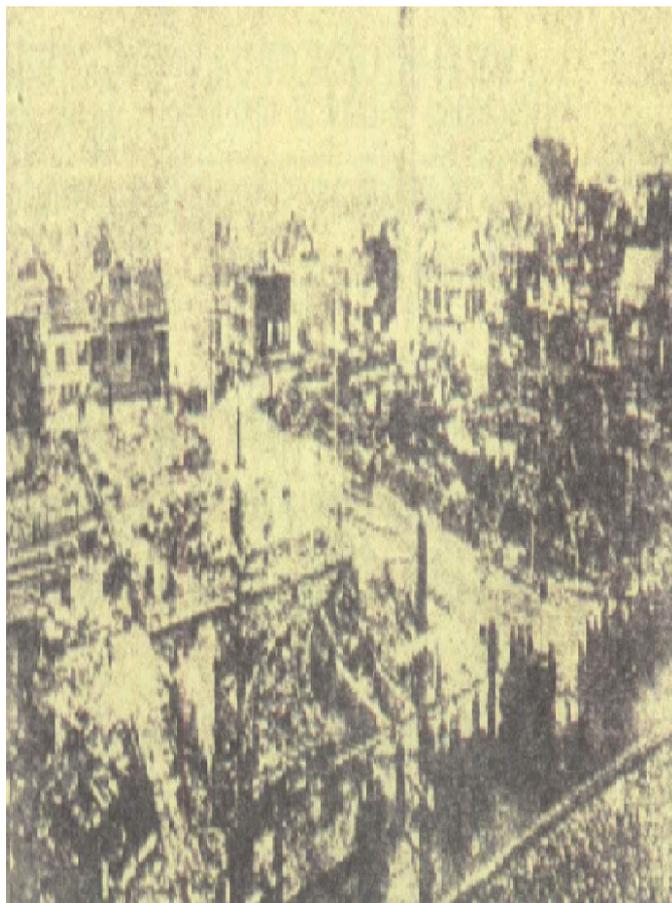
ESSAS EXIGÊNCIAS, QUE HOJE PODEM PARECER RIDÍCULAS, DEVEM ENTRETANTO TER REPRESENTADO NA ÉPOCA UM GRANDE AVANÇO TECNOLÓGICO.

NA FILADÉLFIA (EUA) 1817, PROMULGOU-SE UMA LEI REGULAMENTADO OS TESTES HIDROSTÁTICOS E ROTINAS DE INSPEÇÃO EM CALDEIRAS, E EM 1852, O *FRANKLIN INSTITUTE* CONSOLIDAVA TODA A REGULAMENTAÇÃO SOBRE AS CALDEIRAS DO *STEAM-BOAT Act*. AINDA ASSIM, NO INÍCIO DO SÉCULO XX, ESTIMAVA-SE QUE, SÓ NOS EUA, OCORRIAM ANUALMENTE 300 A 400 EXPLOSÕES DE CALDEIRAS, COM CONSIDERÁVEIS PREJUÍZOS PESSOAIS E MATERIAIS.

FOI TAMBÉM DEPOIS DE UMA TERRÍVEL EXPLOSÃO EM *BROCKTON, MASSACHUSETTS* (EUA), EM 1905, QUE CAUSOU 58 MORTOS E 117 FERIDOS, QUE SAIU A PRIMEIRA NORMA AMERICANA, DE USO LEGAL E OBRIGATÓRIO, INCLUINDO EXIGÊNCIAS DE PROJETO, MATERIAIS, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO DE CALDEIRAS ESTACIONÁRIAS. ESSA NORMA, DENOMINADA *MASSACHUSETTS RULES*, PUBLICADA EM 1907, FOI O EMBRIÃO DO FUTURO CÓDIGO ASME. EM 1911 CRIAVA-SE UMA COMISSÃO ESPECIAL DA ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS), PARA ELABORAR UMA NORMA, CUJA PRIMEIRA EDIÇÃO FOI PUBLICADA EM 1914, ABRANGENDO CALDEIRAS ESTACIONÁRIAS. SÓ EM 1924 SERIA PUBLICADA, PELA PRIMEIRA VEZ, A SEÇÃO VIII DO CÓDIGO ASME, REFERENTE AOS VASOS DE PRESSÃO. POR ESTA ÉPOCA JÁ EXISTIAM VÁRIAS NORMAS EUROPÉIAS TANTO PARA CALDEIRAS QUANTO PARA VASOS DE PRESSÃO. É INTERESSANTE NOTAR QUE A ORIGEM DE TODAS AS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO FOI O PROBLEMA DE SEGURANÇA, ISTO É, A PREOCUPAÇÃO DE EVITAR ACIDENTES. O ASPECTO PROPRIAMENTE DE NORMALIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO SÓ APARECEU DEPOIS, COM O ADVENTO DO CÓDIGO **ASME** QUE TEVE A FINALIDADE DE UNIFICAR E CONSOLIDAR AS DIVERSAS NORMAS EXISTENTES EM DIVERSAS REGIÕES DOS ESTADOS UNIDOS.



FÁBRICA DE CALÇADOS EM BROCKTON ANTES DA EXPLOSÃO



**ESCOMBROS DA FÁBRICA DE CALÇADOS EM BROCKTON APÓS A EXPLOÇÃO**

### **2.7.3 PRINCIPAIS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO**

VAMOS VER A SEGUIR AS PRINCIPAIS NORMAS DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO E SEUS RESPECTIVOS PAÍSES DE ORIGEM. É EVIDENTEMENTE IMPOSSÍVEL FAZER-SE UM RESUMO COMPLETO DE QUALQUER NORMA: POR ESSE MOTIVO, TODAS AS CITAÇÕES QUE JÁ FIZEMOS E QUE AINDA SERÃO FEITAS NESTE LIVRO, SOBRE ALGUMAS NORMAS DE PROJETO, NÃO DISPENSAM A CONSULTA E ESTUDO DESSAS PRÓPRIAS NORMAS.

- **1) ESTADOS UNIDOS** – CÓDIGO GERAL DE CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO DA **ASME** (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS), ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE;

AS SEGUINTE **SEÇÕES** DESTE CÓDIGO SÃO REFERENTES A PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO:

- I** – POWER BOILERS (CALDEIRAS);
- II** – MATERIAIS;
- III** – NUCLEAR VESSELS (VASOS NUCLEARES)
- IV** – HEATING BOILERS (CALDEIRAS PARA AQUECIMENTO);



VIII – PRESSURE VESSELS (VASOS DE PRESSÃO);

- **DIVISÃO 1** – REGRAS DE PROJETO PADRÃO
- **DIVISÃO 2** – REGRAS DE PROJETO ALTERNATIVO

X – FIBERGLASS REINFORCED PLASTIC PRESSURE VESSELS (VASOS DE PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO).

O CÓDIGO ASME É DE USO GERAL OBRIGATÓRIO EM ALGUMAS REGIÕES DOS ESTADOS UNIDOS.

ADIANTE VEREMOS COM MAIS DETALHES O ESCOPO, A ABRANGÊNCIA E OS CRITÉRIOS DE CÁLCULO DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÕES 1 e 2.

A CADA 03 ANOS SÃO PUBLICADAS NORMALMENTE NOVAS EDIÇÕES DO CÓDIGO ASME (AS ATUAIS SÃO DE 2007), E DUAS VEZES POR ANO SÃO PUBLICADAS ADENDOS A ESSAS NORMAS.

- **2) INGLATERRA** - O PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO ESTÁ REGIDO DESDE 1976 PELA NORMA BS-5500, PUBLICADA PELA BRITISH STANDARDS INSTITUTION. ESSA NORMA SUBSTITUIU AS ANTIGAS NORMAS BS-1500 (VASOS DE PRESSÃO – PROJETO CONVENCIONAL) e BS-1515 (VASOS DE PRESSÃO – PROJETO AVANÇADO ALTERNATIVO). A NORMA BS-5500 ESTÁ EM GRANDE PARTE BASEADA NOS CRITÉRIOS DA NORMA INTERNACIONAL ISO.
- **3) ALEMANHA** - A NORMA CONHECIDA COMO “A.D. MERKBLATT”, DE USO LEGAL OBRIGATÓRIO NESTE PAÍS, É NA REALIDADE UM CONJUNTO DE NORMAS ABRANGENDO CADA UMA UM ASPECTO ESPECÍFICO DO PROJETO, EXIGÊNCIAS DE MATERIAIS, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO. ESSAS NORMAS SÃO PUBLICADAS POR UM GRUPO DE ASSOCIAÇÕES DENOMINADAS *ARBEITSGEMEINSCHAFT DRÜCKBEHALTER* (GRUPO DE TRABALHO PARA VASOS DE PRESSÃO), SOB A RESPONSABILIDADE PRINCIPAL DA TÜV (UNIÃO DAS ASSOCIAÇÕES DE INSPEÇÃO TÉCNICA).
- **4) FRANÇA** - CÓDIGO **SNCTTI**, ELABORADO SOB RESPONSABILIDADE DO **SYNDICAT NATIONALE DE LA CHAUDRONNERIE, TÔLERIE ET TUYAUTERIE INDUSTRIELLE**. ABRANGE OS VASOS DE PRESSÃO, NÃO SENDO DE USO LEGAL OBRIGATÓRIO.

**2.7.4 TENSÕES ADMISSÍVEIS E COEFICIENTES DE SEGURANÇA**

CHAMAM-SE TENSÕES ADMISSÍVEIS AS TENSÕES MÁXIMAS QUE SE ADOTAM PARA EFEITO DO CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO DAS DIVERSAS PARTES DE UM VASO DE PRESSÃO. É EVIDENTE QUE AS TENSÕES ADMISSÍVEIS DEVEM SER MENORES DO QUE OS LIMITES DE RESISTÊNCIA (RUPTURA) (**LR**) E DE ELASTICIDADE (**LE**) DO MATERIAL NA TEMPERATURA CONSIDERADA. A RELAÇÃO ENTRE OS LIMITES DE RESISTÊNCIA E DE ELASTICIDADE E A TENSÃO ADMISSÍVEL É O COEFICIENTE DE SEGURANÇA ADOTADO. AS TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA AS PARTES PRESSURIZADAS DOS VASOS SÃO VALORES FIXADOS PELAS NORMAS DE PROJETO PARA CADA CASO E CADA MATERIAL. COMO A RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS MATERIAIS DIMINUI COM O AUMENTO DA TEMPERATURA, AS TENSÕES ADMISSÍVEIS TAMBÉM SÃO CADA VEZ MENORES À MEDIDA QUE A TEMPERATURA DE TRABALHO DA PEÇA SE ELEVA ATÉ A TEMPERATURA LIMITE DE USO PRÁTICO DO MATERIAL. ASSIM, AS NORMAS (BS) 5500, 1500, 1515, 1520, 1525, 1530, 1535, 1540, 1545, 1550, 1555, 1560, 1565, 1570, 1575, 1580, 1585, 1590, 1595, 1600, 1605, 1610, 1615, 1620, 1625, 1630, 1635, 1640, 1645, 1650, 1655, 1660, 1665, 1670, 1675, 1680, 1685, 1690, 1695, 1700, 1705, 1710, 1715, 1720, 1725, 1730, 1735, 1740, 1745, 1750, 1755, 1760, 1765, 1770, 1775, 1780, 1785, 1790, 1795, 1800, 1805, 1810, 1815, 1820, 1825, 1830, 1835, 1840, 1845, 1850, 1855, 1860, 1865, 1870, 1875, 1880, 1885, 1890, 1895, 1900, 1905, 1910, 1915, 1920, 1925, 1930, 1935, 1940, 1945, 1950, 1955, 1960, 1965, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050, 2055, 2060, 2065, 2070, 2075, 2080, 2085, 2090, 2095, 2100, 2105, 2110, 2115, 2120, 2125, 2130, 2135, 2140, 2145, 2150, 2155, 2160, 2165, 2170, 2175, 2180, 2185, 2190, 2195, 2200, 2205, 2210, 2215, 2220, 2225, 2230, 2235, 2240, 2245, 2250, 2255, 2260, 2265, 2270, 2275, 2280, 2285, 2290, 2295, 2300, 2305, 2310, 2315, 2320, 2325, 2330, 2335, 2340, 2345, 2350, 2355, 2360, 2365, 2370, 2375, 2380, 2385, 2390, 2395, 2400, 2405, 2410, 2415, 2420, 2425, 2430, 2435, 2440, 2445, 2450, 2455, 2460, 2465, 2470, 2475, 2480, 2485, 2490, 2495, 2500, 2505, 2510, 2515, 2520, 2525, 2530, 2535, 2540, 2545, 2550, 2555, 2560, 2565, 2570, 2575, 2580, 2585, 2590, 2595, 2600, 2605, 2610, 2615, 2620, 2625, 2630, 2635, 2640, 2645, 2650, 2655, 2660, 2665, 2670, 2675, 2680, 2685, 2690, 2695, 2700, 2705, 2710, 2715, 2720, 2725, 2730, 2735, 2740, 2745, 2750, 2755, 2760, 2765, 2770, 2775, 2780, 2785, 2790, 2795, 2800, 2805, 2810, 2815, 2820, 2825, 2830, 2835, 2840, 2845, 2850, 2855, 2860, 2865, 2870, 2875, 2880, 2885, 2890, 2895, 2900, 2905, 2910, 2915, 2920, 2925, 2930, 2935, 2940, 2945, 2950, 2955, 2960, 2965, 2970, 2975, 2980, 2985, 2990, 2995, 3000, 3005, 3010, 3015, 3020, 3025, 3030, 3035, 3040, 3045, 3050, 3055, 3060, 3065, 3070, 3075, 3080, 3085, 3090, 3095, 3100, 3105, 3110, 3115, 3120, 3125, 3130, 3135, 3140, 3145, 3150, 3155, 3160, 3165, 3170, 3175, 3180, 3185, 3190, 3195, 3200, 3205, 3210, 3215, 3220, 3225, 3230, 3235, 3240, 3245, 3250, 3255, 3260, 3265, 3270, 3275, 3280, 3285, 3290, 3295, 3300, 3305, 3310, 3315, 3320, 3325, 3330, 3335, 3340, 3345, 3350, 3355, 3360, 3365, 3370, 3375, 3380, 3385, 3390, 3395, 3400, 3405, 3410, 3415, 3420, 3425, 3430, 3435, 3440, 3445, 3450, 3455, 3460, 3465, 3470, 3475, 3480, 3485, 3490, 3495, 3500, 3505, 3510, 3515, 3520, 3525, 3530, 3535, 3540, 3545, 3550, 3555, 3560, 3565, 3570, 3575, 3580, 3585, 3590, 3595, 3600, 3605, 3610, 3615, 3620, 3625, 3630, 3635, 3640, 3645, 3650, 3655, 3660, 3665, 3670, 3675, 3680, 3685, 3690, 3695, 3700, 3705, 3710, 3715, 3720, 3725, 3730, 3735, 3740, 3745, 3750, 3755, 3760, 3765, 3770, 3775, 3780, 3785, 3790, 3795, 3800, 3805, 3810, 3815, 3820, 3825, 3830, 3835, 3840, 3845, 3850, 3855, 3860, 3865, 3870, 3875, 3880, 3885, 3890, 3895, 3900, 3905, 3910, 3915, 3920, 3925, 3930, 3935, 3940, 3945, 3950, 3955, 3960, 3965, 3970, 3975, 3980, 3985, 3990, 3995, 4000, 4005, 4010, 4015, 4020, 4025, 4030, 4035, 4040, 4045, 4050, 4055, 4060, 4065, 4070, 4075, 4080, 4085, 4090, 4095, 4100, 4105, 4110, 4115, 4120, 4125, 4130, 4135, 4140, 4145, 4150, 4155, 4160, 4165, 4170, 4175, 4180, 4185, 4190, 4195, 4200, 4205, 4210, 4215, 4220, 4225, 4230, 4235, 4240, 4245, 4250, 4255, 4260, 4265, 4270, 4275, 4280, 4285, 4290, 4295, 4300, 4305, 4310, 4315, 4320, 4325, 4330, 4335, 4340, 4345, 4350, 4355, 4360, 4365, 4370, 4375, 4380, 4385, 4390, 4395, 4400, 4405, 4410, 4415, 4420, 4425, 4430, 4435, 4440, 4445, 4450, 4455, 4460, 4465, 4470, 4475, 4480, 4485, 4490, 4495, 4500, 4505, 4510, 4515, 4520, 4525, 4530, 4535, 4540, 4545, 4550, 4555, 4560, 4565, 4570, 4575, 4580, 4585, 4590, 4595, 4600, 4605, 4610, 4615, 4620, 4625, 4630, 4635, 4640, 4645, 4650, 4655, 4660, 4665, 4670, 4675, 4680, 4685, 4690, 4695, 4700, 4705, 4710, 4715, 4720, 4725, 4730, 4735, 4740, 4745, 4750, 4755, 4760, 4765, 4770, 4775, 4780, 4785, 4790, 4795, 4800, 4805, 4810, 4815, 4820, 4825, 4830, 4835, 4840, 4845, 4850, 4855, 4860, 4865, 4870, 4875, 4880, 4885, 4890, 4895, 4900, 4905, 4910, 4915, 4920, 4925, 4930, 4935, 4940, 4945, 4950, 4955, 4960, 4965, 4970, 4975, 4980, 4985, 4990, 4995, 5000, 5005, 5010, 5015, 5020, 5025, 5030, 5035, 5040, 5045, 5050, 5055, 5060, 5065, 5070, 5075, 5080, 5085, 5090, 5095, 5100, 5105, 5110, 5115, 5120, 5125, 5130, 5135, 5140, 5145, 5150, 5155, 5160, 5165, 5170, 5175, 5180, 5185, 5190, 5195, 5200, 5205, 5210, 5215, 5220, 5225, 5230, 5235, 5240, 5245, 5250, 5255, 5260, 5265, 5270, 5275, 5280, 5285, 5290, 5295, 5300, 5305, 5310, 5315, 5320, 5325, 5330, 5335, 5340, 5345, 5350, 5355, 5360, 5365, 5370, 5375, 5380, 5385, 5390, 5395, 5400, 5405, 5410, 5415, 5420, 5425, 5430, 5435, 5440, 5445, 5450, 5455, 5460, 5465, 5470, 5475, 5480, 5485, 5490, 5495, 5500, 5505, 5510, 5515, 5520, 5525, 5530, 5535, 5540, 5545, 5550, 5555, 5560, 5565, 5570, 5575, 5580, 5585, 5590, 5595, 5600, 5605, 5610, 5615, 5620, 5625, 5630, 5635, 5640, 5645, 5650, 5655, 5660, 5665, 5670, 5675, 5680, 5685, 5690, 5695, 5700, 5705, 5710, 5715, 5720, 5725, 5730, 5735, 5740, 5745, 5750, 5755, 5760, 5765, 5770, 5775, 5780, 5785, 5790, 5795, 5800, 5805, 5810, 5815, 5820, 5825, 5830, 5835, 5840, 5845, 5850, 5855, 5860, 5865, 5870, 5875, 5880, 5885, 5890, 5895, 5900, 5905, 5910, 5915, 5920, 5925, 5930, 5935, 5940, 5945, 5950, 5955, 5960, 5965, 5970, 5975, 5980, 5985, 5990, 5995, 6000, 6005, 6010, 6015, 6020, 6025, 6030, 6035, 6040, 6045, 6050, 6055, 6060, 6065, 6070, 6075, 6080, 6085, 6090, 6095, 6100, 6105, 6110, 6115, 6120, 6125, 6130, 6135, 6140, 6145, 6150, 6155, 6160, 6165, 6170, 6175, 6180, 6185, 6190, 6195, 6200, 6205, 6210, 6215, 6220, 6225, 6230, 6235, 6240, 6245, 6250, 6255, 6260, 6265, 6270, 6275, 6280, 6285, 6290, 6295, 6300, 6305, 6310, 6315, 6320, 6325, 6330, 6335, 6340, 6345, 6350, 6355, 6360, 6365, 6370, 6375, 6380, 6385, 6390, 6395, 6400, 6405, 6410, 6415, 6420, 6425, 6430, 6435, 6440, 6445, 6450, 6455, 6460, 6465, 6470, 6475, 6480, 6485, 6490, 6495, 6500, 6505, 6510, 6515, 6520, 6525, 6530, 6535, 6540, 6545, 6550, 6555, 6560, 6565, 6570, 6575, 6580, 6585, 6590, 6595, 6600, 6605, 6610, 6615, 6620, 6625, 6630, 6635, 6640, 6645, 6650, 6655, 6660, 6665, 6670, 6675, 6680, 6685, 6690, 6695, 6700, 6705, 6710, 6715, 6720, 6725, 6730, 6735, 6740, 6745, 6750, 6755, 6760, 6765, 6770, 6775, 6780, 6785, 6790, 6795, 6800, 6805, 6810, 6815, 6820, 6825, 6830, 6835, 6840, 6845, 6850, 6855, 6860, 6865, 6870, 6875, 6880, 6885, 6890, 6895, 6900, 6905, 6910, 6915, 6920, 6925, 6930, 6935, 6940, 6945, 6950, 6955, 6960, 6965, 6970, 6975, 6980, 6985, 6990, 6995, 7000, 7005, 7010, 7015, 7020, 7025, 7030, 7035, 7040, 7045, 7050, 7055, 7060, 7065, 7070, 7075, 7080, 7085, 7090, 7095, 7100, 7105, 7110, 7115, 7120, 7125, 7130, 7135, 7140, 7145, 7150, 7155, 7160, 7165, 7170, 7175, 7180, 7185, 7190, 7195, 7200, 7205, 7210, 7215, 7220, 7225, 7230, 7235, 7240, 7245, 7250, 7255, 7260, 7265, 7270, 7275, 7280, 7285, 7290, 7295, 7300, 7305, 7310, 7315, 7320, 7325, 7330, 7335, 7340, 7345, 7350, 7355, 7360, 7365, 7370, 7375, 7380, 7385, 7390, 7395, 7400, 7405, 7410, 7415, 7420, 7425, 7430, 7435, 7440, 7445, 7450, 7455, 7460, 7465, 7470, 7475, 7480, 7485, 7490, 7495, 7500, 7505, 7510, 7515, 7520, 7525, 7530, 7535, 7540, 7545, 7550, 7555, 7560, 7565, 7570, 7575, 7580, 7585, 7590, 7595, 7600, 7605, 7610, 7615, 7620, 7625, 7630, 7635, 7640, 7645, 7650, 7655, 7660, 7665, 7670, 7675, 7680, 7685, 7690, 7695, 7700, 7705, 7710, 7715, 7720, 7725, 7730, 7735, 7740, 7745, 7750, 7755, 7760, 7765, 7770, 7775, 7780, 7785, 7790, 7795, 7800, 7805, 7810, 7815, 7820, 7825, 7830, 7835, 7840, 7845, 7850, 7855, 7860, 7865, 7870, 7875, 7880, 7885, 7890, 7895, 7900, 7905, 7910, 7915, 7920, 7925, 7930, 7935, 7940, 7945, 7950, 7955, 7960, 7965, 7970, 7975, 7980, 7985, 7990, 7995, 8000, 8005, 8010, 8015, 8020, 8025, 8030, 8035, 8040, 8045, 8050, 8055, 8060, 8065, 8070, 8075, 8080, 8085, 8090, 8095, 8100, 8105, 8110, 8115, 8120, 8125, 8130, 8135, 8140, 8145, 8150, 8155, 8160, 8165, 8170, 8175, 8180, 8185, 8190, 8195, 8200, 8205, 8210, 8215, 8220, 8225, 8230, 8235, 8240, 8245, 8250, 8255, 8260, 8265, 8270, 8275, 8280, 8285, 8290, 8295, 8300, 8305, 8310, 8315, 8320, 8325, 8330, 8335, 8340, 8345, 8350, 8355, 8360, 8365, 8370, 8375, 8380, 8385, 8390, 8395, 8400, 8405, 8410, 8415, 8420, 8425, 8430, 8435, 8440, 8445, 8450, 8455, 8460, 8465, 8470, 8475, 8480, 8485, 8490, 8495, 8500, 8505, 8510, 8515, 8520, 8525, 8530, 8535, 8540, 8545, 8550, 8555, 8560, 8565, 8570, 8575, 8580, 8585, 8590, 8595, 8600, 8605, 8610, 8615, 8620, 8625, 8630, 8635, 8640, 8645, 8650, 8655, 8660, 8665, 8670, 8675, 8680, 8685, 8690, 8695, 8700, 8705, 8710, 8715, 8720, 8725, 8730, 8735, 8740, 8745, 8750, 8755, 8760, 8765, 8770, 8775, 8780, 8785, 8790, 8795, 8800, 8805, 8810, 8815, 8820, 8825, 8830, 8835, 8840, 8845, 8850, 8855, 8860, 8865, 8870, 8875, 8880, 8885, 8890, 8895, 8900, 8905, 8910, 8915, 8920, 8925, 8930, 8935, 8940, 8945, 8950, 8955, 8960, 8965, 8970, 8975, 8980, 8985, 8990, 8995, 9000, 9005, 9010, 9015, 9020, 9025, 9030, 9035, 9040, 9045, 9050, 9055, 9060, 9065, 9070, 9075, 9080, 9085, 9090, 9095, 9100, 9105, 9110, 9115, 9120, 9125, 9130, 9135, 9140, 9145, 9150, 9155, 9160, 9165, 9170, 9175, 9180, 9185, 9190, 9195, 9200, 9205, 9210, 9215, 9220, 9225, 9230, 9235, 9240, 9245, 9250, 9255, 9260, 9265, 9270, 9275, 9280, 9285, 9290, 9295, 9300, 9305, 9310, 9315, 9320, 9325, 9330, 9335, 9340, 9345, 9350, 9355, 9360, 9365, 9370, 9375, 9380, 9385, 9390, 9395, 9400, 9405, 9410, 9415, 9420, 9425, 9430, 9435, 9440, 9445, 9450, 9455, 9460, 9465, 9470, 9475, 9480, 9485, 9490, 9495, 9500, 9505, 9510, 9515, 9520, 9525, 9530, 9535, 9540, 9545, 9550, 9555, 9560, 9565, 9570, 9575, 9580, 9585, 9590, 9595, 9600, 9605, 9610, 9615, 9620, 9625, 9630, 9635, 9640, 9645, 9650, 9655, 9660, 9665, 9670, 9675, 9680, 9685, 9690, 9695, 9700, 9705, 9710, 9715, 9720, 9725, 9730, 9735, 9740, 9745, 9750, 9755, 9760, 9765, 9770, 9775, 9780, 9785, 9790, 9795, 9800, 9805, 9810, 9815, 9820, 9825, 9830, 9835, 9840, 9845, 9850, 9855, 9860, 9865, 9870, 9875, 9880, 9885, 9890, 9895, 9900, 9905, 9910, 9915, 9920, 9925, 9930, 9935, 9940, 9945, 9950, 9955, 9960, 9965, 9970, 9975, 9980, 9985, 9990, 9995, 10000, 10005, 10010, 10015, 10020, 10025, 10030, 10035, 10040, 10045, 10050, 10055, 10060, 10065, 10070, 10075, 10080, 10085, 10090, 10095, 10100, 10105, 10110, 10115, 10120, 10125, 10130, 10135, 10140, 10145, 10150, 10155, 10160, 10165, 10170, 10175, 10180, 10185, 10190, 10195, 10200, 10205, 10210, 10215, 10220, 10225, 10230, 10235, 10240, 10245, 10250, 10255, 10260, 10265, 10270, 10275, 10280, 10285, 10290, 10295, 10300, 10305, 10310, 10315, 10320, 10325, 10330, 10335, 10340, 10345, 10350, 10355, 10360, 10365, 10370, 10375, 10380, 10385, 10390, 10395, 10400, 10405, 10410, 10415, 10420, 10425, 10430, 10435, 10440, 10445, 10450, 10455, 10460, 10465, 10470, 10475, 10480, 10485, 10490, 10495, 10500, 10505, 10510, 10515, 105



- FREQUENTEMENTE O CÁLCULO É FEITO CONSIDERANDO-SE SOMENTE A PRESSÃO INTERNA (OU EXTERNA) E OS PESOS, IGNORANDO-SE, PORTANTO O EFEITO DE OUTROS CARREGAMENTOS PRESENTES (REAÇÕES DE APOIO DOS SUPORTES, ESFORÇOS DE TUBULAÇÃO, AÇÕES DINÂMICAS, ETC.) O COEFICIENTE DE SEGURANÇA TERÁ ASSIM DE COBRIR ESSA ABSTRAÇÃO DE CÁLCULO. EM GERAL É MUITO DIFÍCIL, OU ATÉ IMPOSSÍVEL, ESTABELECEM-SE COM RAZOÁVEL PRECISÃO A ORDEM DE GRANDEZA DE TODOS OS CARREGAMENTOS ATUANTES EM CADA PARTE DE UM VASO.
  - NA MAIORIA DAS VEZES SÃO ADOTADAS FÓRMULAS SIMPLES DE CÁLCULO, QUE FORNECEM COM ACEITÁVEL PRECISÃO SOMENTE AS TENSÕES NAS ÁREAS DE MEMBRANA. PARA AS OUTRAS PARTES DO VASO, A MARGEM DE ERRO RESULTANTE DESSES CÁLCULOS SIMPLES PODE SER GRANDE, E O COEFICIENTE DE SEGURANÇA TERÁ DE LEVAR EM CONTA ESSE FATO.
- **TIPO DE CARREGAMENTO** – OS ESFORÇOS REPETIDOS OU ALTERNADOS, ASSIM COMO OS CHOQUES, VIBRAÇÕES E OUTROS ESFORÇOS DINÂMICOS, PODEM CAUSAR A RUPTURA POR FADIGA MECÂNICA, COM TENSÕES MENORES DO QUE OS ESFORÇOS ESTÁTICOS, EXIGINDO, PORTANTO, MAIORES COEFICIENTES DE SEGURANÇA. AS TENSÕES ADMISSÍVEIS QUE CONSTAM NAS TABELAS DAS NORMAS REFEREM-SE SEMPRE A ESFORÇOS ESTÁTICOS, ALGUMAS NORMAS FORNECEM ENTRETANTO CRITÉRIOS DE CÁLCULO DE FADIGA OU COEFICIENTES DE REDUÇÃO DE TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA ALGUNS TIPOS DE ESFORÇOS VARIÁVEIS E DINÂMICOS.
- **DESVIOS ENTRE O FORMATO TEÓRICO E O FORMATO REAL** – POR MAIS CUIDADOSA QUE SEJA A FABRICAÇÃO, SEMPRE OCORRERÃO DESVIOS ENTRE AS DIMENSÕES E FORMAS TEÓRICAS DE PROJETO E AS FINAIS DAS DIVERSAS PARTES DO VASO ACABADO. ESSES DEFEITOS SÃO POR EXEMPLO, OVALIZAÇÃO DE PEÇAS CILÍNDRICAS POR CALANDRAGEM IMPERFEITA, ERROS DE CONFORMAÇÃO DE TAMPOS ELÍPTICOS, TORIESFÉRICOS OU HEMISFÉRICOS, DESALINHAMENTO EM SOLDAS DE TOPO, ADELGAÇAMENTO DE CHAPAS RESULTANTE DE Prensagem ou REBORDEAMENTO, SOLDAS COM PENETRAÇÃO PARCIAL OU COM REFORÇO EXCESSIVO. TODOS ESSES DESVIOS DE FORMA TERÃO COMO CONSEQÜÊNCIA UMA DISTRIBUIÇÃO REAL DE TENSÕES DIFERENTES DA TEÓRICA.
- **INCERTEZA NAS QUALIDADES DO MATERIAL** – A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS MATERIAIS (LIMITES DE RESISTÊNCIA, LIMITE DE ELASTICIDADE, ETC.), EM FUNÇÃO DAS QUAIS É FIXADA A TENSÃO ADMISSÍVEL DE CÁLCULO, É SEMPRE BASEADA EM ENSAIOS ESTATÍSTICOS. ISTO É, DETERMINAM-SE EXPERIMENTALMENTE ESSAS CARACTERÍSTICAS EM CORPOS DE PROVA QUE ESTATISTICAMENTE REPRESENTAM UMA CERTA QUANTIDADE DE MATERIAL. É QUASE CERTO, PORTANTO, QUE ALGUMAS PARCELAS DO MATERIAL TENHAM CARACTERÍSTICAS INFERIORES ÀS SUPOSTAS. ESSA INCERTEZA TORNA-SE MAIOR NO QUE SE REFERE ÀS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL EM TEMPERATURAS ELEVADAS, ALÉM DO QUE, PODEM OCORRER DEFEITOS LOCAIS, TAIS COMO DUPLA LAMINAÇÃO, INCLUSÕES, ETC, E NESES PONTOS A RESISTÊNCIA DO MATERIAL SERÁ MENOR.

- **GRAU DE SEGURANÇA NECESSÁRIO** – OS COEFICIENTES DE SEGURANÇA DEPENDEM TAMBÉM DO MAIOR OU MENOR RISCO POTENCIAL DO VASO. OS VASOS DE PRESSÃO PARA OS QUAIS UMA FALHA OU ACIDENTE ENVOLVA GRANDE RISCO, COM PREJUÍZOS PESSOAIS OU MATERIAIS, DEVEM TER MAIORES COEFICIENTES DE SEGURANÇA.

- **Segurança:** Equipamentos de grande periculosidade envolvendo sério risco humano e material exigem elevados fatores de segurança;
- **Temperatura:** A resistência mecânica de um material diminui com o aumento de temperatura e conseqüentemente a tensão admissível também cairá. Em temperaturas baixas o comportamento de vários materiais se altera, peças que sofreriam uma fratura dúctil em temperatura ambiente passam a sofrer fratura frágil com o abaixamento dessa temperatura.

### 2.7.4.1 CRITÉRIO DE ESCOAMENTO

EM UM ENSAIO DE TRAÇÃO SIMPLES EXISTE UM PONTO DETERMINADO NO DIAGRAMA TENSÃO x DEFORMAÇÃO EM QUE O MATERIAL INICIA A SE DEFORMAR PLASTICAMENTE. NESSE CASO A TENSÃO É UNIAXIAL.

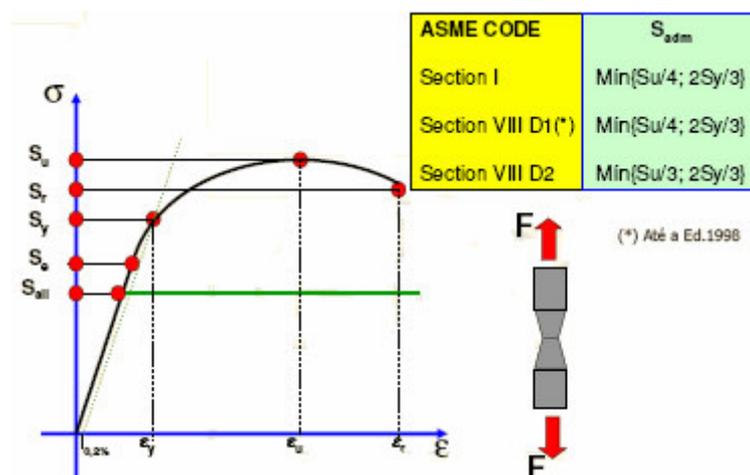
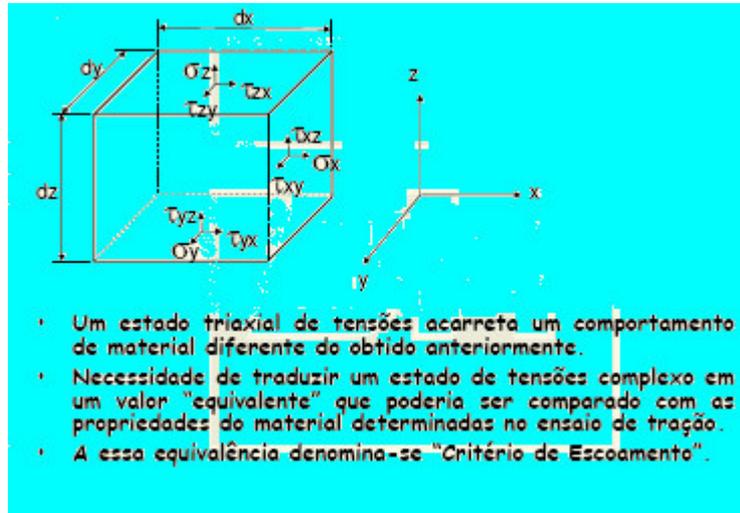
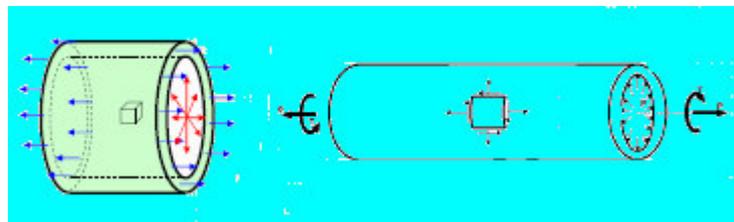


DIAGRAMA TENSÃO x DEFORMAÇÃO CONVENCIONAL

A OCORRÊNCIA DE UM ESTADO **TRIAxIAL** DE TENSÕES ACARRETA UM COMPORTAMENTO DE MATERIAL DIFERENTE DO OBTIDO ANTERIORMENTE. EXISTE, PORTANTO A NECESSIDADE DE TRADUZIR UM ESTADO DE TENSÕES COMPLEXO EM UM VALOR “EQUIVALENTE” QUE PODERIA SER COMPARADO COM AS PROPRIEDADES DO MATERIAL DETERMINADAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO. A ESSA EQUIVALÊNCIA DENOMINA-SE “**CRITÉRIO DE ESCOAMENTO**”.



CONSIDERE COMO EXEMPLO O CILINDRO DE PAREDE FINA QUE ESTÁ SUBMETIDO A UM ESFORÇO DE TRAÇÃO  $P$ , UM MOMENTO DE TORÇÃO  $T$  E UMA PRESSÃO  $p$ .



### COMBINAÇÃO DE TENSÕES EM UM CILINDRO DE PAREDE FINA

PELA VARIAÇÃO DE PRESSÃO, FORÇA AXIAL E MOMENTO DE TORÇÃO É POSSÍVEL OBTER VÁRIAS COMBINAÇÕES DE TENSÕES, QUE RESULTAM EM DIFERENTES DIREÇÕES PRINCIPAIS. COMO DETERMINAR SE UMA COMBINAÇÃO DE CARREGAMENTOS QUALQUER GERA PLASTIFICAÇÃO NO CILINDRO?

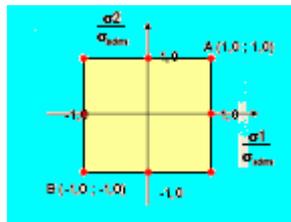
OS CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO SÃO REPRESENTAÇÕES DESSES ESTADOS DE TENSÕES DE ACORDO COM DIVERSAS TEORIAS DE PLASTIFICAÇÃO. SERÃO APRESENTADOS 03 CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO: **TEORIA DA TENSÃO MÁXIMA OU CRITÉRIO DE RANKINE**, **TEORIA DA TENSÃO CISHANTE MÁXIMA OU CRITÉRIO DE TRESCA** E A **TEORIA DE ENERGIA DE DISTORÇÃO OU CRITÉRIO DE VON MISES**.

➤ **TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO NORMAL OU CRITÉRIO DE RANKINE**

ESTA TEORIA ASSUME QUE O ESCOAMENTO VAI OCORRER QUANDO A MÁXIMA TENSÃO ATUANTE EM UM MATERIAL ATINGIR A TENSÃO DE ESCOAMENTO DO MATERIAL. PARA UM MATERIAL QUE POSSUA OS MESMOS VALORES PARA O ESCOAMENTO À TRAÇÃO E À COMPRESSÃO, TEMOS:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow \sigma_1 = \pm \sigma_y$$

A REPRESENTAÇÃO GRÁFICA PARA UM ESTADO BIAxIAL DE TENSÕES É DADA PELA FIGURA ABAIXO:



- O escoamento vai ocorrer quando a máxima tensão atuante em um material atingir a tensão de escoamento do material. Para um material que possua os mesmos valores para o escoamento à tração e à compressão, temos :

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow \sigma_1 = \pm \sigma_y$$

- A representação gráfica para um estado biaxial de tensões é dada por um quadrado.

➤ **TEORIA DA TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA OU CRITÉRIO DE TRESCA**

ESTA TEORIA ASSUME QUE O ESCOAMENTO VAI OCORRER QUANDO A MÁXIMA TENSÃO CISALHANTE EM UM MATERIAL, SUBMETIDO A UMA COMBINAÇÃO QUALQUER DE CARGAS, ATINGIR A METADE DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DO MATERIAL.

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_y / 2$$

UTILIZANDO-SE O CÍRCULO DE MOHR, VERIFICA-SE QUE T MAX PODE SER DADO POR:

T MAX =  $\sigma_1 - \sigma_2 / 2$ , PARA UM ESTADO BIAxIAL DE TENSÕES.

GENERALIZANDO TEMOS QUE:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_y \quad \text{OU} \quad \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= + \sigma_y \\ \sigma_1 - \sigma_2 &= - \sigma_y \end{aligned}$$



• O escoamento vai ocorrer quando a máxima tensão cisalhante em um material atingir a metade da tensão de escoamento do material.  $\tau_{m\acute{a}x} = \sigma_y/2$

• Círculo de Mohr :  $\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$

para um estado biaxial de tensões.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_y \quad \text{ou} \quad \begin{matrix} \sigma_1 - \sigma_2 = + \sigma_y \\ \sigma_1 - \sigma_2 = - \sigma_y \end{matrix}$$

• A representação gráfica para um estado biaxial de tensões é dada por um losango.

### ➤ TEORIA DE ENERGIA DE DISTORÇÃO OU CRITÉRIO DE VON MISES

SEGUNDO ESTE CRITÉRIO O ESTADO LIMITE PARA O ESCOAMENTO OCORRE QUANDO A ENERGIA DE DISTORÇÃO SE IGUALA À ENERGIA DE DISTORÇÃO QUANDO DO ESCOAMENTO DO MATERIAL EM UM ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL. A ENERGIA DE DISTORÇÃO É DADA PELA EQUAÇÃO ABAIXO.

$$U_d = \frac{I_2}{2.6}$$

ONDE:

$G = E/2(1+\nu)$  - módulo de cisalhamento.

$I_2$  - invariante de tensões

O INVARIANTE DE TENSÕES PODE SER EXPRESSO DA SEGUINTE FORMA:

$$I_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

NA CONDIÇÃO DE TRAÇÃO UNIAXIAL, TEMOS:

$$\begin{matrix} \sigma_1 = \sigma_y & \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \\ I_2 = \sigma_y^2 / 3 \end{matrix}$$

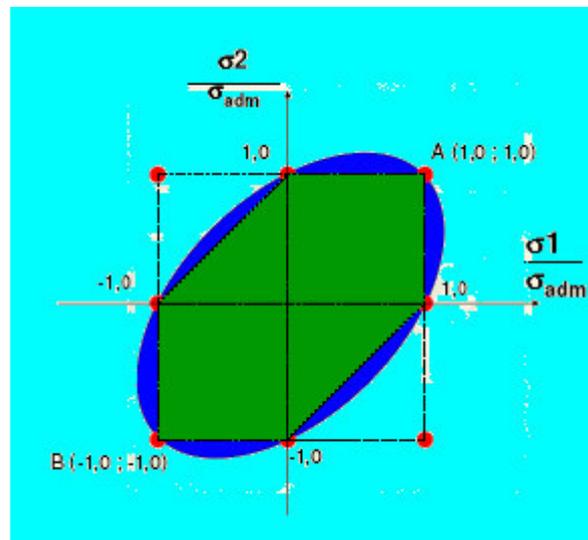
PORTANTO O CRITÉRIO DE VON MISES PODE SER ESCRITO COMO:

$$\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] = \frac{\sigma_y^2}{3}$$

PARA UM ESTADO BIAIXIAL DE TENSÕES:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2$$

A REPRESENTAÇÃO GRÁFICA PARA UM ESTADO BIAIXIAL DE TENSÕES É DADA POR UMA ELIPSE.



### REPRESENTAÇÃO GRÁFICA:

- **QUADRADO: TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO NORMAL OU CRITÉRIO DE RANKINE;**
- **POLÍGONO (VERDE): TEORIA DA TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA OU CRITÉRIO DE TRESCA;**
- **ELIPSE: TEORIA DE ENERGIA DE DISTORÇÃO OU CRITÉRIO DE VON MISES.**

#### 2.7.4.2 CATEGORIAS DE TENSÕES EM UM VASO DE PRESSÃO (ASME SÉC. VIII, DIV.2 APÊ.4)

AS TENSÕES QUE PODEM ESTAR ATUANDO NA PAREDE DE PRESSÃO DE UM VASO, EM CONSEQÜÊNCIA DOS DIVERSOS CARREGAMENTOS SOLICITANTES, PODEM SER CLASSIFICADAS EM TRÊS CATEGORIAS GERAIS: **TENSÕES PRIMÁRIAS, TENSÕES SECUNDÁRIAS E TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS.**

AS TENSÕES PRIMÁRIAS SÃO AS ÚNICAS SEMPRE CONSIDERADAS NOS CÁLCULOS POR TODAS AS NORMAS DE PROJETO, AS OUTRAS DUAS CATEGORIAS DE TENSÕES SÃO LEVADAS EM CONSIDERAÇÃO NOS CÁLCULOS APENAS POR ALGUMAS NORMAS, E A ELAS SÃO ATRIBUÍDAS, NESSE CASO, TENSÕES ADMISSÍVEIS DIFERENTES DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA AS TENSÕES PRIMÁRIAS.

### 2.7.4.3 TENSÕES PRIMÁRIAS

DENOMINAM-SE TENSÕES PRIMÁRIAS (*PRIMARY STRESS*) AS TENSÕES QUE SE DESENVOLVEM NO MATERIAL PARA SATISFAZER AS CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO ESTÁTICO EM RELAÇÃO AOS DIVERSOS CARREGAMENTOS ATUANTES (PRESSÃO INTERNA OU EXTERNA, PESOS, AÇÃO DO VENTO, ETC.). AS TENSÕES PRIMÁRIAS PODEM SER NORMAIS (DE TRAÇÃO OU DE COMPRESSÃO) OU DE CISALHAMENTO, ISTO É, PARALELAS OU PERPENDICULARES À PAREDE DO VASO, RESPECTIVAMENTE.

AS TENSÕES PRIMÁRIAS NORMAIS PODEM AINDA SER DE MEMBRANA OU DE FLEXÃO. A TENSÃO DE MEMBRANA É A COMPONENTE DA TENSÃO PRIMÁRIA QUE É SUPOSTA CONSTANTE AO LONGO DE TODA A ESPESSURA DA PAREDE DO VASO. É, PORTANTO O VALOR QUE SE OBTÉM PARA ESSA TENSÃO QUANDO SE CONSIDERA NO CÁLCULO A ESPESSURA DA PAREDE COMO SENDO NULA, QUANDO A ESPESSURA NÃO É NULA, TEREMOS, ALÉM DA TENSÃO DE MEMBRANA, AS TENSÕES DE FLEXÃO.

A TENSÃO DE MEMBRANA DEVIDO À PRESSÃO INTERNA É SEMPRE UMA TRAÇÃO, PORQUE O ELEMENTO DE PAREDE DO VASO TENDE A AUMENTAR DE DIMENSÕES. AS TENSÕES DE FLEXÃO APARECEM PORQUE O RAIOS DE CURVATURA DA PAREDE AUMENTA (E, PORTANTO, A CURVATURA DIMINUI), COMO CONSEQÜÊNCIA DA DEFORMAÇÃO DIAMETRAL DECORRENTE DA PRESSÃO INTERNA. A TENSÃO DE FLEXÃO TEM UM VALOR VARIÁVEL AO LONGO DA ESPESSURA DA PAREDE, SENDO NULA NO CENTRÓIDE DA PAREDE, PARA A PRESSÃO INTERNA ESSA TENSÃO É MÁXIMA DE TRAÇÃO NA SUPERFÍCIE INTERNA E MÁXIMA DE COMPRESSÃO NA SUPERFÍCIE EXTERNA. ASSIM, A TENSÃO RESULTANTE NA SUPERFÍCIE INTERNA SERÁ A TENSÃO DE MEMBRANA MAIS A TENSÃO DE FLEXÃO, E NA SUPERFÍCIE EXTERNA SERÁ A TENSÃO DE MEMBRANA MENOS A TENSÃO DE FLEXÃO. AS TENSÕES DE FLEXÃO SÃO TANTO MAIORES QUANTO MAIOR FOR A ESPESSURA DA PAREDE. QUANDO O DIÂMETRO DO VASO É MUITO GRANDE EM RELAÇÃO À ESPESSURA, AS TENSÕES DE FLEXÃO SÃO PEQUENAS, E PODE-SE CONFUNDIR, SEM GRANDE ERRO, A TENSÃO MÁXIMA NA PAREDE COM A TENSÃO DE MEMBRANA: ESSE É O CRITÉRIO ADOTADO POR VÁRIAS NORMAS DE PROJETO.

#### A - Tensões primárias :

- Necessárias para satisfazer as leis de equilíbrio da estrutura, desenvolvidas pela ação de carregamentos impostos. Principal característica : não é auto-limitante, enquanto o carregamento estiver sendo aplicado a tensão continua atuando não sendo aliviada por deformações da estrutura.
- Como exemplo temos as tensões de membrana circunferenciais e longitudinais em vasos cilíndricos submetidos ao carregamento de pressão interna.

- Podem ser de membrana ou de flexão.
- Tensão de membrana: componente constante através de toda a espessura da parede do vaso.
- Tensões de flexão: resultantes da flexão das paredes do equipamento, e são variáveis através da espessura, sendo proporcionais a distância do ponto em que estão sendo analisadas ao centróide da seção considerada.
- Exemplos : tensão de membrana num casco cilíndrico ou tensões de flexão no centro de um tampo plano causadas pela pressão interna.

QUANTO ÀS TENSÕES PRIMÁRIAS DE MEMBRANA, DISTINGUEM-SE AINDA AS DENOMINADAS **TENSÃO GERAL** E **TENSÕES LOCAIS**.

TENSÃO GERAL É A TENSÃO DISTRIBUÍDA EM TODA A PAREDE OU EM GRANDE PARTE DELA.

AS TENSÕES LOCAIS SÃO AS TENSÕES QUE ATUAM EM UMA REGIÃO LIMITADA DA PAREDE DO VASO, COMO POR EXEMPLO, AS TENSÕES RESULTANTES DA REAÇÃO DE APOIO DOS SUPORTES DO PRÓPRIO VASO.

A CARACTERÍSTICA BÁSICA DE TODAS AS TENSÕES PRIMÁRIAS É O FATO DE NÃO SEREM AUTO-LIMITANTES, NEM ALIVIADAS EM CONSEQÜÊNCIA DE DEFORMAÇÕES, EM OPOSIÇÃO ÀS TENSÕES SECUNDÁRIAS, COMO SERÁ VISTO.

• As tensões primárias de membrana são classificadas em tensões gerais de membrana, caso estejam atuando em todo o equipamento, e em tensões locais de membrana, caso estejam atuando numa parte limitada do equipamento. Uma tensão pode ser considerada como local se a distância na direção meridional, na qual a intensidade de tensões ultrapassa  $1,1.S_m$  não excede  $(R.t)^{1/2}$ . Um exemplo é a tensão de membrana no casco de um vaso causada por força ou momento num bocal.

#### 2.7.4.4 TENSÕES SECUNDÁRIAS

AS TENSÕES SECUNDÁRIAS (SECONDARY STRESS) SÃO AS QUE RESULTAM NÃO DE CARREGAMENTOS ATUANTES SOBRE O MATERIAL, MAS DE RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS NO PRÓPRIO VASO, OU EM ESTRUTURAS A ELE SOLIDÁRIAS, INCLUSIVE AS TENSÕES RESULTANTES DE DILATAÇÕES DIFERENCIAIS. EM OUTRAS PALAVRAS, ESSAS TENSÕES SÃO DEVIDAS AO FATO DE AS DIVERSAS PARTES DO VASO NÃO SEREM INTEIRAMENTE LIVRES DE SE DEFORMAR E/OU SE DILATAR.

AS TENSÕES SECUNDÁRIAS APARECEM, POR EXEMPLO, EM TODAS AS REGIÕES DE TRANSIÇÃO DE UM FORMATO PARA OUTRO (CILINDRO-TAMPO, CILINDRO-CONE, CILINDRO-CILINDRO, ETC), EM TODAS AS REGIÕES DE TRANSIÇÃO DE ESPESSURA, BEM COMO EM TODAS AS PARTE S DO VASO QUE NÃO SEJAM LIVRES DE DEFORMAR-SE OU DE SE DILATAR OU SE CONTRAIR.

#### 2.7.4.5 TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS

AS TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS (*PEAK-STRESS*), COMO O PRÓPRIO NOME INDICA, SÃO OS VALORES MÁXIMOS LOCAIS DAS TENSÕES EM UMA REGIÃO LIMITADA ONDE OCORRA UMA CONCENTRAÇÕES DE TENSÕES.

ESSAS CONCENTRAÇÕES DE TENSÕES DÃO-SE PRINCIPALMENTE DEVIDO A DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS NO VASO (REGIÕES DE TRANSIÇÃO DE FORMATO, ABERTURAS, REFORÇOS LOCAIS, SUPORTES, ETC,) INCLUSIVE DE DESCONTINUIDADES LOCALIZADAS DE PEQUENA EXTENSÃO, TAIS COMO SOLDAS COM PENETRAÇÃO PARCIAL, REFORÇOS DE SOLDA, DESALINHAMENTOS EM SOLDAS, ETC.

AS TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS EMBORA POSSAM ATINGIR VALORES ELEVADOS, EM GERAL NÃO SÃO PERIGOSAS PELO FATO DE ATUAREM EM ÁREAS MUITO PEQUENAS, SENDO POR ESSE MOTIVO DESPREZÍVEIS AS DEFORMAÇÕES CAUSADAS.



É, ENTRETANTO, NECESSÁRIO EVITAR VALORES MUITO ALTOS DESSAS TENSÕES PORQUE PODEM DAR ORIGEM A TRINCAS POR FADIGA OU POR CORROSÃO SOB TENSÃO, ASSIM COMO INICIAR UMA FRATURA FRÁGIL NO MATERIAL.

SÃO TAMBÉM CLASSIFICADAS NESSA CATEGORIA ALGUMAS TENSÕES QUE PELA SUA PRÓPRIA NATUREZA NÃO POSSAM CAUSAR DEFORMAÇÕES SENSÍVEIS, EMBORA ATUEM SOBRE UMA GRANDE ÁREA. É O CASO, POR EXEMPLO, DAS TENSÕES RESULTANTES DE DIFERENÇAS DE COEFICIENTES DE DILATAÇÃO ENTRE CHAPA BASE E UM REVESTIMENTO METÁLICO.

### **2.7.4.6 RELAXAMENTO ESPONTÂNEO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS**

O FENÔMENO DE AUTOLIMITAÇÃO DAS TENSÕES SECUNDÁRIAS É O QUE SE DENOMINA DE RELAXAMENTO ESPONTÂNEO (*SHAKEDOWN*).

VEJAMOS, POR EXEMPLO, O QUE SE PASSA COM AS TENSÕES DE DILATAÇÃO EM UMA PEÇA SUJEITA A UMA RESTRIÇÃO GEOMÉTRICA, DE FORMA QUE SEJA COMPLETAMENTE IMPEDIDA DE DILATAR. SE A PEÇA FOR AQUECIDA, TENDERÁ A SE DILATAR, E A DILATAÇÃO CONTIDA CAUSARÁ UMA DEFORMAÇÃO NA PRÓPRIA PEÇA E NOS PONTOS DE FIXAÇÃO TENDENDO A AFASTÁ-LOS. COMO TODAS ESTAS DEFORMAÇÕES DÃO COMO RESULTADO UM COMPRIMENTO MAIOR PARA A PEÇA, A CONSEQÜÊNCIA SERÁ UMA REDUÇÃO NO NÍVEL DE TENSÕES. O MAIOR VALOR POSSÍVEL PARA ESSAS TENSÕES É O LIMITE DE ELASTICIDADE DO MATERIAL. ATINGIDO ESSE LIMITE, A TENSÃO FICARÁ ESTÁVEL, E AS DEFORMAÇÕES PASSARÃO A SER PERMANENTES. SE O AQUECIMENTO AUMENTAR, AS DEFORMAÇÕES AUMENTARÃO, MANTENDO-SE AS TENSÕES NO VALOR DO LIMITE DE ELASTICIDADE. NO FINAL DO AQUECIMENTO, QUANDO A PEÇA FOR RESFRIADA, TEREMOS UMA CONTRAÇÃO QUE CAUSARÁ TENSÕES E DEFORMAÇÕES DE SINAL CONTRÁRIO. CASO A TENSÃO, NO AQUECIMENTO, NÃO TENHA ATINGIDO O LIMITE DE ELASTICIDADE, NÃO HAVERÁ DEFORMAÇÃO PERMANENTE, E A PEÇA VOLTARÁ À SUA FORMA E DIMENSÕES PRIMITIVAS. CASO ENTRETANTO TENHA HAVIDO DEFORMAÇÕES PERMANENTES, A PEÇA, AO SE RESFRIAR, FICARÁ COM UMA TENSÃO RESIDUAL NEGATIVA, CUJO VALOR MÁXIMO POSSÍVEL SERÁ TAMBÉM O LIMITE DE ELASTICIDADE. ASSIM, A AMPLITUDE MÁXIMA TOTAL DE VARIAÇÃO DAS TENSÕES SERÁ O DOBRO DE **LE**. FENÔMENOS SEMELHANTES OCORRERÃO COM DEFORMAÇÕES NO VASO CONSEQÜENTES DA DILATAÇÃO PRÓPRIA DE TUBULAÇÕES OU DE OUTRAS ESTRUTURAS EXTERNAS SOLIDÁRIAS AO VASO. A TENSÃO TAMBÉM SE ALIVIA PORQUE ESSAS DEFORMAÇÕES RESULTAM IGUALMENTE EM MAIOR COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO OU DA ESTRUTURA.

O RELAXAMENTO ESPONTÂNEO OCORRE TAMBÉM COM AS TENSÕES DE FLEXÃO NAS REGIÕES DE DESCONTINUIDADE DE FORMA GEOMÉTRICA. NESSE CASO, AS TENSÕES SE ALIVIAM PORQUE AS DEFORMAÇÕES ACONTECEM NO SENTIDO DE ATENUAR ESSAS DESCONTINUIDADES.

EM TODOS OS CASOS, QUANTO MAIS FORTE FOR A TRANSIÇÃO DE FORMA GEOMÉTRICA OU DE ESPESSURA, MAIORES SERÃO AS TENSÕES SECUNDÁRIAS E MAIORES SERÃO TAMBÉM AS DEFORMAÇÕES RESULTANTES. POR ESSE MOTIVO, TODAS AS NORMAS DE PROJETO FAZEM UMA SÉRIE DE EXIGÊNCIAS QUANTO A DETALHES DE VASOS DE PRESSÃO, NO SENTIDO DE ATENUAR ESSAS TRANSIÇÕES DE FORMA E DE ESPESSURA, LIMITANDO ASSIM TENSÕES E DEFORMAÇÕES. TAIS SÃO, POR EXEMPLO, AS EXIGÊNCIAS DE TRANSIÇÃO GRADUAL DE ESPESSURA ENTRE CHAPAS DE ESPESSURAS DIFERENTES, DE RAIOS MÍNIMOS EM SEÇÕES TOROIDAIS, DE REFORÇOS EM TRANSIÇÕES CÔNICAS.

É FÁCIL DE SE ENTENDER QUE AS TENSÕES PRIMÁRIAS, COMO SÃO DECORRENTES DE CARREGAMENTOS EXTERNOS AO MATERIAL, NÃO SE ALIVIAM EM CONSEQÜÊNCIA DE DEFORMAÇÕES, QUAISQUER QUE SEJAM ESSAS DEFORMAÇÕES, PORQUE AS CARGAS PERMANECEM AS MESMAS.

O FATO DE AS TENSÕES SECUNDÁRIAS SEREM AUTOLIMITANTES E ALIVIÁVEIS EXPLICA A RAZÃO PELA QUAL ALGUMAS NORMAS DE PROJETO NÃO CONSIDERAM AS TENSÕES SECUNDÁRIAS, E AS NORMAS QUE LEVAM EM CONTA ESSA TENSÕES ADOTAM PARA ELAS TENSÕES ADMISSÍVEIS MAIS ELEVADAS DO QUE AS ESTABELECIDAS PARA AS TENSÕES PRIMÁRIAS.

### 2.7.5 CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1

A DIVISÃO 1, DA SEÇÃO VIII, DO CÓDIGO ASME É UMA REVISÃO DA ANTIGA SEÇÃO VIII, PROPRIAMENTE DITA, E É A NORMA DE VASOS DE PRESSÃO DE USO MAIS DIFUNDIDO AQUI NO BRASIL E EM GRANDE PARTE DO MUNDO.

ESTÃO INCLUÍDOS NO ESCOPO DESSA NORMA VASOS DE PRESSÃO DE QUALQUER CLASSE, COM AS SEGUINTE **EXCEÇÕES**:

- VASOS SUJEITOS A CHAMA E VASOS PARA OCUPAÇÃO HUMANA;
- VASOS COM PRESSÕES DE OPERAÇÃO ENTRE ZERO E 15 PSIG (~1 KG/CM<sup>2</sup>), OU ACIMA DE 3.000 PSIG (~200 KG/CM<sup>2</sup>);
- VASOS COM DIÂMETRO DE 6" OU MENOS;
- VASOS PARA ÁGUA PRESSURIZADA COM PRESSÃO DE OPERAÇÃO ATÉ 300 PSIG (~20 KG/CM<sup>2</sup>) E TEMPERATURA ATÉ 210°F (99°C);
- VASOS PARA ÁGUA QUENTE COM CAPACIDADE DE ATÉ 120 GALÕES (0,454 M<sup>3</sup>), TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO ATÉ 200°F (93°C) E CARGA TÉRMICA ATÉ 200.000 BTU.

ESTÃO TAMBÉM INCLUÍDOS NA DIVISÃO 1 DA SEÇÃO VIII OS EVAPORADORES E OS TROCADORES DE CALOR ONDE HÁ GERAÇÃO DE VAPOR, E OUTROS VASOS NOS QUAIS EVENTUALMENTE OU EM CONJUNTO COM OUTROS PROCESSOS POSSA HAVER GERAÇÃO DE VAPOR, **DESDE QUE NÃO SUJEITOS À CHAMA**, E ATENDENDO AOS ITENS PG59 e PG61, DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO 1.

ESSA FORMA ABRANGE EXIGÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES SOBRE MATERIAIS, PROJETO, CÁLCULO, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO.

O CRITÉRIO DE CÁLCULO ADOTADO É, EM RESUMO, O SEGUINTE:

AS ESPESSURAS DE PAREDE DEVEM SER CALCULADAS DE FORMA QUE A TENSÃO DE MEMBRANA MÁXIMA CIRCUNFERENCIAL (*HOOP-STRESS*) DEVIDO À PRESSÃO INTERNA NÃO ULTRAPASSE OS SEGUINTE LIMITES (DE ACORDO COM O AP. 1, DA SEÇÃO II, DO CÓDIGO ASME - PARTE D):

- TEMPERATURAS ABAIXO DA FAIXA DE FLUÊNCIA, O MENOR DESTES DOIS VALORES:  
**LR/3,5 e LE/1,5,**
- TEMPERATURAS DENTRO DA FAIXA DE FLUÊNCIA, O MENOR DOS SEGUINTE VALORES:
  - **LR/3,5 ;**
  - **LE/1,5 ;**
  - **TENSÃO MÉDIA QUE CAUSA UMA DEFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA DE 0,01% EM 1000 HORAS;**
  - **2/3 DA TENSÃO MÉDIA DE RUPTURA POR FLUÊNCIA EM 100.000 HORAS,**
  - **80% DA TENSÃO MÍNIMA DE RUPTURA POR FLUÊNCIA EM 100.000 HORAS.**



EM TODOS ESSES CASOS, **LR** É O VALOR MÍNIMO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA DO MATERIAL NA TEMPERATURA CONSIDERADA, E **LE** É O VALOR MÍNIMO DO LIMITE DE ELASTICIDADE, OU A TENSÃO QUE CAUSA UMA DEFORMAÇÃO DE 0,2%, AMBOS NA TEMPERATURA CONSIDERADA. PARA ALGUNS MATERIAIS A TENSÃO ADMISSÍVEL É CONSIDERADA CONSTANTE NO INTERVALO DE TEMPERATURA ENTRE -20°F E 650°F (-29°C A 343°C).

NOTE-SE QUE O LIMITE DE DEFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA É UM VALOR FIXO NÃO LEVANDO EM CONTA O MAIOR OU MENOR TEMPO DE VIDA ÚTIL PREVISTO PARA O VASO. PARA OS COMPONENTES DO VASO QUE OBEDEÇAM EXATAMENTE A ALGUMA NORMA DIMENSIONAL QUE FORNEÇA VALORES DE PRESSÃO ADMISSÍVEL (COMO É O CASO, POR EXEMPLO, DA NORMA ASME B.16.5 PARA FLANGES DE AÇO FORJADO), A DIVISÃO 1 ACEITA ESSES VALORES, NÃO SENDO, PORTANTO NECESSÁRIO CALCULAR ESSAS PEÇAS.

ESSA NORMA CONTÉM UMA SÉRIE DE FÓRMULAS SIMPLES DE CÁLCULO DANDO A ESPESSURA NECESSÁRIA DE CASCOS E TAMPOS, EM FUNÇÃO DA PRESSÃO INTERNA OU EXTERNA, BASEADAS NA TEORIA DA MEMBRANA, ISTO É, DESPREZANDO O EFEITO DA FLEXÃO DEVIDO À ESPESSURA DA PAREDE. AS TENSÕES PRIMÁRIAS DE FLEXÃO SÃO CONTROLADAS, INDIRETAMENTE, POR FATORES DE CORREÇÃO EM ALGUMAS FÓRMULAS E POR LIMITAÇÃO NA RELAÇÃO ENTRE DIÂMETRO E ESPESSURA DO VASO. AS TENSÕES SECUNDÁRIAS E AS TENSÕES LOCALIZADAS MÁXIMAS SÃO TAMBÉM CONTROLADAS INDIRETAMENTE, POR UMA SÉRIE DE EXIGÊNCIAS DE DETALHES DE PROJETO (TRANSIÇÕES DE ESPESSURA, TRANSIÇÕES DE FORMATO, RAIOS MÍNIMOS E MÁXIMOS DE TAMPOS TORIESFÉRICOS E DE SEÇÕES TOROIDAIS, REFORÇOS EM ABERTURAS, ETC.).

EMBORA SEJA DITO NA NORMA QUE OS VASOS DE PRESSÃO DEVAM RESISTIR A TODAS AS CARGAS ATUANTES (PRESSÃO INTERNA OU EXTERNA, PESOS, SOBRECARGAS, AÇÃO DO VENTO, REAÇÃO DE APOIO DOS SUPORTES, IMPACTOS, ESFORÇOS DE DILATAÇÃO, ETC.), AS FÓRMULAS DA NORMA CONSIDERAM SOMENTE A PRESSÃO INTERNA OU EXTERNA, FICANDO O CÁLCULO PARA AS DEMAIS CARGAS INTEIRAMENTE A CRITÉRIO DO PROJETISTA, NÃO SÓ QUANTO AO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO A ADOTAR COMO TAMBÉM QUANTO À NECESSIDADE OU NÃO DE FAZÊ-LO. NÃO HÁ NENHUMA EXIGÊNCIA DE ANÁLISE MATEMÁTICA DAS TENSÕES NOS VASOS NEM TAMBÉM RECOMENDAÇÕES OU EXIGÊNCIAS QUANTO À ANÁLISE DE FADIGA. NÃO HÁ IGUALMENTE NENHUMA REDUÇÃO DE TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA COMPENSAR EFEITOS DE FADIGA EM SERVIÇOS CÍCLICOS.

ESSA NORMA NÃO INCLUI O CÁLCULO DOS SUPORTES DO VASO, REMETENDO PARA O MÉTODO DE CÁLCULO DE **ZICK**, CONTÉM, ENTRETANTO, UM MÉTODO SEMI-ANALÍTICO PARA O CÁLCULO DE FLANGES (APÊNDICE OBRIGATÓRIO 2), BASEADO NOS ESTUDOS DE **WATERS**, **ROSSHEIM** E **WESSTROM**. ESSE MÉTODO LEVA EM CONTA APENAS AS TENSÕES DEVIDO À PRESSÃO E AO APERTO DOS PARAFUSOS. A PARTIR DA EDIÇÃO DE 2004, O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII INCLUI NA PARTE UHX O CÁLCULO DE ESPELHOS DE TROCADORES DE CALOR.

ESTRITAMENTE FALANDO, A EXATA E COMPLETA APLICAÇÃO DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, INCLUI, ALÉM DA OBSERVÂNCIA A TODAS AS EXIGÊNCIAS, CRITÉRIOS, FÓRMULAS DE CÁLCULO ETC, CONTIDOS NA NORMA, AINDA OS SEGUINTE PONTOS:

- QUE O FABRICANTE SEJA FORMALMENTE AUTORIZADO PELA ASME A FABRICAR VASOS DE PRESSÃO;
- QUE HAJA UMA INSPEÇÃO FORMAL REALIZADA POR UM INSPETOR TAMBÉM AUTORIZADO PELA ASME;



- QUE SEJA FEITO UM RELATÓRIO (*MANUFACTURER'S DATA REPORT*) DE ACORDO COM OS FORMULÁRIOS E INSTRUÇÕES DO APÊNDICE W DA NORMA;
- QUE SEJA ESTAMPADO NO VASO O SÍMBOLO DA ASME.

A DIVISÃO 1 EXIGE AINDA (PARÁGRAFO U-2) QUE O USUÁRIO DO VASO, OU ALGUÉM POR ELE CONTRATADO: FIRMA DE PROJETO, FABRICANTE, ETC, ESTABELEÇA FORMALMENTE AS CONDIÇÕES DE PROJETO DO VASO, QUE DEVEM DEFINIR NO MÍNIMO O SEGUINTE:

- NECESSIDADES OU NÃO DE MARGENS PARA CORROSÃO;
- INDICAÇÃO DE SERVIÇO TÓXICO, QUANDO FOR O CASO, QUANDO FOR O CASO;
- NECESSIDADE OU NÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS, ALÉM DOS EXIGIDOS PELA PRÓPRIA NORMA;
- PARA OS VASOS ONDE HOVER GERAÇÃO DE VAPOR, OBSERVÂNCIA DO DISPOSITIVO NOS PARÁGRAFOS PG-59 A PG-61, DA SEÇÃO 1, DO CÓDIGO ASME.

ESSAS EXIGÊNCIAS ADICIONAIS SÃO RARAMENTE ATENDIDAS POR COMPLETO EM VASOS FABRICADOS AQUI NO BRASIL.

### **2.7.6 CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2**

O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2, SÃO AS CHAMADAS “REGRAS ALTERNATIVAS DE PROJETO”, CONTENDO UMA TECNOLOGIA MAIS AVANÇADA E ADOTANDO UM NOVO CRITÉRIO DE PROJETO, ESSES CRITÉRIO É TAMBÉM EMPREGADO PELA SEÇÃO III (VASOS NUCLEARES) DO CÓDIGO ASME.

ESTÃO INCLUÍDOS NO ESCOPO DESTA NORMA TODOS OS VASOS DE PRESSÃO, SEM LIMITE DE PRESSÃO MÁXIMA, INCLUINDO-SE TAMBÉM OS VASOS INSTALADOS EM EMBARCAÇÕES, E OS VASOS SUJEITOS A CHAMA, DESDE QUE NÃO ABRANGIDOS NAS SEÇÕES I, III e IV DO CÓDIGO ASME.

EM QUALQUER CASO, É EXIGIDO QUE O VASO SEJA DESTINADO A UM SERVIÇO ESPECÍFICO PREESTABELECIDO, E PARA ISSO O USUÁRIO, OU SEU AGENTE CREDENCIADO, DEVE PREPARAR UM DOCUMENTO FORMAL DENOMINADO ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO USUÁRIO (*USER'S DESIGN SPECIFICATION*), INDICANDO AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO VASO (FLUIDO CONTIDO, PRESSÃO E TEMPERATURA), INCLUSIVE EM SITUAÇÕES TRANSITÓRIAS OU ANORMAIS, NECESSIDADE OU NÃO DE ANÁLISE DE FADIGA PARA SERVIÇOS CÍCLICOS, DETALHANDO OS DADOS NECESSÁRIOS PARA ESSA ANÁLISE, NECESSIDADE OU NÃO DE MARGEM PARA CORROSÃO E EROSÃO, OU DE TRATAMENTOS TÉRMICOS. A NORMA EXIGE TAMBÉM QUE SEJA FEITO UM ACOMPANHAMENTO DO COMPORTAMENTO DO VASO EM OPERAÇÃO E EM MANUTENÇÃO DURANTE TODA A SUA VIDA ÚTIL, PELO USUÁRIO RESPONSÁVEL PELA ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO.

ESSA NORMA PERMITE TENSÕES MAIS ELEVADAS DO QUE A DIVISÃO 1, RESULTANDO ASSIM EM MENORES ESPESSURAS E MENOR PESO PARA O VASO.

EM COMPENSAÇÃO, PARA GARANTIR UM GRAU DE SEGURANÇA EQUIVALENTE, OU ATÉ MAIOR, É FEITA UMA SÉRIE DE EXIGÊNCIAS ADICIONAIS DE PROJETO, CÁLCULO, MATERIAIS, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO, QUE RESULTAM EVIDENTEMENTE EM MAIOR CUSTO, DE FORMA QUE NEM SEMPRE COMPENSA A ECONOMIA FEITA EM MATERIAL E EM SOLDA. NO MERCADO NORTE-AMERICANO, POR EXEMPLO, A DIVISÃO 1 É GERALMENTE DE EMPREGO MAIS ECONÔMICO PARA VASOS DE AÇO-CARBONO OU AÇOS DE BAIXA LIGA EM ESPESSURA ATÉ 50 MM, E PARA VASO DE AÇO INOXIDÁVEL EM ESPESSURA ATÉ 31MM E A DIVISÃO 2 É DE EMPREGO MAIS ECONÔMICO PARA ESPESSURAS ACIMA DESSES LIMITES.

A DIVISÃO 2 É OBRIGATÓRIA PARA OS VASOS EM SERVIÇOS CÍCLICOS (SUJEITOS A ANÁLISE DE FADIGA), VASOS DE CONSTRUÇÃO ESPECIAL (MULTIFOLHEADOS-*MULTILAYER*, POR EXEMPLO) E VASOS PARA SERVIÇOS MUITO SEVEROS (FLUIDOS ALTAMENTE TÓXICOS, POR EXEMPLO). EM COMPENSAÇÃO, O EMPREGO DA DIVISÃO 2 NÃO É INDICADO QUANDO O FABRICANTE NÃO TEM EXPERIÊNCIA COM ESSA NORMA, E TAMBÉM QUANDO O VASO PUDE VIR A SOFRER MODIFICAÇÕES SENSÍVEIS NAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

EM RESUMO, SÃO AS SEGUINTE AS EXIGÊNCIAS ADICIONAIS DESSA NORMA:

- ANÁLISE MATEMÁTICA RIGOROSA DE TODAS AS TENSÕES E CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO (COMO ESPECIFICADO NO APÊNDICE 4 DA NORMA), DE ACORDO COM A TEORIA DA ELASTICIDADE, APLICANDO-SE O CRITÉRIO DE RUPTURA PELO **CISALHAMENTO MÁXIMO** (GUEST-TRESCA). QUANDO O VASO, OU PARTE DO VASO PUDE SER EXATAMENTE ENQUADRADO DENTRO DE ALGUNS MODELOS PARA OS QUAIS SÃO FORNECIDAS FÓRMULAS SIMPLIFICADAS DE CÁLCULO, SEMELHANTES ÀS FÓRMULAS DA DIVISÃO 1, A ANÁLISE MATEMÁTICA DAS TENSÕES NÃO É OBRIGATÓRIA, FICANDO O SEU USO A CRITÉRIO DO PROJETISTA OU DO USUÁRIO DO VASO. PERMITE-SE TAMBÉM O CÁLCULO MATEMÁTICO POR QUALQUER OUTRO PROCESSO, DESDE QUE MAIS EXATO OU MAIS CONSERVATIVO. COMO ALTERNATIVA, A DIVISÃO 2 PERMITE AINDA QUE AS TENSÕES SEJAM AVALIADAS POR EXTENSÔMETROS (*STRAIN-GAGE*) OU POR FOTOELASTICIDADE, EM LOCAIS CRÍTICOS OU IMPORTANTES, OU ONDE O CÁLCULO MATEMÁTICO DAS TENSÕES FOR INVIÁVEL OU DE RESULTADO DUVIDOSO;
- MAIOR RIGOR EM EXIGÊNCIAS QUANTO AOS MATERIAIS: NEM TODOS OS MATERIAIS PERMITIDOS PELA DIVISÃO 1 SÃO TAMBÉM PELA DIVISÃO 2, E PARA MUITOS OUTROS MATERIAIS SÃO PEDIDOS REQUISITOS ADICIONAIS. AS EXIGÊNCIAS DE INSPEÇÃO DE MATERIAIS E DE FABRICAÇÃO, ASSIM COMO PARA SERVIÇOS EM BAIXAS TEMPERATURAS SÃO TAMBÉM MAIS SEVERAS;
- MAIORES LIMITAÇÕES E EXIGÊNCIAS MAIS RIGOROSAS QUANTO A DETALHES DE PROJETO E DE SOLDAS: ALGUNS DETALHES PERMITIDOS PELA DIVISÃO 1 NÃO O SÃO PELA DIVISÃO 2;
- DEFINIÇÃO FORMAL DO QUE SE ENTENDE POR USUÁRIO, FABRICANTE E INSPEÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO, E QUAIS AS RESPONSABILIDADES DE CADA UM DESTES;
- OBRIGAÇÃO DE EXECUÇÃO DE ANÁLISE DE FADIGA, COMO ESPECIFICADO NO APÊNDICE 5 DA PRÓPRIA NORMA, SEMPRE QUE HOUVER CONDIÇÕES DE ESFORÇOS CÍCLICOS QUE EXIJAM ESSA ANÁLISE, COMO TAMBÉM ESPECIFICADO NA NORMA. SEMPRE QUE FOR NECESSÁRIA A ANÁLISE DE FADIGA, É OBRIGATÓRIO O CÁLCULO ANALÍTICO DAS TENSÕES PELO APÊNDICE 4;
- OBRIGAÇÃO POR PARTE DOS FABRICANTES DE APRESENTAÇÃO DE UM RELATÓRIO DE PROJETO COM CÁLCULOS COMPLETOS, ASSINADOS POR UM PROFISSIONAL HABILITADO (*MANUFACTURER'S DESIGN REPORT*);

PARA O CÁLCULO DAS TENSÕES A NORMA DEFINE O QUE CHAMA DE "INTENSIDADE EQUIVALENTE DE TENSÃO COMBINADA", OU SIMPLIFICADAMENTE, "INTENSIDADE DE TENSÃO" (*STRESS INTENSITY*)  $S_m$ , QUE É O DOBRO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁXIMA CALCULADA EM UM DETERMINADO PONTO, OU SEJA, A DIFERENÇA ALGÉBRICA ENTRE A MAIOR E A MENOR DAS TENSÕES PRINCIPAIS DE CISALHAMENTO.



A NORMA FORNECE ENTÃO TABELAS COM OS VALORES MÁXIMOS ADMISSÍVEIS DE  $S_m$ , PARA TODOS OS MATERIAIS ACEITÁVEIS, EM TEMPERATURAS ABAIXO DA FAIXA DE FLUÊNCIA, ISTO É, ATÉ 370°C. PARA CADA TEMPERATURA,  $S_m$  SERÁ O MENOR ENTRE  $1/3 LR$  e  $2/3 LE$ .

### 2.7.7 NORMA INGLESA BS-5500

ESSA NORMA INCLUI EXIGÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES PARA MATERIAIS, PROJETO, FABRICAÇÃO E INSPEÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO, **COM AS SEGUINTE EXCEÇÕES:**

- TANQUES, VASOS SEM PRESSÃO, E VASOS PARA OS QUAIS AS TENSÕES CALCULADAS SÃO INFERIORES A 10% DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL;
- VASOS DE CONSTRUÇÃO ESPECIAL, PARA PRESSÕES MUITO ALTAS;
- VASOS NÃO ESTACIONÁRIOS (PARA VEÍCULOS);

PREENCHENDO UMA LACUNA DE OUTRAS NORMAS, ESSA NORMA DEFINE PRECISAMENTE AS RESPONSABILIDADES DO COMPRADOR, DO FABRICANTE E DO INSPETOR DO VASO. RELACIONA TAMBÉM AS DIVERSAS CARGAS QUE PODEM ATUAR EM UM VASO E PARA AS QUAIS O VASO DEVA SER CALCULADO.

AS EXIGÊNCIAS QUANTO A MATERIAIS SÃO BEM MAIS SEVERAS DO QUE AS NORMAS ASME: NÃO SENDO ADMITIDOS, POR EXEMPLO, PARA NENHUMA PARTE SOLDADA, AÇOS COM TEOR DE CARBONO ACIMA DE 0,25%; A TEMPERATURA MÁXIMA LIMITE PARA OS AÇOS-CARBONO NÃO ACALMADOS É DE 380°C, E PARA TEMPERATURAS ABAIXO DE 0°C EXISTEM EXIGÊNCIAS ESPECIAIS.

AS TENSÕES ADMISSÍVEIS (PARA TENSÕES PRIMÁRIAS DE MEMBRANA) SÃO OS MENORES DOS SEGUINTE VALORES:

- AÇOS FERRÍTICOS:  $LR/2,35$  e  $LE/1,5$ ;
- AÇOS AUSTENÍTICOS:  $LR/2,5$  e  $LE/1,5$

PARA AS TEMPERATURAS DENTRO DA FAIXA DE FLUÊNCIA HÁ AINDA O LIMITE:

#### TENSÃO DE RUPTURA POR FLUÊNCIA

1,3

A NORMA FORNECE OS VALORES DAS TENSÕES ADMISSÍVEIS (EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA) PARA OS MATERIAIS RECONHECIDOS, SENDO QUE NA FAIXA DE FLUÊNCIA SÃO DADAS AS TENSÕES PARA QUATRO TEMPOS DE VIDA ÚTIL: 100.000, 150.000, 200.000 e 250.000 HORAS.

NO CORPO DA NORMA PROPRIAMENTE DITO, SÃO DADAS FÓRMULAS E CRITÉRIOS DE CÁLCULO, DE USO SIMPLES, PARA AS PARTES DO VASO QUE OBEDEÇAM A ALGUMAS FORMAS GEOMÉTRICAS DETERMINADAS, INCLUSIVE PARA ESPELHOS E OUTRAS PARTES DE TROCADORES DE CALOR. SÃO DADOS TAMBÉM O CÁLCULO DE SUPORTES PARA VASOS DE PRESSÃO E O CÁLCULO DE FLANGES, ESTE ÚLTIMO PELO MESMO PROCESSO DO CÓDIGO ASME, EXCETO QUE CONSIDERA TENSÕES ADMISSÍVEIS MAIS ELEVADAS.



A NORMA CONTÉM VÁRIOS APÊNDICES, ENTRE OS QUAIS:

- CRITÉRIO PARA CÁLCULO MATEMÁTICO DE ANÁLISE DE TENSÕES, PARA AS PARTES DO VASO QUE NÃO PUDEREM SER ENQUADRADAS EXATAMENTE DENTRO DAS FORMAS GEOMÉTRICAS SIMPLES. ESSE APÊNDICE É, ENTRETANTO, MUITO MENOS EXTENSO E COMPLETO DO QUE O CORRESPONDENTE DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2;
- CRITÉRIO PARA A CONSIDERAÇÃO DO EFEITO COMBINADO DA PRESSÃO, PESOS E AÇÃO DO VENTO, CONSIDERANDO O EFEITO DE FLAMBAGEM AXIAL DEVIDO ÀS CARGAS DE COMPRESSÃO NO CILINDRO;
- CRITÉRIO PARA A CONSIDERAÇÃO DA FADIGA EM VASOS PARA SERVIÇOS CÍCLICOS;
- CÁLCULO DAS TENSÕES PROVENIENTES DE CARGAS LOCALIZADAS (REAÇÕES DE APOIO E ESFORÇOS DEVIDO A TUBULAÇÕES), DE ACORDO COM OS ESTUDOS DO PROF. BIJLAARD.

### 2.7.8 NORMAS ALEMÃS A.D. MERKBLATT

ESSAS NORMAS ABRANGEM AS PARTES PRESSURIZADAS DOS VASOS DE PRESSÃO EM GERAL, SEM LIMITAÇÕES DE SUAS CONDIÇÕES.

A PRESSÃO DE PROJETO É CONSIDERADA COMO IGUAL À PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO DO VASO, E A TEMPERATURA DE PROJETO COMO IGUAL AO VALOR MÁXIMO DA TEMPERATURA NA PAREDE METÁLICA DO VASO. PARA OS VASOS SUBMETIDOS À PRESSÃO EXTERNA É EXIGIDO SEMPRE O CÁLCULO PARA O VÁCUO TOTAL.

PARA OS AÇOS LAMINADOS COM GARANTIA DE QUALIDADE (CONFORME ITEM 3 DA NORMA DIN-50049) AS TENSÕES ADMISSÍVEIS SÃO O MENOR DOS SEGUINTE VALORES:

- $\frac{LE}{1,5}$  OU  $\frac{\text{TENSÃO PARA } 0,2\% \text{ DE DEFORMAÇÃO}}{1,5}$
- $\frac{\text{TENSÃO PARA RUPTURA POR FLUÊNCIA EM } 100.000 \text{ HORAS}}{1,5}$
- TENSÃO PARA 1% DE DEFORMAÇÃO POR FLUÊNCIA EM 100.000 HORAS.

PARA OUTROS MATERIAIS O COEFICIENTE DE SEGURANÇA É MAIOR: 1,8, POR EXEMPLO, PARA OS AÇOS QUE NÃO OBEDECEM AO ITEM 3 DA NORMA DIN-50049.

AS TENSÕES ADMISSÍVEIS SÃO INDEPENDENTES DO LIMITE DE RESISTÊNCIA DO MATERIAL, MAS, PARA EVITAR QUE RESULTEM VALORES MUITO PRÓXIMOS A **LR**, É EXIGIDO UM VALOR MÁXIMO PARA A RELAÇÃO LR/LE (0,6 PARA OS AÇOS-CARBONO NÃO TEMPERADOS, POR EXEMPLO). PARA TODOS OS MATERIAIS AS TENSÕES ADMISSÍVEIS DECRESCEM SEMPRE COM O AUMENTO DE TEMPERATURA, A PARTIR DA TEMPERATURA AMBIENTE.

AS FÓRMULAS DE CÁLCULO SÃO TODAS SIMPLES, BASEADAS NA TENSÃO MÁXIMA DE MEMBRANA. NÃO ESTÃO INCLUÍDOS OS TAMPOS COM PERFIL EM ELIPSE VERDADEIRA; PARA OS TAMPOS TORIESFÉRICOS HÁ UM FATOR DE CORREÇÃO PARA LEVAR EM CONTA AS CONCENTRAÇÕES DE TENSÕES, E EXIGE-SE QUE O RAIOS MÍNIMO SEJA PELO MENOS 0,1 DO DIÂMETRO EXTERNO.

EXISTEM FÓRMULAS PARA OS CILINDROS DE PAREDES ESPESAS, ONDE É PREVISTO O EFEITO DO DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE AS FACES INTERNA E EXTERNA DO CILINDRO.

AS EXIGÊNCIAS DESSA NORMA SOBRE MATERIAIS, SOLDAGEM (INCLUSIVE QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES E INSPETORES), TRATAMENTOS TÉRMICOS E INSPEÇÃO, SÃO BEM MAIS SEVERAS E RESTRITIVAS DO QUE AS CORRESPONDENTES DO CÓDIGO ASME.

## **2.8 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E DE PROJETO DE VASOS DE PRESSÃO**

### **2.8.1 DIVERSOS CONCEITOS DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA**

COM REFERÊNCIA AOS VASOS DE PRESSÃO, OS TERMOS “PRESSÃO” E “TEMPERATURA” PODEM ESTAR ASSOCIADOS A VÁRIOS CONCEITOS QUE IMPORTA DISTINGUIR PERFEITAMENTE UM DO OUTRO. A **PRESSÃO** PODE TER OS SEGUINTE CONCEITOS:

- PRESSÃO NORMAL DE OPERAÇÃO (*NORMAL OPERATING PRESSURE*);
- PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO (*MAXIMUM OPERATING PRESSURE*);
- PRESSÃO MÍNIMA DE OPERAÇÃO (*MINIMUM OPERATING PRESSURE*);
- PRESSÃO DE PROJETO (*DESIGN PRESSURE*);
- PRESSÃO DE ABERTURA DA VÁLVULA DE SEGURANÇA (*SAFETY VALVE SET PRESSURE*);
- PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL (PMTA) (*MAXIMUM ALLOWABLE WORKING PRESSURE - MAWP*);
- PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO (*HIDROSTATIC TEST PRESSURE*).

QUANTO À **TEMPERATURA** PODEMOS TER:

- TEMPERATURA NORMAL DE OPERAÇÃO (*NORMAL OPERATING TEMPERATURE*);
- TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERAÇÃO (*MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE*);
- TEMPERATURA MÍNIMA DE OPERAÇÃO (*MINIMUM OPERATING TEMPERATURE*);
- TEMPERATURA DE PROJETO (*DESIGN TEMPERATURE*).

### **2.8.2 PRESSÃO E TEMPERATURA DE OPERAÇÃO**

A PRESSÃO E A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DE UM VASO SÃO AS SUAS “CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO”, ISTO É, OS PARES DE VALORES SIMULTÂNEOS DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA COM OS QUAIS O VASO DEVERÁ OPERAR EM CONDIÇÕES NORMAIS. AS PRESSÕES SÃO SEMPRE OS VALORES MEDIDOS NO TOPO DO VASO, DEVENDO-SE, QUANDO FOR O CASO, ACRESCENTAR A PRESSÃO CORRESPONDENTE À COLUNA HIDROSTÁTICA DE LÍQUIDO.



RARAMENTE UM VASO DE PRESSÃO OPERA, DURANTE TODA A SUA VIDA, EM UMA ÚNICA CONDIÇÃO ESTÁVEL DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA, OCORRENDO EM GERAL FLUTUAÇÕES DE MAIOR OU MENOR AMPLITUDE. DEVE-SE POR ISSO DISTINGUIR OS VALORES NORMAIS E OS VALORES MÁXIMOS DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA. OS PRIMEIROS SÃO OS VALORES DE REGIME, E OS MÁXIMOS SÃO OS MAIORES VALORES QUE PODEM SER ATINGIDOS EM OPERAÇÃO NORMAL, OU QUAISQUER SITUAÇÕES ANORMAIS OU TRANSITÓRIAS QUE POSSAM ACONTECER, TAIS COMO PARTIDA, PARADA NORMAL, PARADA DE EMERGÊNCIA, FALHAS EM SISTEMAS DE CONTROLE, ETC.

EVENTUALMENTE UM VASO PODERÁ TER MAIS DE UMA CONDIÇÃO DE REGIME, ISTO É, PODERÁ ESTAR SUJEITO, EM OPERAÇÃO NORMAL, A CONDIÇÕES DIFERENTES DE TRABALHO, INCLUSIVE COM FLUIDOS DIFERENTES. QUANDO ESTE FOR O CASO, O FATO DEVERÁ SER CONSIDERADO PARA A FIXAÇÃO DOS VALORES EXTREMOS DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA DE OPERAÇÃO, E TAMBÉM PARA AS CONDIÇÕES DE PROJETO DO VASO, COMO VEREMOS A SEGUIR.

É NECESSÁRIO CONSIDERAR AINDA O VALOR MÍNIMO DE PRESSÃO E/OU DE TEMPERATURA, SEMPRE QUE, EM SITUAÇÃO NORMAL OU EVENTUAL, A PRESSÃO POSSA ATINGIR UM VALOR INFERIOR À PRESSÃO ATMOSFÉRICA, OU A TEMPERATURA POSSA ATINGIR UM VALOR INFERIOR ÀS TEMPERATURAS INDICADAS NA FIG. U65-66, DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIV. 1, CONSIDERANDO-SE O MATERIAL E A ESPESSURA DO COMPONENTE DO VASO.

DEVE SER OBSERVADO QUE A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DO VASO É, EM QUALQUER CASO, A TEMPERATURA MÉDIA REAL NA PAREDE DO VASO. ESSA TEMPERATURA É EVIDENTEMENTE FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO FLUIDO CONTIDO, E NA GRANDE MAIORIA DOS CASOS É TOMADA COMO SENDO ESSA PRÓPRIA TEMPERATURA. FAZEM EXCEÇÃO, ENTRETANTO, OS CASOS EM QUE O VASO POSSUA ALGUM REVESTIMENTO ISOLANTE INTERNO (REVESTIMENTO REFRAATÓRIO) OU QUE HAJA TROCA DE CALOR COM O EXTERIOR, FAZEM EXCEÇÃO TAMBÉM AS PARTES DO VASO ONDE SE EFETUAM TROCAS DE CALOR (TUBOS DE FEIXES TUBULARES E SERPENTINAS, ESPELHOS, ETC.), CUJA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO SERÁ UM VALOR INTERMEDIÁRIO ENTRE AS TEMPERATURAS DOS DOIS FLUIDOS (FLUIDO QUENTE E FLUIDO FRIO).

É IMPORTANTE NOTAR QUE EXISTEM MEIOS DE PROTEGER UM VASO CONTRA UMA SOBREPRESSÃO ANORMAL (VÁLVULAS DE SEGURANÇA, DISCO DE RUPTURA, ETC), MAS NÃO EXISTE UM MEIO COMPLETAMENTE SEGURO DE PROTEGÊ-LO CONTRA UMA SUBIDA ANORMAL DE TEMPERATURA, QUE PODE OCORRER POR VÁRIOS MOTIVOS: FALHAS EM SISTEMAS DE RESFRIAMENTO, FALHAS EM INSTRUMENTOS OU SISTEMAS DE CONTROLE, ERROS DE OPERAÇÃO, FLUIDOS FORA DE ESPECIFICAÇÃO, PRINCÍPIO DE INCÊNDIO, ETC. EM ALGUNS VASOS, PRINCIPALMENTE QUANDO DE GRANDES DIMENSÕES, A TEMPERATURA DE OPERAÇÃO PODE VARIAR MUITO DE UMA REGIÃO PARA A OUTRA DO MESMO VASO, SENDO EM CERTOS CASOS POSSÍVEL ESTABELECEM REGIÕES DEFINIDAS COM DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO. AS VARIAÇÕES DE PRESSÃO DE OPERAÇÃO SÃO MUITO MENOS SENSÍVEIS, PODENDO ACONTECER, ENTRETANTO, EM VASOS DE GRANDE ALTURA, DEVIDO À COLUNA HIDROSTÁTICA DE LÍQUIDOS CONTIDOS.

### **2.8.3 PRESSÃO E TEMPERATURA DE PROJETO**

DENOMINA-SE PRESSÃO E TEMPERATURA DE PROJETO AS “CONDIÇÕES DE PROJETO” DO VASO DE PRESSÃO, OU SEJA, OS VALORES CONSIDERADOS PARA EFEITO DE CÁLCULO E DE PROJETO DO VASO. DE ACORDO COM O PARÁGRAFO UG-21 DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 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”



PARA OS VASOS (OU PARTES DE VASOS) QUE POSSAM ESTAR SUBMETIDOS SIMULTANEAMENTE, OU SUCESSIVAMENTE, À PRESSÃO INTERNA E À PRESSÃO EXTERNA, DEVEM SER ESTABELECIDOS DOIS VALORES DE PRESSÃO DE PROJETO CORRESPONDENTES A CADA UMA DESTAS CONDIÇÕES. NORMALMENTE O CÁLCULO DEVERÁ SER FEITO EM FUNÇÃO DE CADA UMA DAS PRESSÕES DE PROJETO COMO AGINDO ISOLADAMENTE; O CÁLCULO PARA A PRESSÃO DIFERENCIAL (ISTO É, A DIFERENÇA ENTRE AS DUAS PRESSÕES DE PROJETO), É UM CASO EXCEPCIONAL QUE SÓ PODE SER FEITO QUANDO HOVER ABSOLUTA GARANTIA DE QUE AMBAS AS PRESSÕES SÃO SEMPRE SIMULTÂNEAS.

NO CASO DOS VASOS PROJETADOS PARA A PRESSÃO INTERNA, É USUAL ADOTAR-SE PARA A PRESSÃO DE PROJETO O **MAIOR** DOS DOIS SEGUINTE VALORES:

- PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO, ACRESCIDA DE 5%, QUANDO O DISPOSITIVO DE ALÍVIO DE PRESSÃO (VÁLVULA DE SEGURANÇA) FOR OPERADO POR VÁLVULA PILOTO, E ACRESCIDA DE 10% NOS DEMAIS CASOS;
- 1,5 KG/CM<sup>2</sup>, MANOMÉTRICOS.

DE ACORDO COM O CÓDIGO ASME SEÇÃO VIII (PARÁGRAFO U.1, DIVISÃO 1), O VALOR MÍNIMO DA PRESSÃO INTERNA DE PROJETO É DE 1,0 KG/CM<sup>2</sup>, MESMO PARA OS VASOS QUE OPERAM COM PRESSÃO NULA OU MUITO BAIXA.

O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 2 (PARÁGRAFO AD-121), CONSIDERA FORMALMENTE A PRESSÃO DE PROJETO COMO SENDO IGUAL À PRESSÃO DE ABERTURA DO DISPOSITIVO DE ALÍVIO DE PRESSÃO (VÁLVULA DE SEGURANÇA). PARA OS VASOS (OU PARTES DE VASOS) SUBMETIDOS À PRESSÃO EXTERNA, É USUAL CONSIDERAR COMO PRESSÃO EXTERNA DE PROJETO PELO MENOS A CONDIÇÃO DE VÁCUO TOTAL, EMBORA ISSO NÃO SEJA EXIGIDO PELO CÓDIGO ASME.

PARA OS VASOS QUE TRABALHAM COM PRESSÃO EXTERNA, O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII (PARÁGRAFO UG-20, DIVISÃO 1) ESTABELECE COMO VALOR LIMITE PARA A TEMPERATURA DE PROJETO PARA CADA MATERIAL AS TEMPERATURAS MÁXIMAS QUE FIGURAM NOS GRÁFICOS DO APÊNDICE V DESSA NORMA.

NO CASO DOS VASOS PARA SERVIÇO COM HIDROCARBONETOS OU OUTROS PRODUTOS QUE REQUEIRAM LIMPEZA COM VAPOR (*STEAM OUT*) É USUAL CONSIDERAR-SE COMO VALORES MÍNIMOS DA PRESSÃO E DA TEMPERATURA DE PROJETO, RESPECTIVAMENTE, 1,75 KG/CM<sup>2</sup> E 150°C.

### **2.8.4 PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL - PRESSÃO DE ABERTURA DA VÁLVULA DE SEGURANÇA**

A **PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL (PMTA)** PODE SE REFERIR A CADA UMA DAS PARTES DE UM VASO, OU AO VASO CONSIDERADO COMO UM TODO.

A **PMTA** DE CADA PARTE DE UM VASO É A PRESSÃO QUE CAUSA NA PARTE EM QUESTÃO UMA TENSÃO MÁXIMA IGUAL À TENSÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL NA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO CORRESPONDENTE À PARTE CONSIDERADA. ESSAS PRESSÕES SÃO CALCULADAS PELAS FÓRMULAS DADAS NA MESMA NORMA DE PROJETO ADOTADA PARA O CÁLCULO DO VASO. PELA DEFINIÇÃO DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1 (PARÁGRAFO UG-98), O CÁLCULO DA **PMTA** DEVE SER FEITO EM FUNÇÃO DAS ESPESSURAS CORROÍDAS, DESCONTANDO-SE, PORTANTO, A MARGEM PARA CORROSÃO QUE HOVER (SOBREESPESSURA DE CORROSÃO).





- **$\epsilon_p$**  - ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA CALCULADA EM FUNÇÃO DA PRESSÃO DE PROJETO E DA TEMPERATURA DE PROJETO;
- **C** - MARGEM PARA CORROSÃO;
- **$\epsilon_f$**  - ACRÉSCIMO PARA COMPENSAR A PERDA DE ESPESSURA DAS CHAPAS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO, ONDE FOR O CASO.
- **$\epsilon_c$**  - ACRÉSCIMO DE ESPESSURA PARA AJUSTAR-SE À ESPESSURA COMERCIAL DA CHAPA ADOTADA;
- **$\epsilon_t$**  - ACRÉSCIMO PARA CONSIDERAR A TOLERÂNCIA INFERIOR DE FABRICAÇÃO NA ESPESSURA DA CHAPA, DE ACORDO COM A SUA ESPECIFICAÇÃO, ESSE VALOR É GERALMENTE DESPREZÍVEL;
- **$\epsilon_n$**  - ESPESSURA NOMINAL DA CHAPA ADOTADA;
- **$\epsilon_{av}$**  - ESPESSURA PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL COM O VASO CORROÍDO;
- **$\epsilon_{an}$**  - ESPESSURA PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL COM O VASO NOVO (NÃO CORROÍDO).

VÊ-SE, PELA FIGURA ACIMA, QUE  $\epsilon_{av} \geq \epsilon_p$  E TAMBÉM  $\epsilon_{an} \geq \epsilon_{av}$ . TEREMOS  $\epsilon_{av} = \epsilon_p$  APENAS NO CASO EM QUE  $\epsilon_c = 0$ , ISTO É, QUANDO A ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA COINCIDIR EXATAMENTE COM UMA ESPESSURA COMERCIAL ADOTADA.

DA MESMA FORMA, TEREMOS  $\epsilon_{av} = \epsilon_{an}$  SOMENTE NO CASO PARTICULAR EM QUE NÃO HOUVER MARGEM PARA CORROSÃO ( $C = 0$ ). COMO CONSEQÜÊNCIA, TEREMOS TAMBÉM, NA MAIORIA DAS VEZES, **PMTA > PRESSÃO DE PROJETO**, SENDO QUE ESSES DOIS VALORES SERÃO IGUAIS APENAS EM ALGUNS CASOS EXCEPCIONAIS.

O ACRÉSCIMO DE ESPESSURA  $\epsilon_f$  DEVE SER CONSIDERADO SEMPRE QUE HOUVER PERDA SENSÍVEL DE ESPESSURA DA CHAPA NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DA PARTE DO VASO CONSIDERADO, COMO OCORRE, POR EXEMPLO, NOS CASCOS ESFÉRICOS E NOS TAMPOS ELÍPTICOS, TORIESFÉRICOS E HEMISFÉRICOS, FABRICADOS POR PRENSAGEM, REBORDEAMENTO, OU PROCESSO SEMELHANTE. PARA OS CORPOS CILÍNDRICOS E CÔNICOS, ONDE HÁ APENAS TRABALHO DE CALANDRAGEM, A PERDA DE ESPESSURA É DESPREZÍVEL, E O ACRÉSCIMO  $\epsilon_f$  NÃO PRECISA SER CONSIDERADO.

A PMTA DO VASO (OU DE SUAS PARTES) PODE SER CALCULADA PARA DIVERSAS TEMPERATURAS, E, PORTANTO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES VALORES DE TENSÃO ADMISSÍVEL, E TAMBÉM PARA VÁRIAS CONDIÇÕES DO VASO. ALÉM DA PMTA PARA O VASO CORROÍDO E EM OPERAÇÃO, COMO JÁ REFERIDO, É USUAL CALCULAR-SE TAMBÉM PARA O VASO NOVO E FRIO, EM FUNÇÃO DAS ESPESSURAS  $\epsilon_{an}$  E DA TENSÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL PARA A TEMPERATURA AMBIENTE. COMO OS VALORES DAS PMTA SÃO DIFERENTES ENTRE SI, É NECESSÁRIO SEMPRE REFERIR A QUE TEMPERATURA E ESPESSURA CORRESPONDE UM DETERMINADO VALOR DA PMTA DE UM VASO.

### 2.8.5 NATUREZA E FINALIDADE DO TESTE HIDROSTÁTICO

PARA QUALQUER VASO DE PRESSÃO É OBRIGATÓRIA A EXECUÇÃO DE UM TESTE DE PRESSÃO, PARA A VERIFICAÇÃO DA ESTANQUEIDADE DO VASO, DEPOIS DE CONCLUÍDA A SUA FABRICAÇÃO E MONTAGEM, ESSA É UMA EXIGÊNCIA GERAL DE TODAS AS NORMAS DE VASOS DE PRESSÃO.

NA GRANDE MAIORIA DOS CASOS ESSE TESTE É UM TESTE HIDROSTÁTICO, QUE CONSISTE NO PREENCHIMENTO COMPLETO DO VASO COM ÁGUA OU COM OUTRO LÍQUIDO APROPRIADO, NO QUAL SE EXERCE UMA DETERMINADA PRESSÃO, QUE É A “PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO”. O TESTE HIDROSTÁTICO TEM POR FINALIDADE A DETECÇÃO DE POSSÍVEL DEFEITOS, FALHAS OU VAZAMENTOS EM SOLDAS, ROSCAS, PARTES MANDRILHADAS E EM OUTRAS LIGAÇÕES NO PRÓPRIO VASO OU EM SEUS ACESSÓRIOS EXTERNOS OU INTERNOS.

EXCEPCIONALMENTE, O TESTE PODE SER FEITO COM AR COMPRIMIDO, (TESTE PNEUMÁTICO), OU PARCIAL COM ÁGUA E AR COMPRIMIDO (TESTE HIDROPNEUMÁTICO). O EMPREGO DO AR COMPRIMIDO É, ENTRETANTO, MUITO PERIGOSO, PORQUE A COMPRESSÃO DO AR, OU DE QUALQUER OUTRO GÁS, ACUMULA ENERGIA POTENCIAL, E DESSA FORMA, HAVENDO A LIBERAÇÃO SÚBITA DA ENERGIA ACUMULADA, NO CASO DE UMA FALHA, PODE PROVOCAR UMA EXPLOÇÃO, COM LANÇAMENTO DE ESTILHAÇOS DO VASO ÀS VEZES A GRANDE DISTÂNCIA, DESTA FORMA A UTILIZAÇÃO DA ALTERNATIVA DE TESTES ENVOLVENDO AR COMPRIMIDO DEVE SER EVITADA, E SÓ UTILIZADA QUANDO FOR IMPOSSÍVEL O TESTE HIDROSTÁTICO.

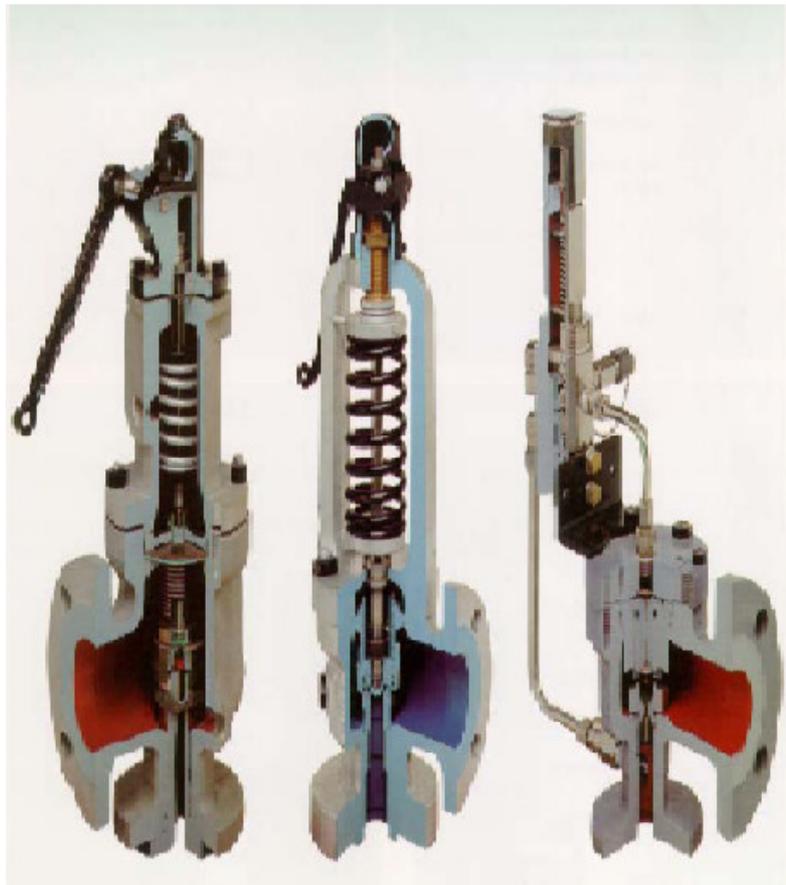
O TESTE DE ESTANQUEIDADE DEVE SER FEITO NA FÁBRICA OU NO CAMPO, NOS CASOS EM QUE O VASO SEJA ENVIADO EM PARTES AO LOCAL DA INSTALAÇÃO. EM QUALQUER CASO, ESSE TESTE DEVE SER REALIZADO:

- PELO MENOS 48 HORAS APÓS A CONCLUSÃO DA ÚLTIMA SOLDAGEM;
- DEPOIS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS;
- ANTES DE QUALQUER REVESTIMENTO INORGÂNICO INTERNO OU EXTERNO AO VASO.

É CONVENIENTE QUE O VASO FIQUE EM POSIÇÃO HORIZONTAL, PARA DIMINUIR O DIFERENCIAL DE PRESSÃO. TODAS AS ABERTURAS DO VASO SÃO MANTIDAS FECHADAS COM FLANGES CEGOS OU PEÇAS EQUIVALENTES. A ELEVAÇÃO DA PRESSÃO DEVE SER LENTA, MANTENDO-SE DEPOIS PELO MENOS POR 30 MINUTOS NO SEU VALOR MÁXIMO. DURANTE O TESTE DEVEM SER CUIDADOSAMENTE EXAMINADAS TODAS AS SOLDAS E TODOS OS PONTOS PASSÍVEIS DE VAZAMENTOS (EX. MANDRILAGEM DE TUBOS), BEM COMO A POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE DEFORMAÇÕES ANORMAIS.

EXCETO NO CASO DE VASOS DE MATERIAIS ADEQUADOS PARA BAIXAS TEMPERATURAS, NÃO DEVE SER PERMITIDO NENHUM TESTE DE PRESSÃO, ESTANDO A ÁGUA EM TEMPERATURA INFERIOR A 15°C. POR SE TRATAR DE UMA OPERAÇÃO DE RISCO, O TESTE HIDROSTÁTICO, DEVE SER PRECEDIDO DE ALGUMAS PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA, TAIS COMO:

INSTALAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE ALÍVIO DE PRESSÃO NO VASO ( VÁLVULA DE ALÍVIO, DISCO DE RUPTURA, ETC.) CALIBRADO PARA ABRIR COM PRESSÃO SUPERIOR À DO TESTE, CALIBRAÇÃO DE MANÔMETROS E DUPLICAÇÃO DOS MESMOS, PREVISÃO DE ESPAÇO LIVRE E DE FÁCIL ACESSO.



EXEMPLO DE DISPOSITIVO DE SEGURANÇA: PSV (PRESSURE SAFETY VALVE)

### 2.8.6 PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO

É DE TODA CONVENIÊNCIA QUE A PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO SEJA MAIS ALTA POSSÍVEL, COMPATÍVEL COM A SEGURANÇA DA PARTE MAIS FRACA DO VASO. ESTA PRESSÃO É POR ISSO SEMPRE SUPERIOR À PRESSÃO DE PROJETO E, TAMBÉM, À PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL DO VASO, E, PORTANTO, DURANTE O TESTE HIDROSTÁTICO, O MATERIAL FICARÁ SUBMETIDO A UMA TENSÃO ACIMA DE SUA TENSÃO ADMISSÍVEL. ESSA SITUAÇÃO PODE SER ADMITIDA, COM SEGURANÇA, PELO FATO DE O TESTE HIDROSTÁTICO SER REALIZADO, QUASE SEMPRE, UMA ÚNICA VEZ, DURANTE POUCO TEMPO, COM O VASO NOVO, COM ÁGUA, E EM TEMPERATURA AMBIENTE.

O VALOR DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO É TAMBÉM ESTABELECIDO PELAS NORMAS DE PROJETO, PORQUE ESSA PRESSÃO PODERÁ EVIDENTEMENTE SER TANTO MAIOR QUANTO MAIOR FOR O COEFICIENTE DE SEGURANÇA ADOTADO PELA NORMA PARA A FIXAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL.

PARA OS VASOS CONSTRUÍDOS DE ACORDO COM O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, A PRESSÃO DE TESTE DEVE SER NO MÍNIMO **1,3 VEZES A PMTA DO VASO** (CORRESPONDENTE À ESPESSURA CORROÍDA), CONFORME O PARÁGRAFO UG-99 DESSA NORMA. A **PRESSÃO DE TESTE PODERÁ TAMBÉM SER 1,3 VEZ A PMTA DO VASO NOVO E FRIO**, QUE SERÁ EM GERAL UM VALOR MAIS ALTO.

QUANDO A PMTA DO VASO NÃO FOR CALCULADA, PERMITE-SE QUE A PRESSÃO DE TESTE SEJA:

$$1,3 \times \text{PRESSÃO DO PROJETO} \times S_c/S_H$$

EM QUE  $S_c$  e  $S_H$  SÃO, RESPECTIVAMENTE, AS TENSÕES ADMISSÍVEIS DO MATERIAL EM TEMPERATURA AMBIENTE E NA TEMPERATURA DE PROJETO DO VASO.

## 2.9 CÁLCULO DE VASOS DE PRESSÃO PELO CÓDIGO ASME SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1

SERÁ VISTO AGORA UM RESUMO DAS FÓRMULAS E CRITÉRIOS DO CÓDIGO **ASME**, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, PARA O CÁLCULO MECÂNICO DOS COMPONENTES USUAIS DE UM VASO DE PRESSÃO.

ESSE CÓDIGO SÓ CONSIDERA O EFEITO DA PRESSÃO INTERNA OU EXTERNA, FICANDO OS DEMAIS CARREGAMENTOS INTEIRAMENTE A CRITÉRIO DO PROJETISTA, NÃO SÓ QUANTO À FORMA DE CALCULÁ-LOS, COMO TAMBÉM QUANTO À NECESSIDADE OU NÃO DE SEREM CALCULADOS. AS FÓRMULAS DESSE CÓDIGO SÃO BASEADAS NA TEORIA DA MEMBRANA, CONTENDO, ENTRETANTO, ALGUNS COEFICIENTES EMPÍRICOS DE CORREÇÃO. DESSA FORMA, NÃO SÃO LEVADOS EM CONSIDERAÇÃO OS ESFORÇOS DE FLEXÃO DECORRENTES DA ESPESSURA OU DAS DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS. ESSE CÓDIGO TEM TAMBÉM UM PROCESSO SEMI-ANALÍTICO PARA O CÁLCULO DE FLANGES, DESCRITO NO APÊNDICE OBRIGATÓRIO 2 (*MANDATORY APPENDIX*).

### 2.9.1 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS PARA PRESSÃO INTERNA

O CÓDIGO DISTINGUE ENTRE OS CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA E DE GRANDE ESPESSURA (PARÁGRAFO UG-27), **DENOMINANDO DE “GRANDE ESPESSURA” OS CASCOS PARA OS QUAIS SE TENHA:**

$e > 1/2R$  OU  $P > 0,385 SE$ , EM QUE:

**e** = ESPESSURA MÍNIMA PARA PRESSÃO INTERNA;

**R** = RAIO INTERNO DO CILINDRO;

**P** = PRESSÃO INTERNA DE PROJETO, ACRESCENTAR O EFEITO DA COLUNA HIDROSTÁTICA DO LÍQUIDO CONTIDO, QUANDO FOR O CASO;

**S** = TENSÃO ADMISSÍVEL BÁSICA DO MATERIAL;

**E** = COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE SOLDA, COMO EXPLICADO A SEGUIR.

- **CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA ESPESSURA** - PARA ESSES CASOS, A ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA DEVE SER CALCULADA PELA SEGUINTE FÓRMULA (PARÁGRAFO UG-27):

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6 P} + C$$

**ESSA FÓRMULA É DIRETAMENTE DERIVADA DA EXPRESSÃO TEÓRICA DA TENSÃO MÁXIMA CIRCUNFERENCIAL DE MEMBRANA EM UM CILINDRO.**

NESSA FÓRMULA TEM-SE:

**e, R, P** = SIGNIFICADOS COMO ACIMA,

**S** = TENSÃO ADMISSÍVEL BÁSICA DO MATERIAL, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE PROJETO DO VASO. ESSAS TENSÕES SÃO OBTIDAS NAS TABELAS DO CÓDIGO, PARA OS MATERIAIS ACEITOS PELO MESMO:

- TABELA UCS-23 - AÇOS-CARBONO E AÇOS DE BAIXA LIGA;
- TABELA UNF-23.1 - ALUMÍNIO E LIGAS DE ALUMÍNIO;
- TABELA UNF-23.2 - COBRE E LIGAS DE COBRE;
- TABELA UNF-23.3 - NÍQUEL E LIGAS DE NÍQUEL;
- TABELA UNF-23.4 - TITÂNIO E LIGAS DE TITÂNIO;
- TABELA UNF-23.5 - ZIRCÔNIO E LIGAS DE ZIRCÔNIO;
- TABELA UHA-23 - AÇOS INOXIDÁVEIS E OUTROS AÇOS DE ALTA LIGA;
- TABELA UHT-23 - AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA (TEMPERADO E REVENIDO);
- TABELA ULT-23 - LIGAS DE ALUMÍNIO E DE NÍQUEL PARA SERVIÇOS CRIOGÊNICOS.

Tabela 10.1 Tensões admissíveis do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (baseada na Tabela UCS-23, deste código)  
Tensões em MPa — veja a seguir as tensões em kg/cm<sup>2</sup>

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (MPa) @ temperatura (°C)																		
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600		
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	108,0	108,0	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6							
	Tubos cond.	A-53-A	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	78,8	71,6	62,3	54,4	47,5	40,0							
	Tubos cond.	A-53-B	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	98,4	89,5	75,9	63,4	52,9	38,7							
	Tubos t.c. Forjados	A-179 A-181-60	92,3 92,3	92,3 92,3	92,3 92,3	92,3 92,3	91,8 91,8	90,4 90,4	87,5 87,5	83,8 83,8	73,3 73,3	63,4 63,4	55,8 55,8	47,3 47,3							
Aço-carbono Si para temperaturas	Chapas	A-515-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0					
	Chapas	A-515-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0					
	Chapas	A-515-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0					
	Tubos cond.	A-106-A	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	92,4	84,4	73,3	64,0	56,0	47,3	36,0	23,6					
	Tubos cond.	A-106-B	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0					
	Tubos t.c.	A-210-A1	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0						
	Forjados	A105	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0					
	Fundidos	A-216-WC1	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0					
	temperaturas	Chapas	A-516-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0				
		Chapas	A-516-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0				
Chapas		A-516-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0					
Tubos cond.		A-333-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0					
Tubos t.c.		A-334-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	
Forjados		A-350-LF1	117,8	117,8	117,8	117,8	107,3	104,2	101,1	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0					
Forjados		A-350-LF2	137,7	137,7	135,5	135,0	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0					
Fundidos		A-352-LCB	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9													
Aço-liga 1/2 Mn	Chapas	A-204-A	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,0	126,7	123,8	101,9	70,1	43,8						
	Chapas	A-204-B	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	133,6	104,4	70,1	43,8						
	Tubos cond.	A-335-P1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8					
	Tubos t.c.	A-209-T1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8					
	Forjados	A-182-F1	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	133,6	104,4	70,1	43,8					
	Fundidos	A-217-WC1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	127,8	126,2	123,1	119,8	116,9	100,1	70,1	43,8						

ENGR. ALEXANDRE MARÇHON REDDO

Tabela 10.1 Tensões admissíveis do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (baseada na Tabela UCS-23, deste código) (continuação)

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (MPa) @ temperatura (°C)																		
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
Aço-liga 1 1/4 Cr - 1/2 Mo	Chapas	A-387-11 c11	118	118	118	118	118	118	118	118	118	116	113	99,2	75	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
	Tubos cond.	A-335-P11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
	Tubos t.c.	A-199-T11	106	101	96,4	93,6	91,0	89,5	87,8	86,5	84,6	82,6	80,9	78,5	69,0	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
	Tubos t.c.	A-213-T11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
	Forjados	A-182-F11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
	Fundidos	A-217-WC6	138	138	138	138	138	138	138	137	136	132	129	103	75	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3
Aço-liga 2 1/4 Cr - 1 Mo	Chapas	A-387-22 c11	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6
	Tubos cond.	A-335-P22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6
	Tubos t.c.	A-199-T22	107	104	103	103	103	103	103	103	102	102	100	95,3	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6
	Tubos t.c.	A-213-T22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6
	Forjados	A-182-F22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6
	Fundidos	A-217-WC9	138	136	134	133	132	132	131	129	127	123	119	111,3	89,4	65,1					
Aço-liga 5 Cr - 1/2 Mo	Chapas	A-387-5 c11	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9
	Tubos cond.	A-335-P5	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9
	Tubos t.c.	A-199-T5	104	100	98,5	97,9	96,8	96,0	94,7	93,4	91,5	88,2	85,3	77,6	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	13,1	6,9
	Tubos t.c.	A-213-T5	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	9,0
	Forjados	A-182-F5	138	134	132	132	130	129	127	125	121	117	101	81,2	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9
	Fundidos	A-217-C5	177	171	170	169	168	166	164	160	155	131	104	81,2	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9
Aço-liga 2 1/2 Ni	Chapas	A-203-B	138	138	138	138	138	135	129	121	101	82,6	67,0	49,8	36,0	23,6					
	Tubos cond.	A-333-7	128	128	128	128	123	119													
	Tubos t.c.	A-334-7	128	128	128	128	123	119													
	Fundidos	A-352-LC2	138	138	138	138	138	135													
Aço-liga 3 1/2 Ni	Chapas	A-203-D	128	128	128	128	128	125	120	112	95,0	78,5	64,6	49,2	36,0	23,6					
	Tubos cond.	A-333-3	128	128	128	128	123	119													
	Tubos t.c.	A-334-3	128	128	128	128	123	119													
	Fundidos	A-352-LC3	138	138	138	138	138	135													

Observações:

- "Tubos cond." = tubos para condução; "Tubos t.c." = tubos para troca de calor.
- Todos os tubos incluídos nesta tabela são sem costura.

Tabela 10.1 Tensões admissíveis do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (baseada na Tabela UCS-23, deste código)

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (kg/cm²) @ temperatura (°C)																		
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600		
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	1104	1104	1104	1104	1084	1064	1032	993	908	759	635	466							
	Tubos cond.	A-53-A	823	823	823	823	823	823	804	731	636	555	485	409							
	Tubos cond.	A-53-B	1027	1027	1027	1027	1027	1027	1005	913	775	647	541	395							
	Tubos t.c.	A-179	942	942	942	942	937	923	893	855	748	647	570	483							
	Forjados	A-181-60	942	942	942	942	937	923	893	855	748	647	570	483	345	224					
Aço-carbono Si para altas temperaturas	Chapas	A-515-60	1202	1202	1202	1202	1167	1139	1102	1053	908	759	635	466	329	224					
	Chapas	A-515-65	1308	1308	1308	1308	1273	1244	1206	1147	970	801	642	466	329	224					
	Chapas	A-515-70	1406	1406	1406	1406	1376	1350	1310	1240	1033	844	684	519	350	224					
	Tubos cond.	A-106-A	963	963	963	963	963	963	943	861	748	654	571	483	367	240					
	Tubos cond.	A-106-B	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	635	466	329	224					
Aço-c para altas temperaturas	Tubos t.c.	A-210-A1	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	635	466	329	224					
	Forjados	A-105	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	684	519	350	224					
	Fundidos	A-216-WC1	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	684	519	350	224					
	Chapas	A-516-60	1202	1202	1202	1202	1167	1139	1102	1053	908	759	612	466	329	224					
	Chapas	A-516-65	1308	1308	1308	1308	1273	1244	1206	1147	970	801	612	466	329	224					
Aço-carbono Si para baixas temperaturas	Chapas	A-516-70	1406	1406	1406	1406	1376	1350	1310	1240	1033	844	654	519	350	224					
	Tubos cond.	A-333-6	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	612	466	329	224					
	Tubos t.c.	A-334-6	1202	1202	1202	1202	1202	1202													
	Forjados	A-350-LF1	1202	1202	1202	1156	1095	1064	1032	993	908	759	612	466	329	224					
	Forjados	A-350-LF2	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	654	471	350	224					
Fundidos	A-352-LCB	1308	1308	1308	1308	1272	1244														
Aço-liga H Mo	Chapas	A-204-A	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1307	1294	1264	1040	716	447					
	Chapas	A-204-B	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1399	1363	1066	716	447					
	Tubos cond.	A-335-P1	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1101	1081	1048	1024	978	716	447					
	Tubos t.c.	A-209-T1	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1101	1081	1048	1024	978	716	447					
	Forjados	A-182-F1	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1399	1364	1066	716	447					
	Fundidos	A-217-WC1	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1304	1289	1257	1223	1194	1022	716	447				

Tabela 10.1 Tensões admissíveis do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (baseada na Tabela UCS-23, deste código) (continuação)

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (kg/cm <sup>2</sup> ) @ temperatura (°C)																			
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	
Aço-liga 1 ¼ Cr - 1/2 Mo	Chapas	A-387-11 c/1	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1201	1181	1158	1013	765	540	378	262	182	127	84
	Tubos cond.	A-335-P11	1202	1202	1181	1147	1114	1097	1078	1059	1039	1012	989	964	763	540	378	262	182	127	84	
	Tubos t.c.	A-199-T11	1083	1027	984	955	929	914	897	883	864	844	826	802	704	540	378	262	182	127	84	
	Tubos t.c.	A-213-T11	1202	1202	1181	1147	1114	1097	1078	1059	1039	1012	989	964	763	540	378	262	182	127	84	
	Forjados	A-182-F11	1202	1202	1181	1147	1114	1097	1078	1059	1039	1012	989	964	763	540	378	262	182	127	84	
	Fundidos	A-217-WC6	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1403	1384	1350	1320	1055	765	540	378	262	182	127	84	
Aço-liga 2 ¼ Cr - 1 Mo	Chapas	A-387-22 c/1	1202	1202	1202	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1011	830	653	491	355	243	159	98
	Tubos cond.	A-335-P22	1202	1202	1202	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1011	830	653	491	355	243	159	98
	Tubos t.c.	A-199-T-22	1097	1097	1097	1054	1054	1054	1054	1047	1040	1023	972	830	653	491	355	243	159	98		
	Tubos t.c.	A-213-T-22	1202	1202	1202	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1011	830	653	491	355	243	159	98
	Forjados	A-182-F-22	1202	1202	1202	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1167	1011	830	653	491	355	243	159	98
	Fundidos	A-217-WC9	1406	1385	1364	1358	1352	1347	1338	1319	1299	1258	1217	1136	913	665	465	313	205	133	84	
Aço-liga 5 Cr - 1/2 Mo	Chapas	A-387-5 c/1	1202	1167	1160	1154	1143	1132	1113	1092	1060	1019	978	819	636	479	358	264	185	119	70	
	Tubos cond.	A-335-P5	1202	1167	1160	1154	1143	1132	1113	1092	1060	1019	978	819	636	479	358	264	185	119	70	
	Tubos t.c.	A-199-T5	1062	1019	1005	999	988	979	967	953	934	900	870	792	636	479	358	264	189	134	91	
	Tubos t.c.	A-213-T5	1202	1167	1160	1154	1143	1132	1113	1092	1060	1019	978	819	636	479	358	264	185	119	70	
	Forjados	A-182-F5	1406	1364	1350	1167	1167	1322	1301	1274	1236	1195	1036	828	636	479	358	264	185	119	70	
	Fundidos	A-217-C5	1807	1751	1737	1731	1714	1699	1672	1638	1586	1343	1059	828	636	479	358	264	185	119	70	
Aço-liga 2 ½ Ni	Chapas	A-203-B	1406	1406	1406	1406	1406	1382	1319	1234	1033											
	Tubos cond.	A-333-7	1308	1308	1308	1308	1252	1211														
	Tubos t.c.	A-334-7	1308	1308	1308	1308	1252	1211														
	Fundidos	A-352-LC2	1406	1406	1406	1406	1406	1382														
Aço-liga 3 ½ Ni	Chapas	A-203-D	1308	1308	1308	1308	1302	1279	1221	1140	970											
	Tubos cond.	A-333-3	1308	1308	1308	1308	1252	1211														
	Tubos t.c.	A-334-3	1308	1308	1308	1308	1252	1211														
	Fundidos	A-352-LC3	1406	1406	1406	1406	1406	1382														

Observações:

- "Tubos cond." = tubos para condução; "Tubos t.c." = tubos para troca de calor.
- Todos os tubos incluídos nesta tabela são sem costura.

Tabela 10.1 Tensões admissíveis do código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (baseada na Tabela UCS-23, deste código) (continuação)

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (MPa) @ temperatura (°C)																			
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650	
Aço-liga 1 ¼ Cr - ½ Mo	Chapas	A-387-11 c/1	118	118	118	118	118	118	118	118	116	113	99,2	75	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3		
	Tubos cond.	A-335-P11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3	
	Tubos t.c.	A-199-T11	106	101	96,4	93,6	91,0	89,5	87,8	86,5	84,6	82,6	80,9	78,5	69,0	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3	
	Tubos t.c.	A-213-T11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3	
	Forjados	A-182-F11	118	118	116	112	109	107	106	104	102	99,2	96,9	94,4	74,7	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3	
	Fundidos	A-217-WC6	138	138	138	138	138	138	138	137	136	132	129	103	75	52,9	37,0	25,6	17,8	12,4	8,3	
Aço-liga 2 ¼ Cr - 1 Mo	Chapas	A-387-22 c/1	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6	
	Tubos cond.	A-335-P22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6	
	Tubos t.c.	A-199-T22	107	104	103	103	103	103	103	103	102	102	100	95,3	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6	
	Tubos t.c.	A-213-T22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6	
	Forjados	A-182-F22	118	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	99,0	81,3	64,0	48,1	34,8	23,9	15,6	9,6	
	Fundidos	A-217-WC9	138	136	134	133	132	132	131	129	127	123	119	111,3	89,4	65,1						
Aço-liga 5 Cr - ½ Mo	Chapas	A-387-5 c/1	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9	
	Tubos cond.	A-335-P5	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9	
	Tubos t.c.	A-199-T5	104	100	98,5	97,9	96,8	96,0	94,7	93,4	91,5	88,2	85,3	77,6	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	13,1	6,9	
	Tubos t.c.	A-213-T5	118	114	113	113	112	111	109	107	104	100	95,8	80,3	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9	
	Forjados	A-182-F5	138	134	132	132	130	129	127	125	121	117	101	81,2	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9	
	Fundidos	A-217-C5	177	171	170	169	168	166	164	160	155	131	104	81,2	62,3	46,9	35,1	25,9	18,2	11,6	6,9	
Aço-liga 2 ½ Ni	Chapas	A-203-B	138	138	138	138	138	135	129	121	101	82,6	67,0	49,8	36,0	23,6						
	Tubos cond.	A-333-7	128	128	128	128	123	119														
	Tubos t.c.	A-334-7	128	128	128	128	123	119														
	Fundidos	A-352-LC2	138	138	138	138	138	135														
Aço-liga 3 ½ Ni	Chapas	A-203-D	128	128	128	128	128	125	120	112	95,0	78,5	64,6	49,2	36,0	23,6						
	Tubos cond.	A-333-3	128	128	128	128	123	119														
	Tubos t.c.	A-334-3	128	128	128	128	123	119														
	Fundidos	A-352-LC3	138	138	138	138	138	135														

Observações:

- "Tubos cond." = tubos para condução; "Tubos t.c." = tubos para troca de calor.
- Todos os tubos incluídos nesta tabela são sem costura.

**E** = COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE SOLDA, CONFORME PARÁGRAFO UW-12 E TABELA UW-12 DO CÓDIGO, DE ACORDO COM O TIPO DE SOLDA E O GRAU DE INSPEÇÃO ADOTADO, PARA CILINDROS SEM COSTURA **E** = 1,0. ESSES COEFICIENTES, QUE ESTÃO APRESENTADOS NA TABELA 10.2, DESTINAM-SE A COMPENSAR A POSSÍVEL MENOR RESISTÊNCIA NA REGIÃO DA SOLDA, EM RELAÇÃO À CHAPA INTEIRA DE MESMA ESPESSURA, DEVIDO À EXISTÊNCIA DE DEFEITOS NA SOLDA.

PELO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, A EXIGÊNCIA PARA RADIOGRAFIA TOTAL DAS JUNTAS SOLDADAS SEGUE O SEGUINTE CRITÉRIO:

- SERVIÇO LETAL (FLUIDOS PERIGOSOS: H<sub>2</sub>S, CO) - **RAIO X TOTAL**;
- SERVIÇO COM H<sub>2</sub> (HIDROGÊNIO) - **RAIO X TOTAL**;
- SERVIÇO CÍCLICO - **RAIO X TOTAL**;
- TEMPERATURA DE PROJETO > 450°C - **RAIO X TOTAL**;
- AÇOS-LIGA: Mo, Cr-Mo, EM QUALQUER ESPESSURA - **RAIO X TOTAL**;
- AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO P/ ESPESSURA > 3/4" (19 mm) - **RAIO X TOTAL**;
- PARA QUALQUER MATERIAL ACIMA DE CERTA ESPESSURA O CÓDIGO EXIGE QUE SEJA FEITA RADIOGRAFIA TOTAL(TABELA UCS-57 ABAIXO):

### Espessura mínima para radiografia obrigatória

**Table UCS-57 - Thickness above which full radiographic examination of butt-welded joints is mandatory**

P-No & Group No. Classification of Material	Nominal thickness above which butt-welded joints shall be fully radiographed [in]
<b>1 Gr. 1, 2, 3</b>	<b>1 ¼</b>
<b>3 Gr. 1, 2, 3</b>	<b>3/4</b>
<b>4 Gr. 1, 2</b>	<b>5/8</b>
<b>5 Gr. 1, 2</b>	<b>0</b>
<b>9A Gr. 1</b>	<b>5/8</b>
<b>9B Gr. 1</b>	<b>5/8</b>
<b>10A Gr. 1</b>	<b>3/4</b>
<b>10B Gr. 2</b>	<b>5/8</b>
<b>10C Gr. 3</b>	<b>5/8</b>
<b>10F Gr. 6</b>	<b>3/4</b>

**P-Number** é um número que caracteriza grupos de materiais com a mesma soldabilidade.

Através do **P-Number** fixa-se características de tratamento térmico e do exame radiográfico de um equipamento.

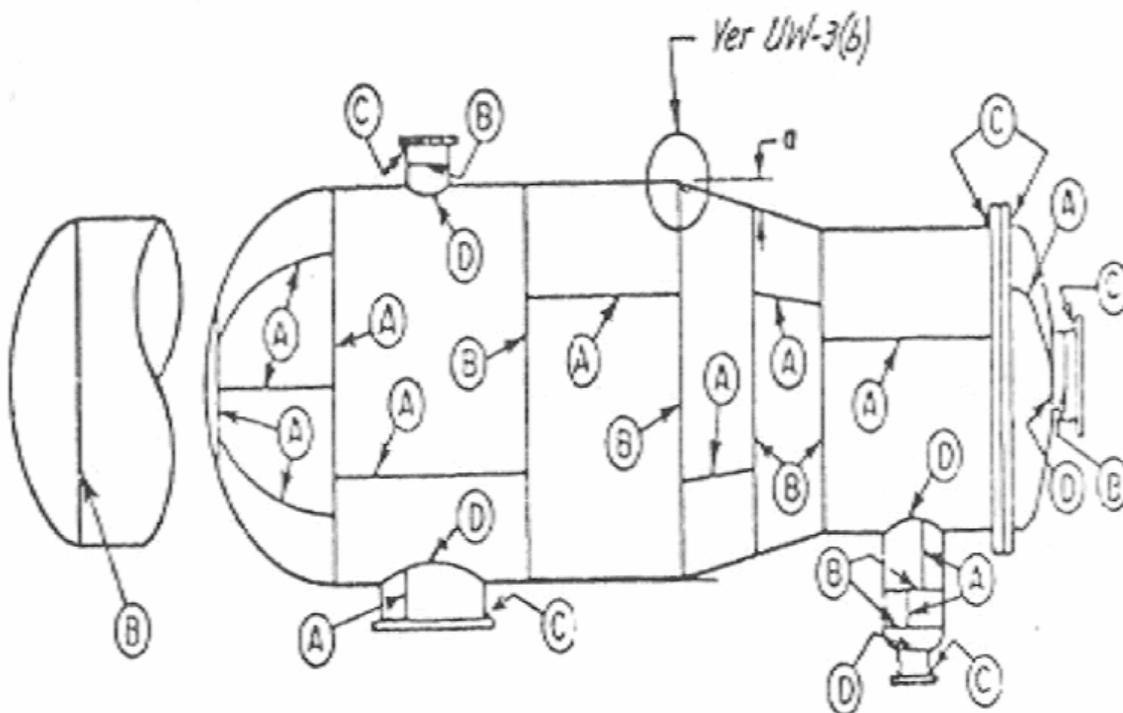
Nas tabelas de tensão admissível constantes das normas encontram-se a indicação do **P-Number** de cada material.

Tabela 10.2 Coeficientes de eficiência de solda  
(baseada na Tabela UW-12, do código ASME, Seção VIII, Divisão 1)

Tipo de solda	Limitações	Grau de inspeção		
		Radiografia total	Radiografia parcial (por amostragem)	Não radiografada
Solda de topo, feita por ambos os lados, ou por procedimento equivalente, de forma a obter penetração e fusão totais. (excluem-se as soldas com mata-junta permanente)	Nenhuma	1,00	0,85	0,70
Solda de topo, feita por um só lado, com mata-junta permanente.	Nenhuma	0,90	0,80	0,65
Solda de topo, feita por um só lado, sem mata-junta	Uso permitido somente para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15 mm, e diâmetro do vaso inferior a 610 mm	—	—	0,60
Solda sobreposta, com filete duplo de altura total	Uso permitido para soldas longitudinais em espessuras inferiores a 10 mm, e para soldas circunferenciais em espessuras inferiores a 15 mm	—	—	0,55

Nota: De acordo com a prática corrente (veja Itens 7.8 e 12.8), não é usual o emprego de soldas de topo com mata-junta permanente, nem soldas sobrepostas, nas soldas principais de cascos e tampos. Também não são usuais soldas não radiografadas.

**CATEGORIA DE JUNTAS** - DEFINE A LOCALIZAÇÃO DA JUNTA NO VASO, NÃO DEFINE O TIPO DE JUNTA. ATRAVÉS DA CATEGORIA DE JUNTA O CÓDIGO ASME ESTABELECE REQUISITOS ESPECIAIS QUANTO AO TIPO DE JUNTA E O GRAU DE INSPEÇÃO A QUE ESTARÃO SUJEITAS DETERMINADAS JUNTAS EM UM VASO DE PRESSÃO. REQUISITOS ESPECIAIS ESTES ESTABELECIDOS EM FUNÇÃO DO SERVIÇO, MATERIAL E ESPESSURA DO VASO.





**CATEGORIA A:** JUNTAS **LONGITUDINAIS** DO COSTADO E BOTAS, TRANSIÇÃO DE DIÂMETROS, PESCOÇO DE BOCAIS. TODAS AS JUNTAS DO CORPO DE ESFERA. SOLDAS CIRCUNFERENCIAIS LIGANDO TAMPOS HEMISFÉRICOS AO COSTADO.

**CATEGORIA B:** JUNTAS **CIRCUNFERENCIAIS** DO COSTADO E BOTAS, TRANSIÇÕES DE DIÂMETROS, PESCOÇO, DE BOCAIS. SOLDAS DE LIGAÇÃO ENTRE TAMPOS, EXCETO O HEMISFÉRICO, AO COSTADO.

**CATEGORIA C :** JUNTAS CONECTANDO FLANGES, ESPELHOS, TAMPOS PLANOS.

**CATEGORIA D** - JUNTAS DE LIGAÇÃO DE PESCOÇO DE BOCAIS E BOTAS AO COSTADO.

**C** = MARGEM PARA CORROSÃO E/OU PARA EROSIÃO OU USINAGEM, O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, NÃO ESTABELECE VALORES OU CRITÉRIOS PARA ESSA MARGEM, EXIGINDO SOMENTE (PARÁGRAFO UCS-25) QUE OS VASOS DESTINADOS A VAPOR, ÁGUA OU AR COMPRIMIDO, COM ESPESSURA CALCULADA DE PAREDE INFERIOR A 6 MM, TENHAM UMA MARGEM DE NO MÍNIMO 1/6 DA ESPESSURA.

### **2.9.2 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA**

(DE ACORDO COM O PARÁGRAFO UG-27):

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

**e** = ESPESSURA MÍNIMA PARA PRESSÃO INTERNA;

**R** = RAIO INTERNO DO CILINDRO;

**S** = TENSÃO ADMISSÍVEL BÁSICA DO MATERIAL;

**E** = COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE SOLDA.

NESSA EXPRESSÃO, A ESPESSURA **e** E A TENSÃO ADMISSÍVEL **S** TERÃO OS VALORES CORRESPONDENTES À CONDIÇÃO PARA A QUAL A **PMTA** ESTIVER SENDO CALCULADA, ISTO É, A ESPESSURA PODE OU NÃO INCLUIR A MARGEM PARA CORROSÃO, E A TENSÃO ADMISSÍVEL PODE SER RELATIVA À TEMPERATURA DE PROJETO OU À TEMPERATURA AMBIENTE. ESSA MESMA OBSERVAÇÃO QUANTO AOS VALORES DE ESPESSURA E DA TENSÃO ADMISSÍVEL VALE TAMBÉM PARA TODAS AS DEMAIS FÓRMULAS DE PMTA.

#### **2.9.2.1 CASCOS CILÍNDRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA (4 CONDIÇÕES)**

PARA O TAMPO CILÍNDRICO PODEREMOS TER 4 CONDIÇÕES PARA A **PMTA**:

➤ **EQUIPAMENTO NOVO E FRIO:**  $PMTA_{NF} = \frac{S E e}{R + 0,6 e}$

EX: TESTE HIDROSTÁTICO

OBS: **S** = TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA AMBIENTE.



➤ EQUIPAMENTO NOVO E QUENTE:  $PMTA_{NQ} = \frac{S E e}{R + 0,6 e}$

EX: OPERAÇÃO

OBS: **S** = TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA DE PROJETO.

➤ EQUIPAMENTO CORROÍDO E QUENTE:  $PMTA_{CQ} = \frac{S E (e - C)}{(R + C) + 0,6(e - C)}$

EX: NO FINAL DA VIDA ÚTIL.

OBS: **S** = TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA DE PROJETO.

➤ EQUIPAMENTO CORROÍDO E FRIO:  $PMTA_{CF} = \frac{S E (e - C)}{(R + C) + 0,6(e - C)}$

EX: TESTE NO FINAL DA VIDA ÚTIL

OBS: **S** = TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA AMBIENTE.

### 2.9.3 CÁLCULO DE CASCOS CILÍNDRICOS DE GRANDE ESPESSURA

DE ACORDO COM OS PARÁGRAFOS 1-1 E 1-2 DO CÓDIGO, A ESPESSURA MÍNIMA DOS CASCOS CILÍNDRICOS DENOMINADOS DE “GRANDE ESPESSURA” (ISTO É, COM  $e > 1/2R$  OU  $P > 0,385 SE$ ) DEVE SER CALCULADA PELA FÓRMULA:

$$e = R \left[ \sqrt{\frac{SE + P}{SE - P}} - 1 \right] + C$$

A ESPESSURA MÍNIMA EM FUNÇÃO DAS TENSÕES LONGITUDINAIS (QUANDO FOR NECESSÁRIO O CÁLCULO) É DADA PELA FÓRMULA:

$$e = R \left[ \sqrt{\frac{P + 1}{SE}} - 1 \right] + C$$

\*ESSA ÚLTIMA FÓRMULA É VÁLIDA QUANDO  $e > 1/2R$  OU  $P > 1,25 SE$ .

#### 2.9.4 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS PARA A PRESSÃO INTERNA

PARA OS CASCOS ESFÉRICOS SUBMETIDOS À PRESSÃO INTERNA, O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, TAMBÉM DISTINGUE ENTRE OS DE PEQUENA E DE GRANDE ESPESSURA,.  
DENOMINANDO OS DE **GRANDE ESPESSURA**, OS CASCOS PARA OS QUAIS SE TENHA:

$$e > 0,356 R \text{ OU } P > 0,665 SE$$

- **CASCOS ESFÉRICOS DE PEQUENA ESPESSURA** - A ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA É DADA PELA SEGUINTE FÓRMULA (PARÁGRAFO UG-27):

$$e = \frac{PR}{2SE - 0,2P} + C$$

ESTA FÓRMULA É DIRETAMENTE DERIVADA DA EXPRESSÃO TEÓRICA DA TENSÃO MÁXIMA DE MEMBRANA. COMPARANDO-SE COM A FÓRMULA DA ESPESSURA DO CILINDRO, VÊ-SE QUE A ESPESSURA NECESSÁRIA PARA UM CASCO ESFÉRICO É QUASE IGUAL À METADE DA ESPESSURA PARA UM CASCO CILÍNDRICO DE MESMO DIÂMETRO.

#### 2.9.5 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS DE PEQUENA ESPESSURA - CÁLCULO DE PMTA

A PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL SERÁ:

$$PMTA = \frac{2SEe}{R + 0,2e}$$

**S** = TENSÃO ADMISSÍVEL BÁSICA DO MATERIAL, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE PROJETO DO VASO.

#### 2.9.6 CÁLCULO DE CASCOS ESFÉRICOS DE GRANDE ESPESSURA

DE ACORDO COM O PARÁGRAFO 1.3 DO CÓDIGO, A ESPESSURA MÍNIMA PARA ESSES CASCOS É DADA PELA FÓRMULA:

$$e = R \left[ \sqrt[3]{\frac{2(SE+P)}{2SE-P}} - 1 \right] + C$$

TODAS ESSAS FÓRMULAS APLICAM-SE TAMBÉM AOS TAMPOS QUE SEJAM UM HEMISFÉRIO COMPLETO.



### **2.9.7 CÁLCULO DE TAMPOS ELÍPTICOS PARA A PRESSÃO INTERNA**

O CÓDIGO FORNECE FÓRMULAS DIFERENTES PARA OS TAMPOS ELÍPTICOS COM RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS DE 2:1, E PARA OS TAMPOS COM OUTRAS RELAÇÕES DE SEMI-EIXOS, QUANDO SUBMETIDOS À PRESSÃO PELO LADO CÔNCAVO.

#### **2.9.7.1 TAMPOS ELÍPTICOS COM RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS 2:1**

A ESPESSURA MÍNIMA PARA A PRESSÃO INTERNA É DADA PELA FÓRMULA (PARÁGRAFO UG-32):

$$e = \frac{PR}{SE - 0,1P} + C$$

COMPARANDO-SE ESSA FÓRMULA COM A DOS CILINDROS DE PEQUENA ESPESSURA, VÊ-SE QUE A ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA RESULTA PRATICAMENTE A MESMA EM AMBOS OS CASOS. DEVE SER OBSERVADO, ENTRETANTO, QUE PARA OS TAMPOS ELÍPTICOS DEVE SER ACRESCENTADA UMA SOBREESSPURA PARA COMPENSAR O ADELGAÇAMENTO DAS CHAPAS NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO.

A PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL SERÁ:

PMTA:  $\frac{SEe}{R + 0,1e}$

#### **2.9.7.2 TAMPOS ELÍPTICOS COM OUTRA RELAÇÃO DE SEMI-EIXOS**

PARA ESSES TAMPOS A ESPESSURA MÍNIMA É OBTIDA PELA FÓRMULA (PARÁGRAFO 1-4):

$$e = \frac{PRK}{SE - 0,1P} + C, \text{ EM QUE } K = 1/6 [2 + (R/h)^2]$$

Tabela 10.3 Valores de K para cálculo de tampos elípticos  
(transcrita da Tabela 1-4-1, do código ASME, Seção VIII, Divisão 1)

R/h	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
K	1,83	1,73	1,64	1,55	1,46	1,37	1,29	1,21	1,14	1,07	1,00
R/h	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	—
K	0,93	0,87	0,81	0,76	0,71	0,66	0,61	0,57	0,53	0,50	—

### 2.9.8 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS PARA A PRESSÃO INTERNA

PARA TAMPOS TORIESFÉRICOS O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, DISTINGUE TAMBÉM DOIS CASOS: OS TAMPOS COM RAIOS DA SEÇÃO TOROIDAL IGUAL A 6% DO DIÂMETRO DO CILINDRO E O RAIOS MAIORES (DA COROA CENTRAL) IGUAL AO PRÓPRIO DIÂMETRO DO CILINDRO, E OS TAMPOS COM OUTRAS PROPORÇÕES.

#### 2.9.8.1 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS COM $r = 6\%D$ e $L=D$

PARA ESSES TAMPOS A ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA É CALCULADA PELA FÓRMULA (PARÁGRAFO UG-32):

$$e = \frac{0,885 PL}{SE} + C$$

EM QUE L É O RAIOS DA COROA CENTRAL, QUE COINCIDE COM O DIÂMETRO DO CILINDRO. O VALOR DE 6% ( $0,06D$ ) É O MÍNIMO PERMITIDO PELO CÓDIGO PARA O RAIOS MENOR DO PERFIL TORIESFÉRICO, E O VALOR  $L = 2R$  É O MÁXIMO PERMITIDO PARA O RAIOS DA COROA CENTRAL.

$$PMTA = \frac{SEe}{0,885L + 0,1e}$$

### 2.9.8.2 CÁLCULO DE TAMPOS TORIESFÉRICOS COM OUTRAS PROPORÇÕES

DE ACORDO COM O PARÁGRAFO 1.4 DO CÓDIGO, A ESPESSURA MÍNIMA NESSES CASOS SERÁ:

$$e = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + C$$

EM QUE **M** É DADO PELA EXPRESSÃO:

$$M = \frac{1}{4} (3 + \sqrt{L/r})$$

SENDO **L** e **r**, RESPECTIVAMENTE, OS RAIOS MAIOR E MENOR DO PERFIL TORIESFÉRICO. OS VALORES DE **M** ESTÃO DADOS NA TABELA 1-4.2 DO CÓDIGO, CONFORMA ABAIXO.

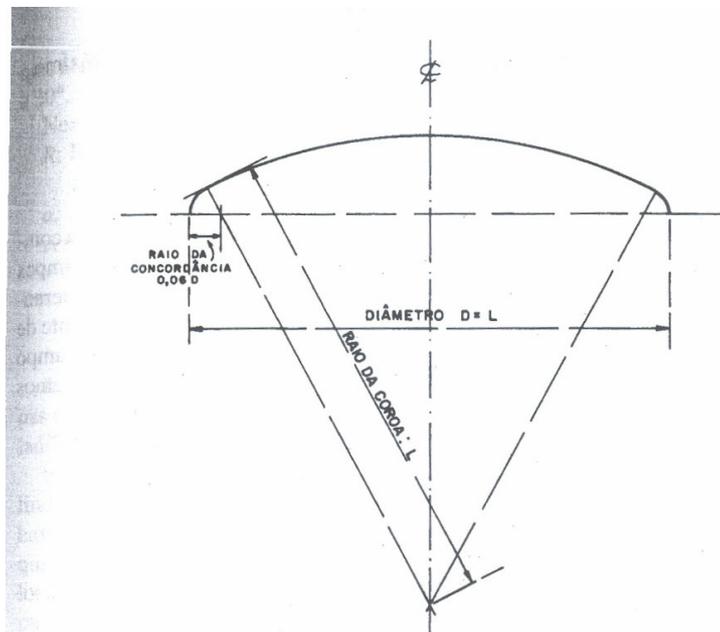


Fig. 10.1 Tambo toriesférico 6%.

em que **M** é dado pela expressão:

$$M = \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right),$$

sendo **L** e **r**, respectivamente, os raios maior e menor do perfil toriesférico. Os valores de **M** estão dados na Tabela 1-4.2 do código, repetida na Tabela 10.4.

Tabela 10.4 Valores de **M** para cálculo de tempos toriesféricos (transcrita da Tabela 1-4.2 do código ASME, Seção VIII, Divisão 1)

<i>L/r</i>	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50
<i>M</i>	1,00	1,03	1,06	1,08	1,10	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22
<i>L/r</i>	4,00	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
<i>M</i>	1,25	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,50
<i>L/r</i>	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	16,67
<i>M</i>	1,52	1,54	1,56	1,58	1,60	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77



$$PMTA = \frac{2 SEe}{LM + 0,2e}$$

### 2.9.9 CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO

COMO EXPLICADO NO ITEM 2.8.6, É DE TODA CONVENIÊNCIA QUE A PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO SEJA MAIS ALTA POSSÍVEL, COMPATÍVEL COM A SEGURANÇA DA PARTE MAIS FRACA DO VASO. ESTA PRESSÃO É POR ISSO SEMPRE SUPERIOR À PRESSÃO DE PROJETO E, TAMBÉM, À PRESSÃO MÁXIMA DE TRABALHO ADMISSÍVEL DO VASO, E, PORTANTO, DURANTE O TESTE HIDROSTÁTICO, O MATERIAL FICARÁ SUBMETIDO A UMA TENSÃO ACIMA DE SUA TENSÃO ADMISSÍVEL. ESSA SITUAÇÃO PODE SER ADMITIDA, COM SEGURANÇA, PELO FATO DE O TESTE HIDROSTÁTICO SER REALIZADO, QUASE SEMPRE, UMA ÚNICA VEZ, DURANTE POUCO TEMPO, COM O VASO NOVO, COM ÁGUA, E EM TEMPERATURA AMBIENTE.

O VALOR DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO É TAMBÉM ESTABELECIDO PELAS NORMAS DE PROJETO, PORQUE ESSA PRESSÃO PODERÁ EVIDENTEMENTE SER TANTO MAIOR QUANTO MAIOR FOR O COEFICIENTE DE SEGURANÇA ADOTADO PELA NORMA PARA A FIXAÇÃO DA TENSÃO ADMISSÍVEL.

DEVE-SE TER CUIDADO COM:

- QUALIDADE DA ÁGUA,
- TEMPERATURA DA ÁGUA (FRAGILIZAÇÃO À FRIO DO MATERIAL DO VASO),
- TEOR DE CLORETOS (CORROSÃO);
- A PRESSÃO DE TESTE É DETERMINADA NO PROJETO MECÂNICO.

DESTA FORMA TEMOS:

- **TESTE PADRÃO:** SUPÕE QUE O VASO ESTÁ NO FINAL DA VIDA ÚTIL (CONSIDERA O VASO COMO CORROÍDO).

$$P_{TP} = 1,5 (PMTA_{CQ} - \varrho \times H) \times Sa/Sq$$

ONDE:

**PMTA<sub>CQ</sub>** - CORROÍDO E QUENTE (MENOR ENTRE O TAMPO E O VASO);

**$\varrho$**  - PESO ESPECÍFICO DO LÍQUIDO EM OPERAÇÃO;

**H** - ALTURA MÁXIMA DE LÍQUIDO EM OPERAÇÃO;

**Sa** - TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA AMBIENTE;

**Sq** - TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA DE PROJETO;

\*OBS: SE O FLUIDO DE TRABALHO FOR GÁS SOME ( **$\varrho \times H$** )



- **TESTE ALTERNATIVO:** O CÓDIGO ASME DETERMINA O TESTE PADRÃO, MAS ABRE A POSSIBILIDADE PARA O TESTE ALTERNATIVO, DEVERÁ SER USADO NO MÍNIMO O MENOR. A PMTA DO VASO DEVERÁ SER A MENOR ENTRE OS COMPONENTES (TAMPO, CORPO E FLANGES).

$$P_{TA} = 1,5 (PMTA_{NF} - \rho_{H2O} \times H_{H2O})$$

\*OBS: MESMO SE O FLUIDO DE TRABALHO FOR GÁS.

PARA H PODE SER USADO CET, MAS PODE-SE USAR H TOTAL.

### 2.9.10 EXERCÍCIOS SOBRE CÁLCULO DE VASOS DE PRESSÃO PELO CÓDIGO ASME SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1

**1.0 R) ESPECIFICAR, CONFORME AS CONDIÇÕES DE PROJETO, QUAL A ESPESSURA DE CHAPA COMERCIAL A SER ADOTADA PARA UM VASO DE PRESSÃO CILÍNDRICO:**

P PROJ. = 25 KGF/ CM<sup>2</sup>

T PROJ. = 371°C

Di = 3000 mm

CET = 10.000 mm

C = 3mm (SOBREEPESURA DE CORROSÃO)

MATERIAL: ASTM A- 516 Gr60



**SOLUÇÃO:**

**A) CASCO:** A PREMISSE ADOTADA É QUE O VASO É DE **PEQUENA ESPESSURA**, DEVENDO SER ESTA PREMISSA “CHECADA” NO FINAL.

**A.1) ESPESSURA MÍNIMA ESTRUTURAL**

SABENDO-SE QUE A **ESPESSURA MÍNIMA ESTRUTURAL**, DEVERÁ SER O MAIOR VALOR ENTRE:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,0 \text{ mm} \\ \text{OU} \\ e_s = 2,5 + 0,001 D_i + C \end{array} \right.$$

TEREMOS:  $2,5 + (0,001 \times 3000) + 3 = 8,5 \text{ mm}$

COMO O MATERIAL: ASTM A-516 Gr60 E TEMPERATURA:  $371^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{F}$ , LOGO PELA TABELA UCS-23, TEREMOS QUE INTERPOLAR, PARA ACHARA O VALOR DA TENSÃO ADMISSÍVEL ( $S_{adm}$ ):

(POIS: PELA TABELA 10.1,  $P/T=350^\circ\text{C} - S_{adm} = 1102 \text{ KG/CM}^2$  e  $P/T=375^\circ\text{C} - S_{adm} = 1053 \text{ KG/CM}^2$ , E PARA  $T=371^\circ\text{C} - S_{adm} = ?$ , LOGO ADOTAREMOS  $S_{adm} = 1053 \text{ KG/CM}^2$  (CRITÉRIO MAIS CONSERVATIVO).

**A.2) PRIMEIRA TENTATIVA**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ADMITIR RAI O “X” PARCIAL.} \\ E = 0,85 \end{array} \right.$$

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6 P} + C$$

$$e = \frac{25 \times 3000/2}{1053 \times 0,85 - (0,6 \times 25)} + 3 = 45,61 \text{ mm}$$

**\*OBS: e REQ** = 42,61 mm (EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA).

**e PROJ** = 42,61 mm + 3 mm = 45,61 mm (EM FUNÇÃO DA SOBRESPESSURA DE CORROSÃO)



DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTE OPÇÕES COMERCIAIS:

44,40 - 47,50 ; LOGO ADOTAREMOS O VALOR MAIS CONSERVATIVO: **47,50mm** (e **COMERCIAL**).

### A.3) VERIFICAÇÃO DA HIPÓTESE INICIAL

DA TABELA UCS 57 (ABAIXO):

PARA P-NUMBER 1 E GROUP NUMBER 1, TEMOS QUE PARA ESPESSURAS ACIMA DE 1 ¼” (31,75 mm) DEVEREMOS TER RAIOS X TOTAL.

COMO A ESPESSURA COMERCIAL (47,50 mm) > 31,75 mm DEVEREMOS TER RAIOS X TOTAL.

#### EspeSSura mínima para radiografia obrigatória

Table UCS-57 - Thickness above which full radiographic examination of butt-welded joints is mandatory	
P-No & Group No. Classification of Material	Nominal thickness above which butt-welded joints shall be fully radiographed [in]
1 Gr. 1, 2, 3	1 ¼
3 Gr. 1, 2, 3	3/4
4 Gr. 1, 2	5/8
5 Gr. 1, 2	0
9A Gr. 1	5/8
9B Gr. 1	5/8
10A Gr. 1	3/4
10B Gr. 2	5/8
10C Gr. 3	5/8
10F Gr. 6	3/4



Material	P-number
Aços-carbono	1
C-1/2 Mo 1/2Cr-1/2 Mo	3
1 a 2 Cr-Mo	4
2¼ a 9 Cr-Mo	5
12 Cr (tipo 410)	6
12 Cr (tipo 405)	7
2¼ Ni	9A
3 ½ Ni	9B
5 Ni	11A-SG2
9 Ni	11A-SG1
Aços inoxidáveis austeníticos	8
Ligas de níquel	41 a 45
Ligas de cobre	31 a 35

LOGO: RECALCULANDO, AGORA COM E = 1:

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6 P} + C$$

$$e = \frac{25 \times 3000/2}{1053 \times 1 - (0,6 \times 25)} + 3 = 39,13 \text{ mm}$$

DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTE OPÇÕES COMERCIAIS:

37,50 - 41,30, LOGO ADOTAREMOS O VALOR MAIS CONSERVATIVO: **41,30mm.**  
(eCOMERCIAL)

\*OBS: e REQ = 36,13 (EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA).

e PROJ = 36,13mm + 3 mm = 39,13 mm (EM FUNÇÃO DA SOBRESPESSURA DE CORROSÃO)

**B) TAMPOS**

CONSIDERANDO-SE TODOS OS ITENS PARA RADIOGRAFIA TOTAL E SE:

$D_i \leq 1800$  mm (USA-SE UMA CHAPA APENAS).

LOGO  $E = 1$  ( NÃO HAVERIA SOLDA DE CHAPAS P/ FAZER O TAMPO);

**MAS NO CASO ANALISADO:**

$D_i = 3000$  mm > 1800 mm

LOGO NÃO PODERÁ SER UTILIZADA APENAS UMA ÚNICA CHAPA, ENTÃO DEVERÁ SER SEGUIDO O MESMO ROTEIRO:

**B.1) ESPESSURA MÍNIMA ESTRUTURAL:**

$$\left\{ \begin{array}{l} 4,0 \text{ mm} \\ \text{OU} \\ e_s = 2,5 + 0,001 D_i + C \end{array} \right.$$

TEREMOS:  $2,5 + (0,001 \times 3000) + 3 = 8,5$  mm

**B.2) CONSIDERANDO-SE O TAMPO TORIESFÉRICO FALSA ELIPSE (2:1).**

$$e = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + C$$

$$M = 1/4 (3 + \sqrt{L/r})$$

TAMPÓS TORIESFÉRICO ASME VIII, DIVISÃO 1		
ASME 6%	ASME 10%	ASME 2:1
D	D	0,904 D
0,06D	0,1D	0,173 D

**L**  
**r**

$L = 0,904 \times D = 0,904 \times 3000 = 2712$  mm

$r = 0,173 \times D = 0,173 \times 3000 = 519$  mm

$M = 1/4 (3 + \sqrt{L/r}) = 1/4 (3 + \sqrt{2712/519}) = 1,32.$



LOGO:

$$e = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + C$$

$$eREQ = \frac{25 \times 2712 \times 1,32}{2 \times 1053 \times 0,85 - (0,2 \times 25)} = 50,14 \text{ mm}$$

$$ePROJ = eREQ + C = 50,14 + 3 = 53,14 \text{ mm}$$

DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTE OPÇÕES COMERCIAIS:

“PARA ESPESSURAS SUPERIORES A 50,00 mm, DEVEM SER ADOTADOS VALORES INTEIROS EM MILÍMETROS. (DE ACORDO COM ASTM A-20)”

LOGO:

**ePROJ > 50 mm , LOGO, ADOTAR O VALOR INTEIRO LOGO ACIMA: 54,00 mm (eCOMERCIAL)**

### B.3) VERIFICAÇÃO DA HIPÓTESE INICIAL

DA TABELA UCS 57 (ABAIXO):

PARA P-NUMBER 1 E GROUP NUMBER 1, TEMOS QUE PARA ESPESSURAS ACIMA DE 1 ¼” (31,75 mm) DEVEREMOS TER RAIOS X TOTAL.

COMO A ESPESSURA COMERCIAL (54,00 mm) > 31,75 mm DEVEREMOS TER RAIOS X TOTAL.

COMO O RADIOGRAFIA SERÁ TOTAL NAS JUNTAS SOLDADAS, E =1, LOGO:

$$e = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + C$$

$$eREQ = \frac{25 \times 2712 \times 1,32}{2 \times 1053 \times 1 - (0,2 \times 25)} = 42,60 \text{ mm}$$

$$ePROJ = eREQ + C = 42,60 + 3 = 45,60 \text{ mm}$$

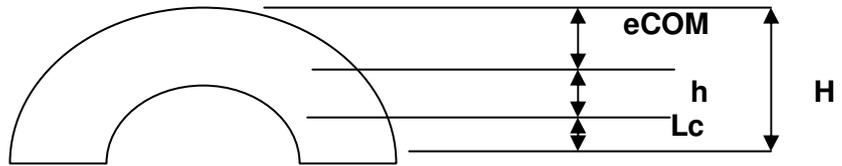
DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTE OPÇÕES COMERCIAIS:

44,40 - 47,50

LOGO ADOTAREMOS O VALOR MAIS CONSERVATIVO: **47,50mm. (eCOMERCIAL)**

VERIFICAR SE **eCOMERCIAL(TAMPO) ≥ eCOMERCIAL(CASCO): RESULTADO OK.**

OBS: PARA O TAMPO:



eCOM. = ESPESSURA COMERCIAL DO TAMPO;

h = ALTURA DO TAMPO;

Lc = PARTE CILÍNDRICA.

$$h = 0,25 D$$

$$H = Lc + h + eCOM \text{ (TAMPO)}$$

PARA Lc, O CÓDIGO ASME DETERMINA:

(“SAIA” CILÍNDRICA OPCIONAL (Lc))
  $\left\{ \begin{array}{l} eCOMERCIAL \text{ (TAMPO)} > eCOMERCIAL \text{ (CASCO)} \\ \\ eCOMERCIAL \text{ (TAMPO)} < 1,25 eCOMERCIAL \text{ (CASCO)} \end{array} \right.$ 
 COM O LIMITANTE DE:

(OBS: A NORMA PETROBRAS, DETERMINA SEMPRE USAR A “SAIA” CILÍNDRICA)

E SE:

(Lc = 3 x Ecomercial (TAMPO) ATÉ 38 mm)
  $\left\{ \begin{array}{l} eCOMERCIAL \text{ (TAMPO)} \geq 1,25 eCOMERCIAL \text{ (CASCO)}, \\ \\ \end{array} \right.$

**2.0 R) UM VASO DE PRESSÃO CILÍNDRICO HORIZONTAL, COM TAMPOS ELÍPTICOS 2:1 COM DIÂMETRO INTERNO 1500 mm E ESPESSURA DE 41, 30 mm, NUNCA FOI USADO.**

**DESEJA-SE USAR ESSE VASO PARA UM NOVO SERVIÇO (DIFERENTE DAQUELE PARA O QUAL FOI PROJETADO), COM AS SEGUINTESS CONDIÇÕES:**

- FLUIDO: VAPOR D’ÁGUA + ÁGUA NA FASE LÍQUIDA;
- PRESSÃO DE PROJETO: 48 Kgf/CM<sup>2</sup>
- SOBRESPESSURA DE CORROSÃO : 4 mm
- TEMPERATURA DE PROJETO = 399°C;
- NÍVEL MÁXIMO = 1200 mm
- PESO ESPECÍFICO DA ÁGUA = 1000 Kgf/m<sup>3</sup>



**SABENDO-SE QUE ESTE VASO FOI PROJETADO ORIGINALMENTE PARA AS SEGUINTESS CONDIÇÕES DE PROJETO:**

- FLUIDO: GÁS SULFÍDRICO (LETAL);
- PRESSÃO DE PROJETO = 48 Kgf/cm<sup>2</sup>;
- MATERIAL: ASTM A-516Gr65;
- TEMPERATURA DE PROJETO: 250°C;
- SOBREESSPURA DE CORROSÃO: 6,0 mm.

**PERGUNTA-SE:**

- A) É POSSÍVEL USAR ESTE VASO PARA ESTE NOVO SERVIÇO?**
- B) QUAL A PMTA DESTE VASO PARA O NOVO SERVIÇO?**

**SOLUÇÃO:**

PARA O PROJETO ORIGINAL:

FLUIDO: GÁS SULFÍDRICO (E=1) - RADIOGRAFIA TOTAL(100%);  
PRESSÃO DE PROJETO: 48 Kgf/CM<sup>2</sup>;  
MATERIAL: ASTM A-516 Gr65;  
TEMPERATURA DE PROJETO: 250°C  
SOBREESSPURA DE CORROSÃO: 6,0 mm  
Di = 1500 mm  
ESPESURA: 41, 30 mm

**A) CASCO:**

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6 P} + C$$

$$e_{REQ.} = \frac{PR}{SE - 0,6P} = \frac{48 \times 750}{1308 \times 1 - (0,6 \times 48)} = 28,14 \text{ mm}$$

$$e_{PROJ.} = e_{REQ.} + c = 28,14 + 6 = 34,14 \text{ mm}$$

DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTESS OPÇÕES COMERCIAIS: 31,50 - 34,90

LOGO ADOTAREMOS O VALOR MAIS CONSERVATIVO: **34,90mm. (eCOMERCIAL)**

COMO O VASO É HORIZONTAL, NA CONDIÇÃO QUE SE DESEJA UTILIZÁ-LO (NÍVEL MÁXIMO 1200 mm), A **PRESSÃO MÁXIMA OCORRERÁ NO FUNDO DO CASCO** (POR ISSO NÃO VERIFICAREMOS O TAMPO) E SERÁ IGUAL A:  $PF = P \text{ TOPO} + \frac{\rho \times h}{10.000}$ ; LOGO:



$$\text{LOGO: PPROJ.} = P \text{ TOPO} + \frac{\rho \times h}{10.000} = 48 + \frac{1000 \times 1,2}{10.000} = 48,12 \text{ KgF/CM}^2$$

$$\text{VERIFICANDO AS UNIDADES: : PPROJ.} = P \text{ TOPO} + \frac{\rho \times h}{10.000}$$

$$\text{PPROJ} = \text{KGF/CM}^2 + \frac{\rho (\text{KGF/M}^3) \times h (\text{M})}{10.000} = \text{KGF/CM}^2$$

$$e\text{REQ} = \frac{(\text{PPROJ}) R}{SE - 0,6 P} + C$$

$$e\text{REQ} = \frac{48,12 \times 750}{970 \times 1 - 0,6(48,12)} = 38,35 \text{ mm}$$

(S OBTIDO ATRAVÉS DA TABELA 10.1, @ 400°C).

$$e\text{PROJ} = e\text{REQ.} + c = 38,35 + 4 = 42,35 \text{ mm}$$

DE ACORDO COM O ITEM 2.4.5.1, DA PÁGINA 28, TEREMOS AS SEGUINTE OPÇÕES COMERCIAIS: 41,30 - 44,40

LOGO ADOTAREMOS O VALOR MAIS CONSERVATIVO: **44,40mm. (eCOMERCIAL).**

**CONCLUÍMOS:** QUE A ESPESSURA EXIGIDA PARA O NOVO SERVIÇO (44,40 mm) É MAIOR DO QUE A ESPESSURA PARA A QUAL O EQUIPAMENTO FOI PROJETADO (41,30 mm), O QUE IMPOSSIBILITA A SUA RE-UTILIZAÇÃO POR QUESTÕES ESTRUTURAIS.

### B) PMTA PARA O NOVO SERVIÇO?

EMBORA PELO ITEM ANTERIOR TENHAMOS VERIFICADO QUE POR QUESTÕES ESTRUTURAIS ESTÁ IMPOSSIBILITADO O USO DO EQUIPAMENTO PARA O NOVO SERVIÇO, CALCULAREMOS A PMTA PARA FINS DIDÁTICOS.

COMO O VASO DE PRESSÃO É NOVO, CALCULAREMOS A PMTA PARA A CONDIÇÃO NOVO E FRIO:

$$\text{PMTA}_{\text{NF}} = \frac{S E e}{R + 0,6 e} = \frac{1308 \times 0,85 \times 44,40}{750 + (0,6 \times 44,40)} = 63,56 \text{ Kgf/CM}^2$$

OBS: **S** = TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA AMBIENTE.

COMPARANDO-SE COM A PF:

$$PMTA_{NF} (63,56 \text{ Kgf/CM}^2) > PF (48,12 \text{ KgF/CM}^2)$$

LOGO A PSV DO VASO SERÁ “SETADA”(CALIBRADA) PARA A SEGUINTE PRESSÃO DE ABERTURA:

$$PSET (PSV) = PMTA - \rho \times h = 63,56 - \frac{(1000 \times 1,2)}{10000} = 63,56 - 0,12 = 63,44 \text{ Kgf/CM}^2$$

### 3.0 R)( EXERCÍCIO SOBRE CÁLCULO DE PRESSÕES DE TESTE HIDROSTÁTICO (TESTE PADRÃO E ALTERNATIVO)).

UMA TORRE DE PROCESSAMENTO APRESENTA AS SEGUINTE CARACTERÍSTICAS:

- DIÂMETRO INTERNO DE 2000 mm;
- CET = 30.000 mm;
- NÍVEL MÁXIMO DE LÍQUIDO = 10.000 mm;
- E = 0,85;
- PESO ESPECÍFICO DO FLUIDO EM OPERAÇÃO = 750 Kgf/M<sup>3</sup>
- ESPESSURA DOS TAMPOS (ELIPSOIDAI) E CASCO = 12,5 mm;
- SOBRESPESSURA = 3 mm;
- S adm DO MATERIAL @ TEMPERATURA AMBIENTE = 1054 Kgf/CM<sup>2</sup>;
- S adm DO MATERIAL @ TEMPERATURA DO PROJETO = 914 Kgf/CM<sup>2</sup>;
- S esc. DO MATERIAL DA TORRE 2250 KgF/CM<sup>2</sup>;

PEDE-SE :

QUAIS PRESSÕES DE TESTE HIDROSTÁTICO PADRÃO E ALTERNATIVO?

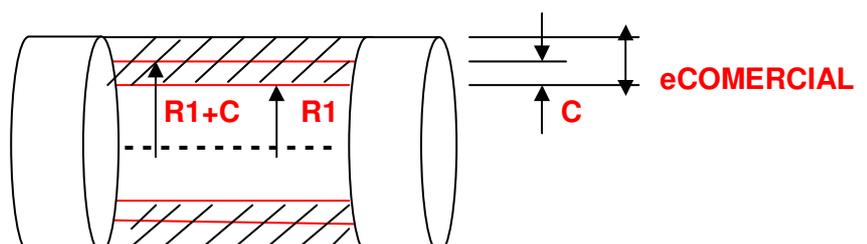
SOLUÇÃO:

CALCULAREMOS ENTÃO, AS PMTA´S NAS CONDIÇÕES **CORROÍDO E QUENTE** e **NOVO E FRIO**

R1 = (NOVO)

R1 +C = (CORROÍDO)

C =(SOBRESPESSURA)





**A) CÁLCULO DAS PMTA'S:**

**CORROÍDO E QUENTE**

**A.1) TAMPOS:**

$$PMTA_{CQ} = \frac{2 \times Sp \times E \times (eCOMERCIAL - C)}{*(D + 2C) + 0,2 \times (eCOMERCIAL - C)}$$

OBS\* = DCORROÍDO = (D + 2C).

$$PMTA_{CQ} = \frac{2 \times 914 \times 0,85 \times (12,5 - 3)}{(2000 + (2 \times 3)) + 0,2 (12,5 - 3)} = 7,35 \text{ Kgf/CM}^2$$

**A.2) CASCO:**

$$PMTA_{CQ} = \frac{S E (eCOMERCIAL - C)}{(R + C) + 0,6(eCOMERCIAL - C)}$$

$$PMTA_{CQ} = \frac{914 \times 0,85 \times (12,5 - 3)}{(1000 + 3) + 0,6 \times (12,5 - 3)} = 7,32 \text{ KgF/CM}^2$$

**NOVO E FRIO**

**A.3) TAMPOS:**

$$PMTA_{NF} = \frac{2 \times Samb \times E \times eCOMERCIAL}{D + 0,2 \times eCOMERCIAL} = \frac{2 \times 1054 \times 0,85 \times 12,5}{200 + 0,2 \times (12,5)} = 11,18 \text{ Kgf/CM}^2$$

**A.4)CASCO:**

$$PMTA_{NF} = \frac{Samb \times E \times eCOMERCIAL}{R + 0,6 \times eCOMERCIAL} = \frac{1054 \times 0,85 \times 12,5}{1000 + 0,6 \times 12,5} = 11,11 \text{ Kgf/CM}^2$$

**QUAL SERÃO AS PMTA'S DO VASO?**

HAVERÁ 02 PMTA'S PARA AS 02 CONDIÇÕES: NOVO E FRIO e CORROÍDO E QUENTE:

E DEVERÃO SER ESCOLHIDAS AS MENORES PMTA'S ENTRE O CASCO E OS TAMPOS, PARA AS DUAS CONDIÇÕES, LOGO:

**PMTA<sub>CQ</sub> = 7,32 Kgf/CM<sup>2</sup> ( A DO CASCO POR SER MENOR).**

**PMTA<sub>NF</sub> = 11,11 Kgf/CM<sup>2</sup> ( A DO CASCO POR SER MENOR).**



**B) CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO PADRÃO:**

PARA FACILITAR O CÁLCULO, MONTAREMOS UMA TABELA COM OS DADOS:

COMPONENTE DO VASO	PMTA <sub>CQ</sub>	$\frac{\partial \times h}{10000}$	PMTA <sub>CQ</sub> - $\frac{\partial \times h}{10000}$	$\frac{Samb}{Sproj}$
TAMPO SUPERIOR	7,35 (Kgf/CM <sup>2</sup> )	750 x 0 = 0	7,35	$\frac{1054}{914} = 1,15$
CASCO	7,32 (Kgf/CM <sup>2</sup> )	$\frac{750 \times 10}{10000} = 0,75$	6,57	$\frac{1054}{914} = 1,15$
TAMPO INFERIOR	7,35 (Kgf/CM <sup>2</sup> )	$\frac{750 \times 10}{10000} = 0,75$	6,57	$\frac{1054}{914} = 1,15$

**TESTE PADRÃO:** SUPÕE QUE O VASO ESTÁ NO FINAL DA VIDA ÚTIL (CONSIDERA O VASO COMO CORROÍDO).

$$P_{TP} = 1,5 (PMTA_{CQ} - \partial \times H) \times Sa/Sq$$

ONDE:

**PMTA<sub>CQ</sub>** - CORROÍDO E QUENTE (MENOR ENTRE O TAMPO E O VASO);

**∂** - PESO ESPECÍFICO DO LÍQUIDO EM OPERAÇÃO;

**H** - ALTURA MÁXIMA DE LÍQUIDO EM OPERAÇÃO;

**Sa** - TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA AMBIENTE;

**Sq** - TENSÃO ADMISSÍVEL NA TEMPERATURA DE PROJETO;

$$P_{TP} = 1,5 \times 6,57 \times 1,15 = 11,33 \text{ Kgf/CM}^2$$

**C) CÁLCULO DA PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO ALTERNATIVO**

PARA FACILITAR O CÁLCULO, MONTAREMOS UMA TABELA COM OS DADOS:

COMPONENTE DO VASO	PMTA <sub>NF</sub>	1,5 PMTA <sub>NF</sub>	$\frac{\partial H_{20} \times h}{10000}$	1,5 x PMTA <sub>NF</sub> - $\frac{\partial H_{20} \times h}{10000}$
TAMPO SUPERIOR	11,18 Kgf/CM <sup>2</sup>	16,77 Kgf/CM <sup>2</sup>	0	16,77 Kgf/CM <sup>2</sup>
CASCO	11,11 Kgf/CM <sup>2</sup>	16,67 Kgf/CM <sup>2</sup>	$\frac{1000 \times 3}{10000} = 3$	13,67 Kgf/CM <sup>2</sup>
TAMPO INFERIOR	11,18 Kgf/CM <sup>2</sup>	16,77 Kgf/CM <sup>2</sup>	$\frac{1000 \times 3}{10000} = 3$	13,77 Kgf/CM <sup>2</sup>



TAMPO SUPERIOR NÃO TEM LÍQUIDO - 0 (ZERO) ,  $H = 0$ .

**PRESSÃO DE TESTE ALTERNATIVO = A MENOR DELAS,  $PMTA = 13,67 \text{ Kgf/CM}^2$ .**

LOGO A SOLUÇÃO PARA O EXERCÍCIO 3.0 R É :

**PRESSÃO DE TESTE PADRÃO =  $11,33 \text{ Kgf/CM}^2$  E PRESSÃO DE TESTE ALTERNATIVO =  $13,67 \text{ Kgf/CM}^2$ .**

PODEMOS UTILIZAR UMA DAS DUAS OU UM VALOR ENTRE AS DUAS, A PETROBRAS COMO EXEMPLO, ADOTA A MAIOR PRESSÃO (CRITÉRIO CONSERVATIVO).



### **3.0 BIBLIOGRAFIA**

**VASOS DE PRESSÃO**

**AUTOR: PEDRO CARLOS SILVA TELLES - 2ª EDIÇÃO ATUALIZADA-2007**

**EDITORA: LTC.**

**APOSTILA: VASOS DE PRESSÃO**

**AUTOR: ENGº ADELINO CARLOS L. DA SILVA**

**UP-PETROBRAS - PROGRAMA DE TREINEES PETROBRAS - ENGº EQUIPAMENTOS.**

**APOSTILA: CURSO DE EQUIPAMENTOS ESTÁTICOS DA ENGENHARIA - VASOS DE PRESSÃO**

**AUTOR: ENGº GUILHERME VICTOR P. DONATO.**

**PETROBRAS/CENPES.**