

Vasos de Pressão e Trocadores de Calor

Alain Patrick Rodrigues
Cleber Alberto Rodrigues
Nori Fujihara

alain.patrick@hotmail.com
rodriguesfatecsp@yahoo.com.br
norifujihara@yahoo.com.br

São Paulo
1º Semestre 2010

Introdução

Vaso de Pressão e Trocadores de Calor (Formatos, Partes Principais, Tipos Principais).

Vasos de pressão

São todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidades que contenham fluidos e sejam projetados para resistir com segurança a pressões internas diferentes da pressão atmosférica, ou submetidos à pressão externa, cumprindo assim a função básica de armazenamento quando se fala em vaso de pressão, podemos considerar desde a mais simples panela de pressão até os mais complexos equipamentos utilizados na indústria.

Trocador de calor ou Permutador de calor

É o dispositivo usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas. Podemos utilizá-los no aquecimento e resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de energia, na recuperação de calor e no processo químico.

Este equipamento normalmente opera em regime permanente, onde as propriedades da seção de um fluido não se altera com o tempo.

Capítulo 1 - Classe e finalidade vasos de pressão

Classificação dos vasos de pressão:

1.1 Vasos não sujeitos a chama.

Vasos de armazenamento e de acumulação: Torres de destilação fracionada, retificação, absorção, etc.; Reatores diversos; Esferas de armazenamento de gases; Trocadores de calor (sendo estes: trocadores propriamente ditos; Aquecedores; Resfriadores; Condensadores; Refervedores; Resfriadores a ar).

1.2 Vasos sujeitos a chama: Caldeiras, Fornos.

Os vasos sujeitos ou não a chama são os vasos onde há ou não presença de fogo, embora os não sujeitos a chama possam, em muitos casos, trabalhar em elevadas temperatura. Destaca-se que vamos tratar apenas dos vasos não sujeitos a chama.

Em todos os vasos de pressão existe sempre um invólucro estanque, externo e contínuo que é denominado “parede de pressão” 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. Além da parede de pressão, os vasos possuem sempre outras partes não submetidas à pressão, como é o caso, por exemplo, do suporte do vaso.

De 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 um grande peso armazenado em um volume relativamente pequeno. A armazenagem de gases em forma gasosa é geralmente antieconômica, devido ao muito pequeno peso específico. Um gás pode ser mantido liquefeito pela pressurização, em temperatura ambiente, e, neste caso, os reservatórios de armazenagem são vasos de pressão, ou podem ser liquefeitos em pressão atmosférica, desde que mantidos em temperatura inferior ao seu ponto de ebulição, neste caso, que é bem mais raro, os reservatórios de armazenagem não são considerados vasos de pressão.

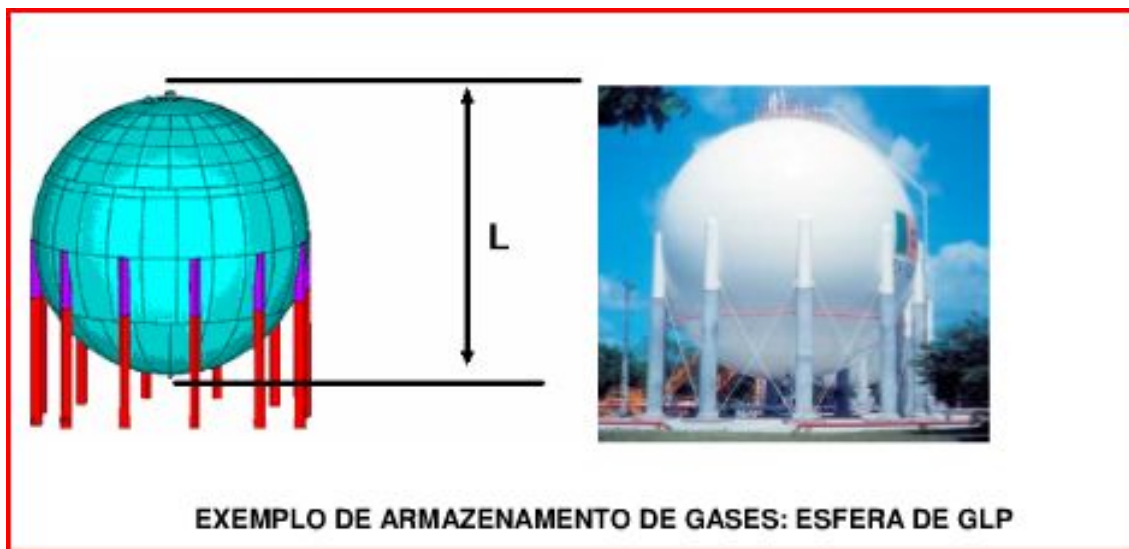


FIGURA 01 – (desenho / modelo retirado da Apostila de Dimensionamento de Equipamentos I – pag. 10, ano de 2008 – Fundação Tecnica Estadual Souza Marques).

Numerosos processos de transformações físicas, bem como muitas reações químicas precisam ser efetuadas em ambiente sob pressão. Para essa 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.

Reatores diversos - craqueamento reforma dessulfurização, alcoilação de produtos de petróleo, diversas reações de catalise, inclusive síntese de numerosos produtos químicos; outras reações efetuadas sob pressão

Vasos separadores – separando óleos de água, gases de líquidos.

Alguns processos são realizados em ambiente de vácuo: os vasos para esses 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 a 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 100 m³ aproximadamente), e esféricos 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.

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 aparelho, quase todos os trocadores de calor têm 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 pressurizada, às vezes com grande diferencial de pressão entre os dois fluidos. São, portanto, também vasos de pressão. Quase todos os trocadores de calor têm casco cilíndrico horizontal.

Dependendo da finalidade e do tipo, esses aparelhos podem receber, entre outras, as denominações de trocadores, refeedores, 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.

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/cm² (aprox. 400 Mpa), e desde próximo de zero absoluto até temperaturas da ordem de 1500°C. Os vasos de pressão podem ter grandes dimensões e peso, havendo alguns com mais de 60 metros de comprimento, e outros com mais de 200 toneladas de peso.

Da mesma forma, é enorme a quantidade de fluidos que podem estar contido nos vasos, incluindo-se praticamente todos os que sejam de uso industrial: líquidos, gases, mistura de líquidos e gases, líquidos ou gases com sólidos em suspensão.

Capítulo 02 - Formato e posição vasos de pressão

A parede de pressão de um vaso compõe se basicamente do casco do vaso e dos tampos de fechamento.

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: cilíndricas, cônica e esférica, ou combinais dessas formas; são comuns, por exemplo, vasos com vários cascos cilíndricos e cônicos. É comum também o formato toroidal, principalmente para secções de concordância. A FIGURA 02 mostra alguns exemplos de vasos de diversos formatos.

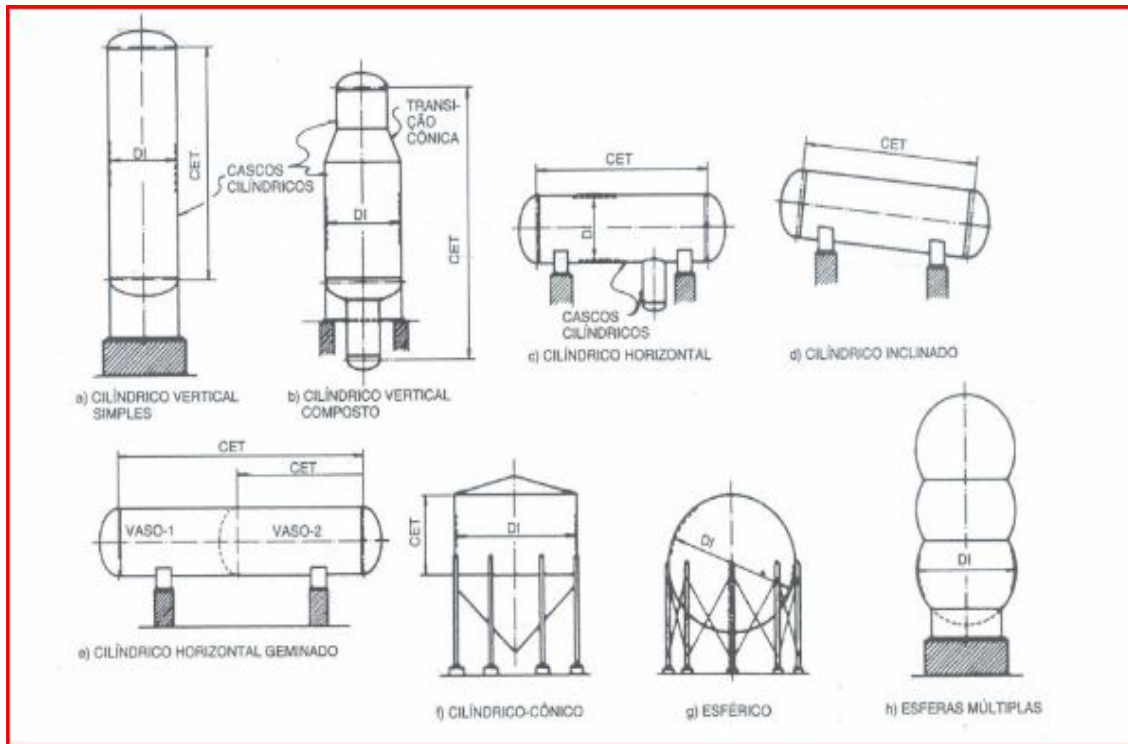


FIGURA 02 – Principais Formatos de Vasos de Pressão (desenho / modelos retirados da Apostila de Dimensionamento de Equipamntos I – pag. 13, ano de 2008 – Fundação Tecnica Estadual Souza Marques). CET = Comprimento entre Tangentes (é comprimento total do corpo cilíndrico).

Quanto à posição de instalação, os vasos de pressão podem ser verticais, horizontais ou inclinados, como mostra a FIGURA 02.

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 de fluidos. Tais são, por exemplo, as torres de fracionamento, de retificação, e de absorção, bem como muitos reatores de catalise. 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 preferido 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 o escoamento por gravidade de materiais difíceis de escoar.

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 fabricar e transportar presta-se bem a 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, como os exemplos (a), (c), (d) e (e), da FIGURA 02.

Quando, entretanto, houver grande diferença 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 figura 02 (b) mostra um exemplo de casco em cilindro composto.

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. 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 esses motivos, os vasos esféricos só são econômicos para grandes dimensões, sendo empregados, nesses casos, para a armazenagem de gases sob pressão.

O formato cônico é empregado para secção de transição entre dois corpos cilíndricos de diâmetros diferentes, como mostra a figura 02 (b).

Embora bem mais raros, são também usados os formatos de esferas múltiplas e de ovóide. 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, como mostrado na figura 02 (e). 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” e o “comprimento entre tangentes”. O diâmetro interno (D) 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 (CET), 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 tangencia”, que limitam o comprimento entre tangentes, são as linhas traçadas, próximo a ambos os extremos do vaso, na tangencia entre os corpos cilíndricos e os tampos de fechamento. Nos vasos em posição vertical, é regra usual tomar-se a linha de tangencia inferior, como plano de referencia para todas as cotas verticais.

Capítulo 03 - Tampos dos vasos de pressão

Denominam-se tampos as peças de fechamento dos cascos cilíndricos dos vasos de pressão. Os tampos podem ter vários formatos, dos quais os mais usuais são os seguintes: elíptico, torisférico, hemisférico, cônico e plano.

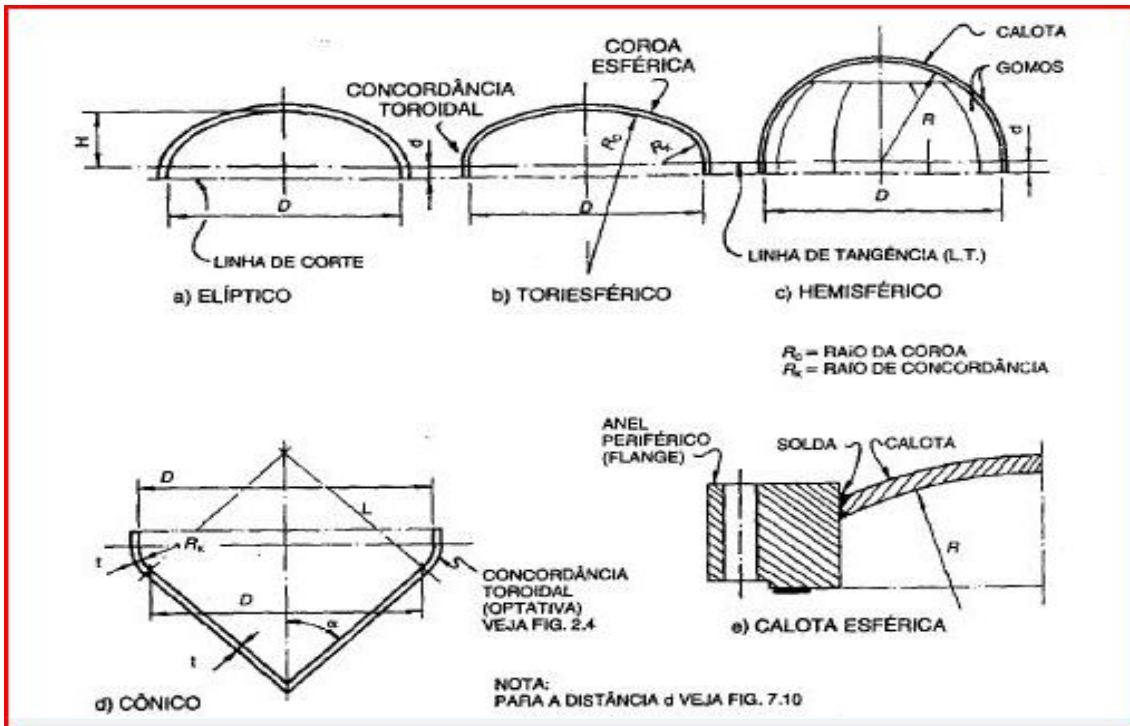


FIGURA 03 - Principais Tipos de Tampos (desenho / modelos baseados nas figuras 1.4 e 1,6 do código ASME, Secção VIII, Divisão 1).

O tampo elíptico tem teoricamente as seções transversais como uma elipse geométrica perfeita. No tampo elíptico denominado "normal", a relação de semi-eixo 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 usado no casco cilíndrico do vaso, porque a sua resistência à pressão interna é praticamente igual à do cilindro de mesmo diâmetro.

Os tampos torisférico são constituídos por uma calota central esférica (crown), de raio R_c , e por uma seção toroidal de concordância (knuckle), de raio R_k .

O tampo torisférico é bem mais fácil de fabricar do que o elíptico, e essa facilidade são tanto maior quanto menos profundo for, isto é, quanto menor for o

raio R_k . Inversamente, sua resistência será tanto maior for R_k , permitindo chapas de menor espessura. Qualquer tampo toriesférico é sempre mais fraco do que um elíptico de mesmo diâmetro e com mesma relação de semi-eixos.

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 vasos horizontais em geral, vasos verticais de diâmetro muito grande (10m, 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 tampos são construídos de diversas partes soldadas entre si, incluindo uma calota central e vários gomos em setores esféricos.

Empregam-se também tampos com formato de uma calota esférica, fabricados de chapas prensada, como mostrado. Esses tampos têm geralmente a calota soldada a um flange aparafusado, sendo assim facilmente removíveis; é o tipo tradicionalmente usado para as tampas de espelhos flutuantes de trocadores de calor. 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.

Os tampos planos existem uma grande variedade de tampos planos O tipo de flange cego aparafusado removível é o mais comum.

Capítulo 04 - Transição de formato e espessura

Qualquer transição de formato ou de espessura na parede de pressão de um vaso 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.

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 dos 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, certa distância entre a linha de tangência e a linha de corte (ou solda).

Para os tampos cônicos e as transições tronco-cônicas entre dois corpos cilíndricos, tem-se uma severa transição de formato na ligação com os cilindros, que será tanto mais forte quanto maior for o ângulo do vértice do cone.

Capítulo 5 - Espessuras de cascos e de tampos

A espessura da parede de pressão de um vaso deve ser no mínimo, o maior dos dois seguintes 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 sobre-espessura 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 adotar 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 sobresspesura 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 seguintes 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

Estabelecer 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 seguintes espessuras mínimas para as partes do vaso sujeitas à 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 seguintes espessuras mínimas para as partes do vaso sujeitas à 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

5.1 Espessuras nominais (comerciais)

Devem ser adotadas de preferência, como espessuras nominais (comerciais)

Os seguintes 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)

Capítulo 6- Construção dos trocadores de calor convencionais.



Figura 04, retirada da apostila, Dimensionamento de equipamentos, Volume I Fundação Técnico Educacional Souza Marques.

Nos trocadores de calor convencionais, temos dois fluidos circulando por dois circuitos independentes: fluido quente e o fluido frio. Um desses fluidos passa por dentro dos tubos de feixe tubular: é o denominado “fluxo pelos tubos”, o outro fluido passa por fora do feixe tubular e denomina-se “fluxo pelo casco”. Esses dois circuitos são usualmente designados como “lados dos tubos” (tube-side) e “lado do casco” (Shell side) respectivamente. Cada um desses dois circuitos pode ser feitos em uma só passagem ou em várias passagens sucessivas.

O trocador de calor convencional tem três partes principais, cada u, a composta de varias peças, como mostra a Fig. 05:

- Corpo (Shell).
- Carretel (channel).
- Feixe tubular (bundle).

O corpo é o casco do aparelho, por onde circula o fluido externo; o carretel é uma câmara presa ao casco, onde se abrem as extremidades dos tubos do feixe tubular, e que serve para a distribuição do fluido que circula nos tubos.

O feixe tubular é o conjunto formado pelos tubos de troca de calor e pelos espelhos (ou espelho), que são placas planas espessas, com perfurações onde se encaixam e se prendem as extremidades dos tubos. Tanto o corpo, como o carretel e o feixe tubular podem ter varias disposições, como veremos a seguir.

Para permitir a manutenção e limpeza interna do aparelho, tem-se quase sempre o feixe tubular removível, e tampas também removíveis no carretel e no corpo, para acesso ao interior do aparelho, como também mostra a Fig. 05.

Em todos os trocadores existe sempre uma diferença de temperatura entre o corpo e o feixe tubular, em conseqüências da diferença de temperatura entre os dois fluidos circulantes. Teremos, portanto, uma dilatação diferencial entre essas duas partes. Existem varias formas de controlar essa dilatação diferencial, sendo mais freqüentes as seguintes:

- Feixe tubular com espelho flutuante (floating head bundle).
- Feixe tubular em U (U tube bundle).
- Junta de expansão no casco e espelhos fixos.

A Fig. 05 (a) mostra um exemplo de trocador de calor de feixe tubular com espelho flutuante. O feixe tubular tem um espelho fixo (peça 11), preso entre os flanges do carretel e do corpo (peças 2 e 7). O outro espelho (peça 16), juntamente com a tampa flutuante (peça 18), pode movimentar-se livremente dentro do casco, em conseqüência da dilatação. Para a limpeza interna o feixe tubular basta remover as tampas 8, 18 e 19, sem ser necessário desconectar as tubulações que estão ligadas aos bocais do carretel (9). Como os tubos do feixe tubular são retos, é fácil a sua limpeza mecânica interna. O feixe tubular completo, com ambos os espelhos, pode ser removido para manutenção, devendo-se para isso primeiro retirar o carretel completo.

A Fig.05(b) é um exemplo de um trocador com feixe tubular em U. O feixe tubular tem um único espelho, fixo e é removível, juntamente com espelho, pelo lado do

carretel. Devido ao formato curvado dos tubos a dilatação é livre, mas a limpeza interna dos tubos é difícil, sendo impossível a sua limpeza mecânica.

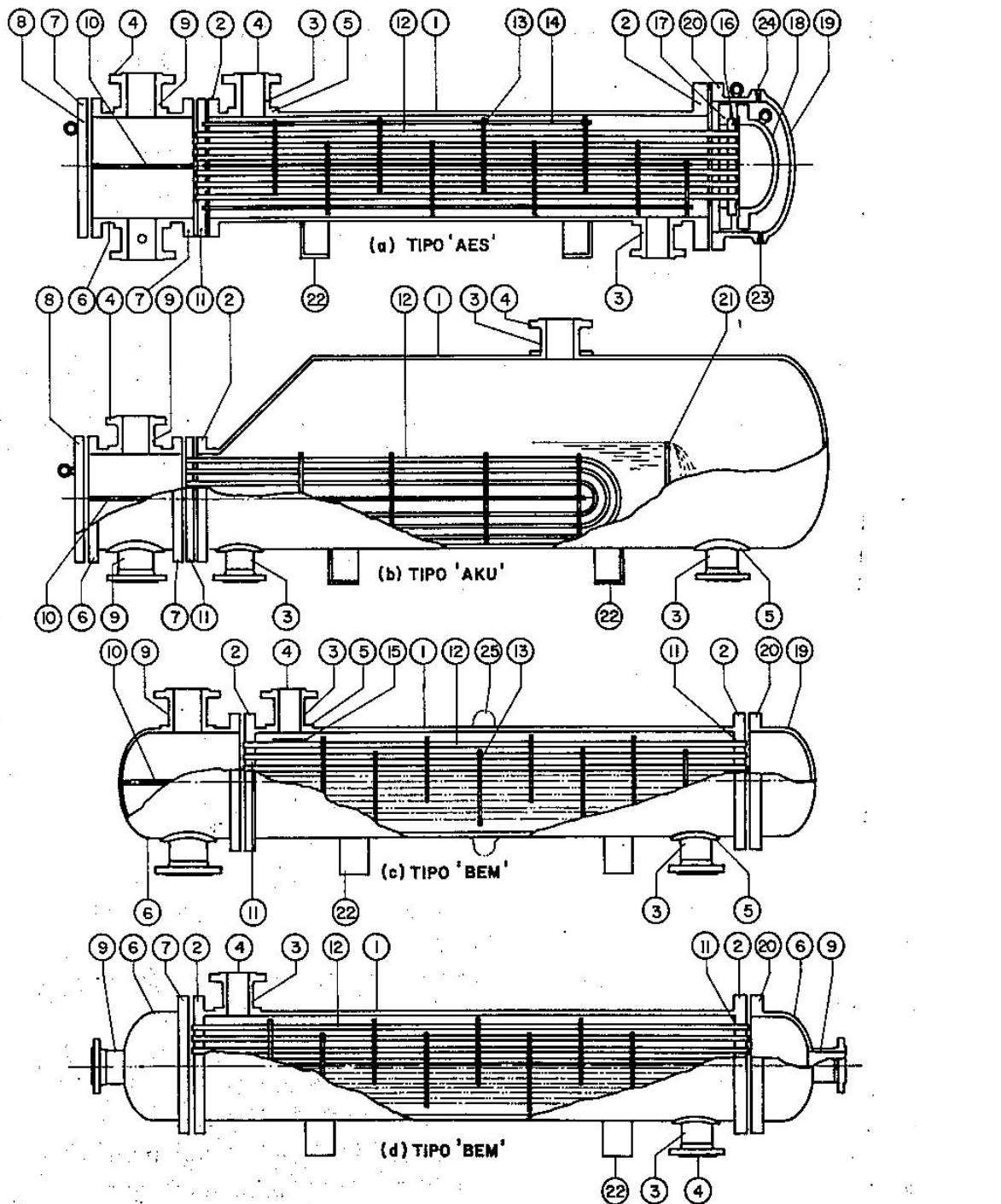
Os trocadores com junta de expansão no casco (como está em tracejado na Fig. 05(c) têm ambos os espelhos fixos, e devido à existência da junta de expansão o casco pode acompanhar os mesmos movimentos de dilatação do feixe tubular, e vice-versa.

Para pequenos diferenciais de temperatura entre os dois fluidos (até 50°C, no Maximo), e sendo o casco e os tubos do mesmo material, podem ser adotados trocadores com tubos retos e ambos os espelhos fixos e, portanto, sem nenhuma compensação para a dilatação diferencial (Fig.05 (d), ficando nesse caso uma das partes do aparelho (casco ou feixe tubular) submetida à tração, e a outra submetida à compressão.

Os trocadores das Fig. 05 (a) e (b) têm obrigatoriamente a entrada e saída do feixe tubular na mesma extremidade, o que obriga a pelo menos uma inversão não poder ser permitida (devido principalmente à limitação de perda de carga), podem ser adotados o tipo mostrado na Fig. 05(d), ou os mostrados na Fig.06 Todos esses aparelhos têm as entradas e saídas do fluido que passa pelos tubos em posição axial, e cada situada em uma das extremidades do trocador.

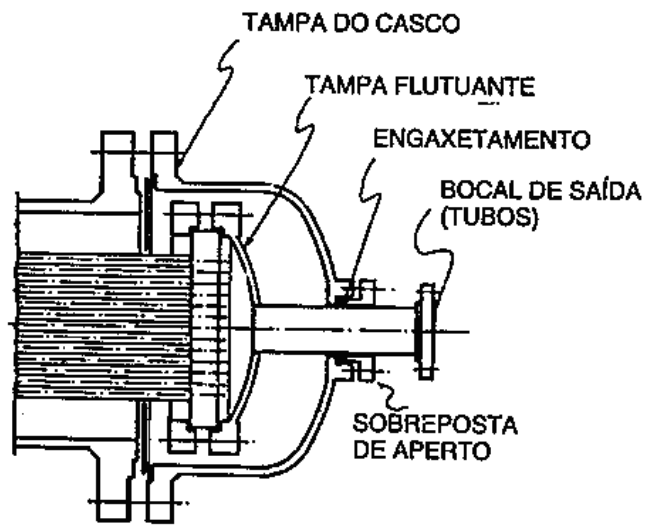
O tipo mostrado na Fig. 05 (d) tem ambos os espelhos fixo, e os mostrados na Fig. 06 têm espelho flutuante: No modelo da Fig. 06 (a) a compensação de dilatações é conseguida pela livre movimentação do pescoço do bocal em um engaxetamento convencional, e no modelo da Fig. 06 (b) essa compensação é conseguida por meio de uma junta de expansão de fole, interna no aparelho.

Nota-se que nos trocadores da Fig. 05 (a), (b) e (c) tem-se obrigatoriamente em numero par – geralmente dois de passagens do fluido pelos tubos.

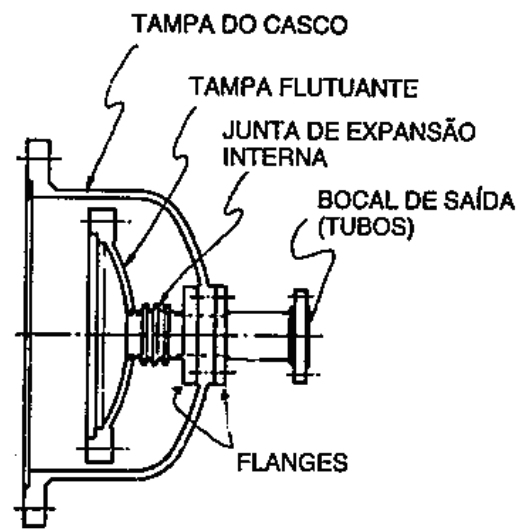


- | | |
|---|---|
| 1 — Cásco (shell) | 14 — Tirantes (tie rods) |
| 2 — Flanges do casco (shell flanges) | 15 — Quebra-jato (impingent plate) |
| 3 — Bocais do casco (shell nozzles) | 16 — Espelho flutuante (floating tube-sheet) |
| 4 — Flanges dos bocais (nozzles flanges) | 17 — Anel bipartido (backing split-ring) |
| 5 — Reforços dos bocais (nozzles reinforcing pads) | 18 — Tampa flutuante (floating cover) |
| 6 — Carretel (channel) | 19 — Tampa do casco (shell cover) |
| 7 — Flanges do carretel (channel flanges) | 20 — Flange da tampa do casco (shell cover flange) |
| 8 — Tampa do carretel (channel cover) | 21 — Vertedouro (weir) |
| 9 — Bocais do carretel (channel nozzles) | 22 — Berços (saddles) |
| 10 — Chicana do carretel (channel baffle) | 23 — Dreno (drain) |
| 11 — Espelho fixo (fixed tube-sheet) | 24 — Respiro (vent) |
| 12 — Tubos (tubes) | 25 — Junta de expansão no casco (shell expansion joint) |
| 13 — Chicanas do feixe tubular (transverse baffles) | |

Figura 05 (a), (b) (c) e (d), retirado da apostila, Dimensionamento de equipamentos, Volume I, pag.27, Fundação Técnico Educacional Souza Marques.



a) COM ENGAXETAMENTO



b) COM JUNTA DE EXPANSÃO INTERNA

Figura 06, Trocadores de calor de uma só passagem pelos tubos (desenho / modelos retirados da Apostila de Dimensionamento de Equipamentos I – pag. 27, ano de 2008 – Fundação Tecnica Estadual Souza Marques).

Capítulo 7- Outros tipos de trocadores de calor

Além dos tipos convencionais de trocadores de calor existem ainda outros tipos, entre os quais se podem citar como mais freqüentes:

- Trocador tipo bitular (Double-pipe).
- Resfriadores a ar (air coolers).

O trocador tipo bi tubular (Fig.07) equivale a um conjunto de trocadores convencionais, em que cada casco está acoplado dois a dois por meio de cabeçotes com curvas de retorno. Os tubos internos costumam ser aletados, com aletas longitudinais ou helicoidais, para aumentar a eficiência térmica. O conjunto pode ter o número que for necessário de grupos de dois cascos, acoplados em série, em paralelo, ou em outros arranjos.

A Fig. 08 é um exemplo típico de um resfriador a ar. Esse aparelho não tem casco, sendo o vaso de pressão construído apenas pelo feixe tubular, onde circula o fluido pressurizado que está sendo resfriado por uma corrente de ar externa. Como acessório externa (não projetados como vasos de pressão) temos a caixa para dirigir o fluxo de ar (câmara plena), venezianas de controle da vazão de ar externa. Como acessório externo (não projetados como os vasos de pressão), temos a caixa para dirigir o fluxo de ar (câmara plena), venezianas de controle de vazão de ar, ventiladores com motor elétrico, dispositivos de redução de velocidade ou de transmissão, e as estruturas para suporte do conjunto. O feixe tubular compõe-se de tubos retos cujas extremidades estão fixadas a coletores (cabeçotes), onde existem os bocais de entrada e saída do fluido circulante. Os cabeçotes costumam ter seção transversal retangular ou circular. Na maioria das vezes o feixe tubular é dividido em seções, podendo cada aparelho ter várias seções de feixe tubular. É boa prática prever os dois ventiladores para cada aparelho, para garantir a continuidade da operação no caso de paralisação de um dos ventiladores os tubos são quase sempre aletados, com várias disposições de aletas.

A tiragem do ar pode ser forçada ou induzida, isto é, o feixe tubular pode estar no lado de descarga ou no lado de sucção dos ventiladores. Com a tiragem forçada os ventiladores ficam por baixo do feixe tubular, e com tiragem induzida por cima. A tiragem forçada é o sistema adotado na grande maioria dos casos, tendo as vantagens de maior facilidade de acesso e manutenção do feixe tubular, maior facilidade de montagem e manutenção do equipamento eletromecânico e maior e melhor possibilidade de pré-montagem do conjunto na fabrica. Em compensação a tiragem induzida permite melhor distribuição do ar sobre os tubos e é menos sujeita a uma possível recirculação do ar quente.

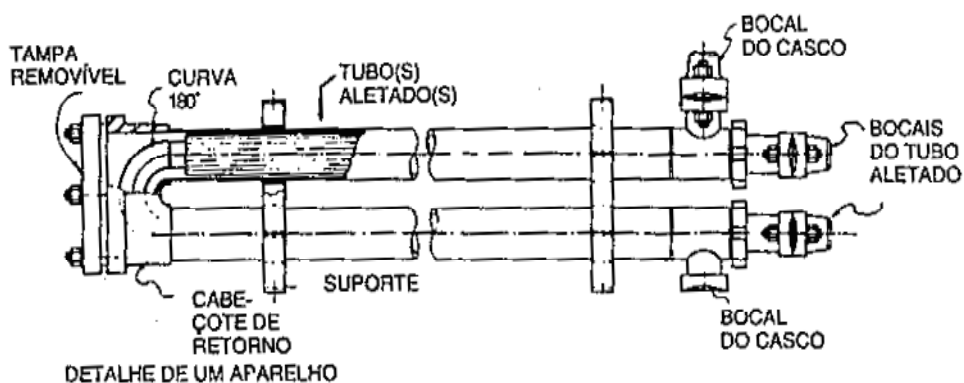
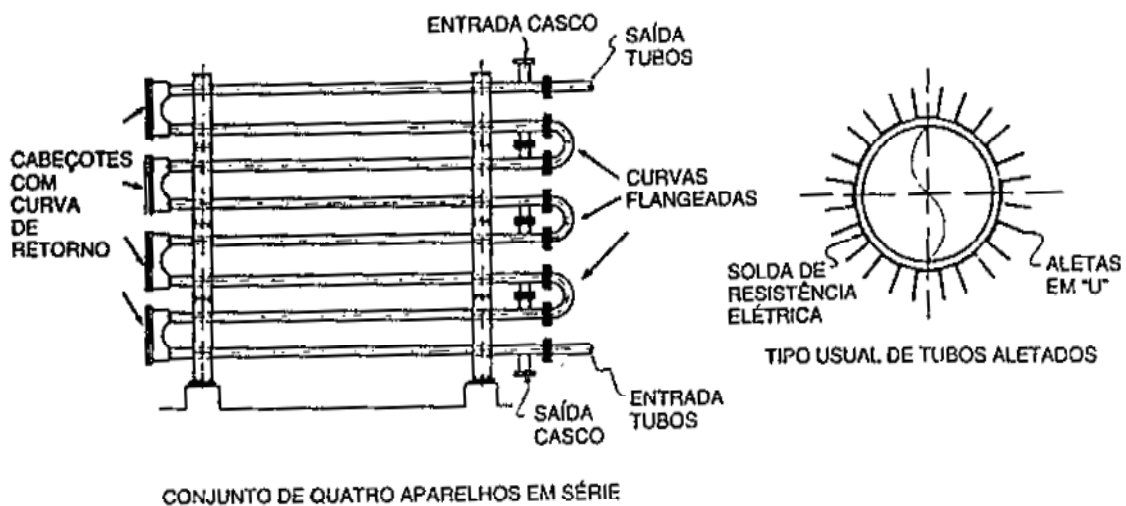


Fig. 07 Trocador de calor bitubular.

Figura 07 retirado da apostila, Dimensionamento de equipamentos, Volume I, Fundação Técnico Educacional Souza Marques.

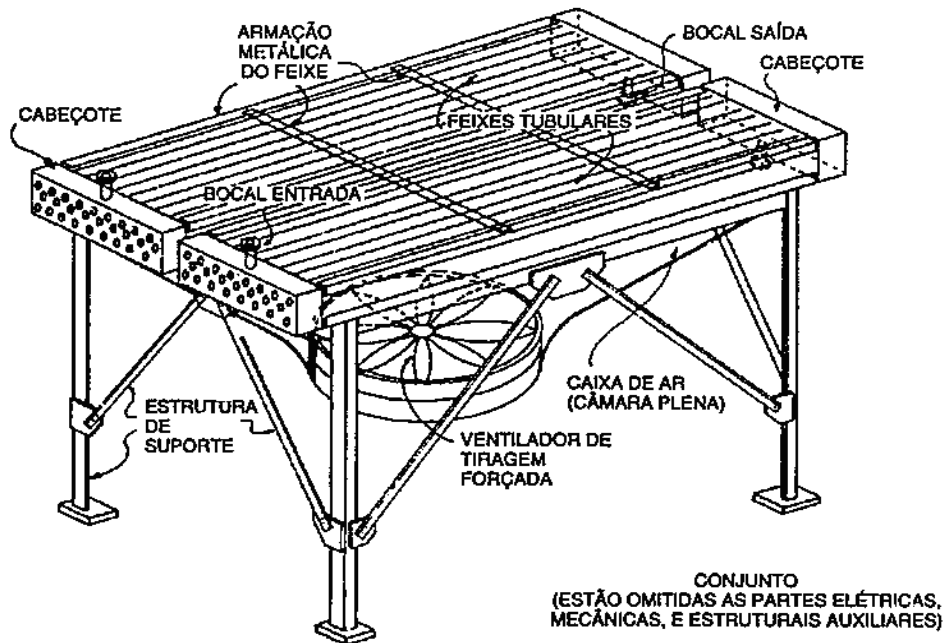
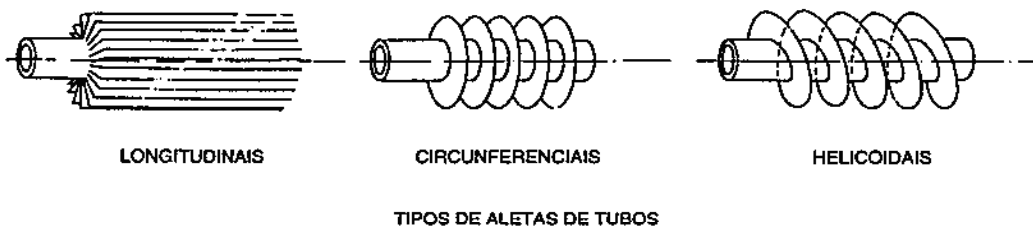
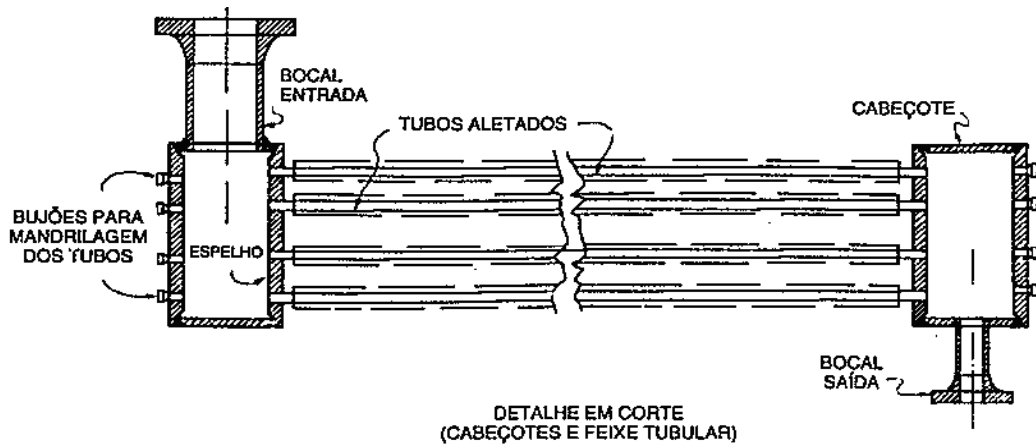


Figura 08 Retirada do livro, Vasos de Pressão, Pedro Carlos da Silva Teles, pag.24

Capítulo 8 - Trocadores de calor padronizados pelo TEMA

A associação americana de fabricantes de trocadores (Tubular Exchangers Manufactures Association – TEMA) fez uma padronização de tipos de trocadores convencionais abrangendo a maioria dos modelos usualmente empregados em indústrias de processo. Nessa padronização cada tipo é designado por uma sigla de três letras, das quais a primeira indica o tipo de carretel, a segunda o tipo de casco e a terceira o tipo da extremidade oposta ao carretel, como mostra a figura 05.

Os exemplos (a), (b) e (c) citados na figura 05 seriam designados, pela nomenclatura da TEMA, respectivamente, pelas siglas AES, AKU e BEM.

Os tipos de carretel são indicados pelas letras A, B, C, N e D. O tipo A é o mais comum, tendo o carretel e a tampa removíveis; no tipo B o carretel é integral com a tampa. O tipo C tem o carretel integral com o espelho fixo, sendo a tampa removível e o feixe tubular também removível junto com o carretel. O tipo N é semelhante ao C, sendo que o feixe tubular não é removível; o tipo D é especial para trocadores de alta pressão.

As letras E, F, G, H, J, K e X designam os tipos de cascos. O tipo E é o casco mais freqüente, com uma entrada e uma saída em extremidade opostas. O tipo K é um casco especial com um corpo cilíndrico de maior diâmetro e uma transição cônica, denominado “refervedor” (kettle); é empregado quando o fluido pelo casco tem duas fases presentes (líquido e gás), e deseja-se a separação dessas duas fases. Os F, G, H, J e X são várias combinações de entradas e saídas no casco, como mostra a figura.

As letras L, M, N, P, S, T, U e W designam o tipo de extremidade oposta ao carretel. Os tipos L, M e N são semelhantes às extremidades A, B e C, e em todos eles os trocadores têm ambos os espelhos fixos. Os tipos P e W têm o extremo flutuante com gaxeta externa são sistemas pouco usados.

Os tipos S e T têm espelho flutuante interno, sendo que em ambos o feixe tubular completo pode ser removido, através do casco pela extremidade onde está o

carretel. No tipo S, para a remoção do feixe tubular tira-se a tampa do casco e depois a tampa flutuante e o anel bipartido, saindo então o feixe por dentro do casco.

No tipo T a remoção é mais simples, porque o feixe é capaz de passar inteiro através do casco, mesmo com a tampa flutuante aparafusada ao espelho flutuante, porque o casco tem um diâmetro interno maior do que o do tipo S. O tipo U finalmente tem o feixe tubular em U, com um único espelho.

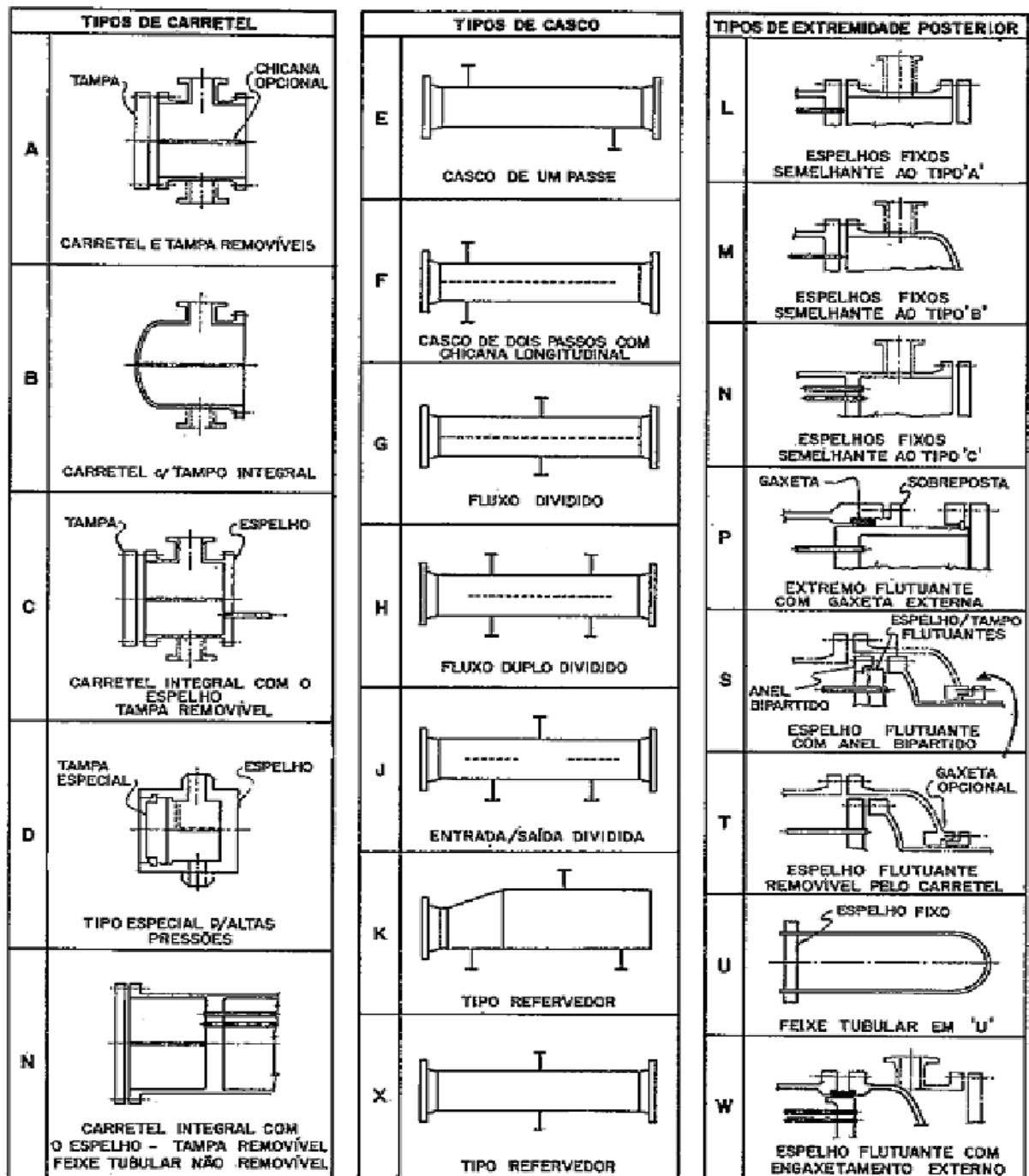


Figura 09 - Trocadores de calor padronizados pela norma tema (figura N-1.2 – 09º edição – 2007).

Capítulo 09 - Exigências da norma TEMA para trocadores de calor.

A norma da TEMA para trocadores de calor tipo casco e tubos faz uma serie de exigências dimensionais e de detalhes para as partes internas dos trocadores. As exigências descritas a seguir referem-se à Seção R dessa norma, que é usualmente a mais empregada. As outras seções (C e B) fazem exigências semelhantes, embora em alguns casos sejam menos rigorosos.

As tabelas 1 a 5 mostram as espessuras mínimas e os espaçamentos máximos das chicanas transversais do feixe tubular, as folgas máximas entre essas chicanas e o casco, bem como a quantidade e diâmetro mínimo dos tirantes, e a espessura mínima das chicanas do carretel.

Diâmetro interno do casco (mm)	Espessura das chicanas ou chapas de suporte (mm)				
	Vão de tubos entre pontos de suporte (chicanas ou chapas de suporte)				
	Até 610	610 a 914	914 a 1219	1219 a 1524	Acima de 1524
152 a 356	3,2	4,8	6,4	9,5	9,5
381 a 711	4,8	6,4	9,5	9,5	12,7
737 a 965	6,4	7,5	9,5	12,7	15,9
991 a 1524	6,4	9,5	12,7	15,9	15,9
1549 a 2540	9,5	12,7	15,9	19,1	19,1

TABELA (1) Espessuras mínimas das chicanas transversais e chapas suporte (TABELA RCB-4.1, TEMA, seção 05, pagina 5.4-3 - 09º EDIÇÃO – 2007).

O espaçamento mínimo das chicanas transversais do feixe tubular é de 1/5 do diâmetro interno do casco, ou 50 mm, ou o que for maior. Para as chicanas longitudinais do feixe tubular (quando empregadas), há a exigência de espessura mínima de 6 mm. Limita-se o espaçamento maximo entre as chicanas transversais pelo fato de servirem como suportes para os tubos; a exigência do espaçamento mínimo decorre da necessidade de evitar velocidades muito altas de escoamento.

Diâmetro externo dos tubos (pol.)	Vão Máximo entre suportes (mm)		
	Materiais e temperaturas limites (c°)		
	Aço carbono e aços inoxidáveis 400 Aço de baixa liga 455 Cobre-níquel 315 Níquel 455	Alumínio e ligas Cobre e ligas Titânio e ligas Zircônio	Temperaturas máximas do código ASME, seção VIII
1/4	660	559	
3/8	889	762	
1/2	1118	965	
5/8	1321	1143	
3/4	1524	1321	
7/8	1753	1524	
1	1880	1626	
1 ¼	2235	1930	
1 ½	2540	2210	
2	3175	2794	

TABELA (2) Vão máximo entre suportes do feixe tubular (TABELA RCB-4.52, TEMA, seção 05, página 5.4-5 - 09ª EDIÇÃO – 2007).

As folgas radiais máximas permitidas entre as chicanas e o casco destinam-se a diminuir a passagem do fluido em redor das chicanas.

O espaçamento mínimo entre centros de tubos vizinhos do feixe tubular deve ser de 1 ½ vez o diâmetro externo dos tubos, sendo que nos arranjos em quadrado ou quincôncio é exigida uma distância livre mínima de 6 mm entre os tubos.

Para a mandrilagem dos tubos nos espelhos deve haver, pelo menos, dois rasgos nos espelhos, com aproximadamente 3 mm de largura e 0,4 mm de profundidade.

Diâmetro interno do casco (mm)	Folga radial máxima entre o casco e as chicanas transversais (mm)
152 a 432	3,2
457 a 991	4,8
1016 a 1372	6,4
1397 a 1753	7,9
1778 a 2134	9,5
2159 a 2540	11,1

TABELA (3) Folgas radiais máximas entre chicanas transversais e o casco (TABELA RCB-4.3, TEMA, seção 05, página 5.4-2 - 09ª EDIÇÃO – 2007).

A projeção da extremidade de tubos no espelho não pode ser superior a $\frac{1}{2}$ do diâmetro do tubo.

Nos espelhos cladeados as espessuras mínimas do revestimento são de 7,9 mm para tubos mandrilhados e de 03 mm para tubos soldados.

Os rebaixos para encaixe das chicanas do carretel no espelho e na tampa do carretel devem ter uma profundidade de 4,5 mm.

A tampa flutuante deve ter uma altura tal de forma que a seção de escoamento entre os passes seja pelo menos 1,3 vezes a seção total de escoamento dos tubos em cada passe. A mesma exigência dimensional é feita para o comprimento do carretel, quando há retorno de fluxo no mesmo. Os parafusos (ou estojos) da tampa flutuante devem ser de material seguramente resistente a corrosão pelo fluido que passa no casco, adotando-se como qualidade mínima do material os aços inoxidáveis 12% CR.

Diâmetro interno do casco (mm)	Diâmetro dos tirantes (pol.)	Quantidade mínima de tirantes
152 a 381	3/8	4
406 a 686	3/8	6
711 a 838	1/2	6
864 a 1219	1/2	8
1245 a 1524	1/2	10
1549 a 2540	5/8	12

TABELA (4) Diâmetro e quantidade mínima de tirantes do feixe tubular (TABELA R-4.71, TEMA, seção 05, pagina 5.4-7 - 09º EDIÇÃO – 2007).

Os bocais do casco não devem ter nenhuma projeção interna; os do carretel poderão ter quando for necessário. Exigem-se em geral quebra-jatos nos bocais de entrada do casco, para evitar o impacto da corrente fluida sobre os tubos do feixe tubular.

As luvas devem ser no mínimo de classe de pressão 6000 libras, de acordo com a norma ANSI B-16.11. Nos pescoços dos bocais flangeados de diâmetro nominal de 2", ou maior, deve haver uma luva de $\frac{3}{4}$ ", para instalação de instrumentos.

As juntas da tampa flutuante – para todos os trocadores de calor -, bem como as juntas da tampa do carretel e as juntas entre o espelho fixo e o casco e o carretel, para trocadores em serviço com hidrocarbonetos e para pressões acima de 20 Kg/cm², devem ser metálicas ou semimetálicas, isto é, espiraladas ou com capa metálica e recheio de amianto. Para os aparelhos da classe R, todas essas juntas devem ser confinadas, ou seja, mantidas dentro de um rasgo ou um rebaixo em uma das duas peças entre as quais esta a junta.

Diâmetro interno do casco (mm)	Material	
	Aço carbono	Aço-liga e inoxidáveis
Até 610	9,5 mm	6,4 mm
610 a 1524	12,7 mm	9,5 mm
1524 a 2540	15,9 mm	12,7 mm

TABELA (5) Espessuras mínimas das chicanas do carretel (TABELA RCB-9.131, TEMA, seção 05, página 5.9-1 - 09ª EDIÇÃO – 2007).

Capítulo 10 - Seleção do tipo de trocador de calor

Para trocadores de calor com duas correntes fluidas, o primeiro passo na seleção do tipo de aparelho é a decisão de qual das correntes deve passar por dentro e qual deve passar por fora dos tubos. Quando não existem motivos especiais de serviço que obriguem a uma determinada disposição de fluxos, a escolha que irá circular por dentro do feixe tubular de um trocador deverá se basear nas razões descritas a seguir. Quando forem conflitantes, a precedência deve ser na ordem indicada:

- 1- Fluido mais corrosivo, ou que exija materiais mais caros, ou que exija algum revestimento interno anticorrosivo.
- 2- Água.
- 3- Fluido de menor viscosidade, ou para o qual seja permitida maior perda de carga ao passar pelo trocador.
- 4- Fluido de maior pressão e/ou maior temperatura média.
- 5- Fluido que deixe maior quantidade de sedimentos ou depósitos (exceto para feixe tubular em U).
- 6- Fluido com maior vazão.

A razão de se preferir colocar o fluido mais corrosivo por dentro dos tubos é óbvia, porque esse fluido fica em contato com o carretel, e não com o casco, é mais econômico no caso de uso de materiais caros para combater a corrosão. Além disso, é muito mais difícil – ou até impossível- colocar-se revestimentos internos anti-corrosivos no casco dos trocadores.

Enquanto, no carretel, na tampa flutuante e no lado externo dos espelhos a colocação desses revestimentos é bastante fácil e usual.

Quando à perda de carga, a passagem por dentro dos tubos resulta sempre em maior perda de carga do que a passagem pelo casco, em igualdade de vazão. Prefere-se colocar o fluido de maior pressão por dentro dos tubos também por razões óbvias: tem-se os tubos submetidos à pressão interna - e não à pressão externa, que poderia provocar o colapso-, e tem-se maior espessura no casco. A preferência em fazer passar por dentro dos tubos o fluido que deixa mais

sedimentos deve-se ao fato de que a maior velocidade de circulação (pelos tubos) tende a reduzir a quantidade de depósitos.

Quaisquer vapores que estiverem condensando devem normalmente passar pelo casco dos trocadores, exceto vapor d água, que deve passar pelos tubos.

Damos a seguir, para os principais tipos de trocadores, as suas características, limitações e casos de emprego, para orientar a sua seleção.

10.1.1 Trocador com espelho flutuante - construção cara e tradicional para serviços severos; permite qualquer diferencial de temperatura entre os fluidos; feixe tubular desmontável para inspeção e manutenção, podendo com facilidade ser feita substituição de qualquer tubo quando necessário; permite fácil limpeza mecânica interna dos tubos (tubos retos), e assim ambos os fluidos podem ser viscosos, sujos, ou que deixem depósitos. Não é adequado para grandes pressões do lado dos tubos devido à disposição construtiva do espelho flutuante.

10.1.2 Trocador com feixe tubular em U – permite qualquer diferencial de temperaturas e também qualquer pressão nos tubos. Exige fluido limpo pelos tubos (coeficiente de depósito inferior a $0,0004h.m^2 \text{ } ^\circ6/Kcal$) porque a limpeza interna mecânica dos tubos é difícil e não recomendada. Note-se que, embora o feixe tubular seja desmontável, nesse tipo de trocador só é possível a substituição dos tubos externos do feixe. Em média é 15 a 20% mais barato do que o trocador com espelho flutuante, em igualdade de demais condições; usado fluidos limpos, principalmente quando a pressão do lado dos tubos for muito alta.

10.1.3 Trocador com junta de expansão no casco e ambos os espelhos fixos - construção econômica permitindo qualquer diferencial de temperatura; feixe tubular não desmontável para inspeção e manutenção; a substituição dos tubos, embora possível, é difícil; permite fácil limpeza mecânica interna dos tubos. Só pode ser empregado para serviços não essenciais ou de baixa responsabilidade, e com fluido pelo casco não perigoso, porque a junta de expansão é sempre um ponto fraco, podendo estar sujeita a ruptura súbita.

É, em média, 25 a 30% mais barato do que o trocador de espelho flutuante, em igualdade de demais condições.

10.1.4 Trocador de uma só passagem pelos tubos - tipo empregado excepcionalmente quando há severa limitação da perda de carga no fluxo pelos tubos. A perda de carga é bem menor, não só porque não há inversão no sentido de circulação, como também porque a velocidade é mais baixa para igualdade de superfície de aquecimento (numero de tubos). O tipo da **Fig.6 A** tem o grave defeito do engaxetamento, que é um ponto fraco e uma permanente causa de vazamentos, não sendo recomendado para serviços de responsabilidade, ou quando o fluido pelo casco é perigoso. O tipo da **Fig.6 B** não apresenta esse inconveniente, mas é de construção muito cara.

10.1.5 Trocador com ambos os espelhos fixos (sem junta de expansão) – não há compensação para a dilatação diferencial entre casco e tubos. Pode ser empregado para pequenas diferenças médias de temperatura entre os fluidos (até 50°C), e temperatura do fluido mais quente até 150°C; empregado também para altas pressões pelo casco (construção forjada), caso em que às vezes é a única solução possível. O feixe tubular não é desmontável, mas permite fácil limpeza mecânica interna dos tubos. Exige-se sempre que o fluido que passa pelo casco seja não-corrosivo e limpo (coeficiente de depósito até 0,0004h.m² °C/Kcal).

Esse tipo de trocador pode ter uma só passagem pelos tubos, em contracorrente pura, devendo neste caso ter os bocais de entrada e saída dos tubos em posição axial.

Note-se que quando a temperatura dos tubos for superior à do casco, os tubos ficarão em compressão, devendo ser considerado o efeito de flambagem.

Em igualdade de demais condições, os trocadores desse tipo têm, em média, um custo intermediário entre os aparelhos com tampa flutuante e com feixe tubular em U.

10.1.6 Trocador com tampa do carretel tipo A - construção cara, tradicional para serviços severos. Permite a limpeza do carretel e dos tubos sem ser necessário desconectar as tubulações ligadas ao carretel.

10.1.7 Trocador com tampa do carretel tipo B – construção em média 30% mais barata do que o tipo A. Há necessidade de desconectar as tubulações ligadas ao carretel para limpeza do carretel e dos tubos.

10.1.8 Trocadores de espelho flutuante com extremidades tipos S e T – para os trocadores com extremidades tipo T a remoção do feixe tubular é mais simples, e com isso a manutenção é mais fácil e mais rápida. Esse tipo é, entretanto, pouco usado preferindo-se o tipo S, porque o casco deve ter maior diâmetro (um ou dois diâmetros nominais acima do tipo S correspondente), tornando a construção mais cara, e também porque a eficiência térmica é menor, devido ao grande espaço anular perdido entre o feixe tubular e o casco. O tipo S é o mais empregado para trocadores em serviços severos em geral.

10.1.9 Trocador tipo bitubular - tipo próprio para pequenas cargas térmicas (devido à pequena área de troca de calor) e baixa vazão; permite qualquer diferencial de temperaturas; feixe tubular desmontável e com possibilidade de fácil limpeza mecânica interna. Colocando-se vários cascos em série, a diferença entre as temperaturas de entrada e saída pode ser muito grande. Permite com facilidade modulação de qualquer número de cascos; permite também atender com facilidade a grandes variações de carga térmica (decorrentes de mudanças de condições de processo), mediante simples modificações no número ou no arranjo dos cascos.

10.1.10 Resfriadores a ar – empregados para substituir os trocadores convencionais – com circulação de água de resfriamento - em instalações ou em locais onde a água é escassa, difícil, cara ou de má qualidade. A área de terreno ocupado é em média três vezes maior do que a necessária para um trocador convencional de capacidade equivalente, e o seu custo é cerca de 50% maior, além do custo adicional da energia elétrica consumida pelos ventiladores. Há ainda um acréscimo de custo para as estruturas de suporte, em relação à construção com trocadores convencionais. Em compensação, os resfriadores a ar dispensam a construção das tubulações de entrada e saída de água, o que em geral representa uma considerável economia. Os vazamentos que possam ocorrer com esses aparelhos (devido a tubos furados, por exemplo) são lançados à atmosfera sem nenhum controle, o que pode ser inadmissível para fluidos

tóxicos ou perigosos, embora a concentração seja em geral muito pequena devido à grande massa de ar movimentada pelos ventiladores – fig 10.

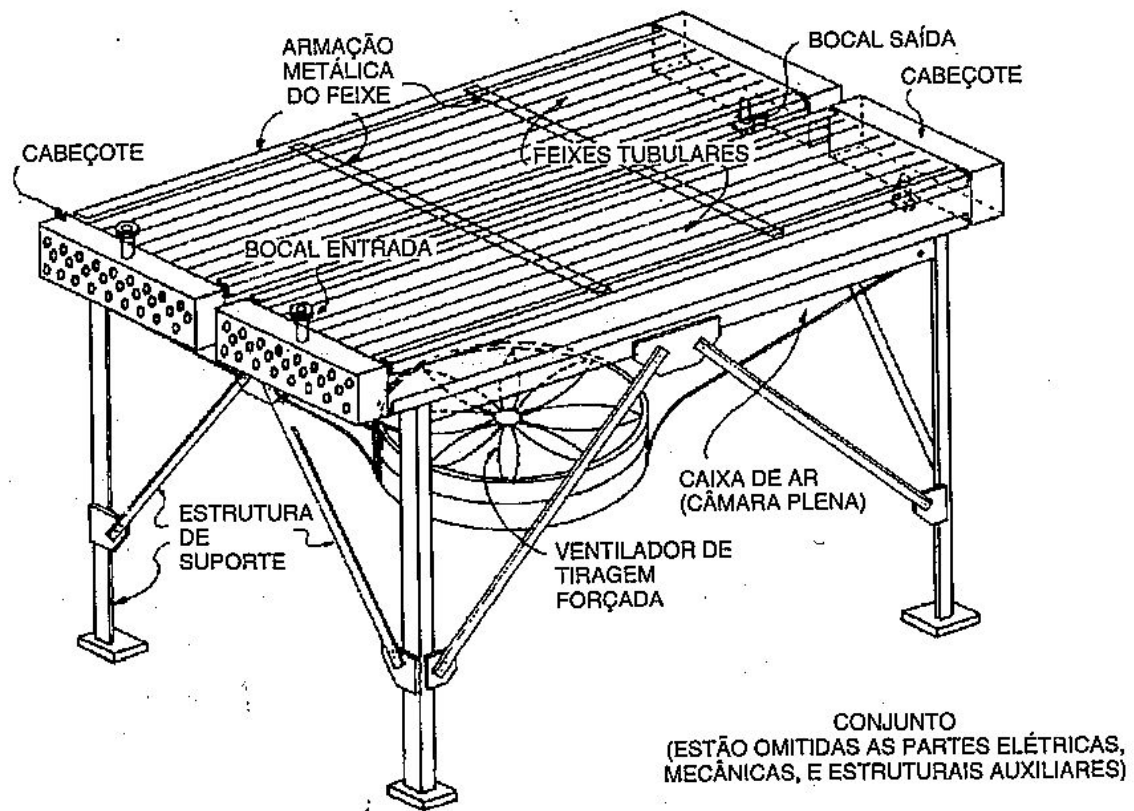


FIGURA 10 - (desenho / modelo retirado do Projeto de Extensão Jornal Mundo Físico, março/abril 2007 – Departamento de Física da UDESC–Joinville)

Bibliografia

- Norma TEMA, 09º Edição, 2007.
 - Apostila Vasos de Pressão Engº Adelino Carlos L da Silva Programa de Treinees Petrobras.
 - Apostila Curso de Equipamentos Estáticos da Engenharia – Vasos de Pressão Engº Guilherme Victor P. Donato Petrobras / Cenpes
 - Apostila, Dimensionamento de equipamentos, Volume I, pag.27, Fundação Técnico Educacional Souza Marques.
-
- Normas Técnicas Petrobras
 - N-253 Projeto Vasos Pressão
 - N-466 Projeto Mecânico e Trocadores de Calor de Casco e Tubos.

Site

Petrobras

<http://www2.petrobras.com.br>