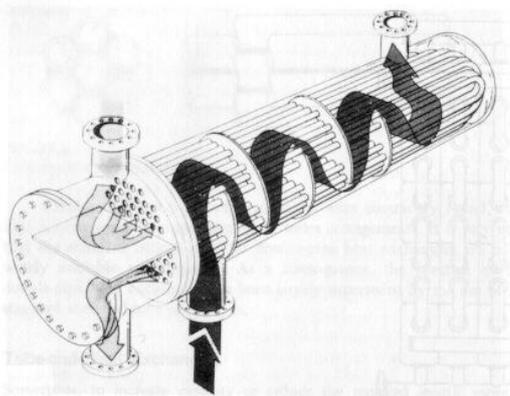
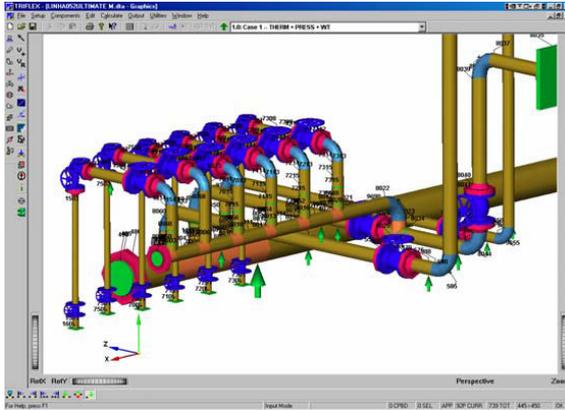


DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS I VOLUME II (TROCADORES DE CALOR)



E
N
G^o
A
L
E
X
A
N
D
R
E
M
A
R
C
H
O
N
R
E
D
D
O



ÍNDICE:

1.0- TROCADORES DE CALOR.....	PG.03
1.1- FINALIDADES DOS TROCADORES DE CALOR.....	PG.03
1.2- PRINCIPAIS CATEGORIAS DE TROCADORES DE CALOR.....	PG.04
1.3- TIPOS DE TROCADORES DE CALOR.....	PG.05
1.3.1- TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO (<i>SHELL AND TUBE</i>).....	PG.05
1.3.2 -TROCADORES DE CALOR A PLACA COM GAXETAS.....	PG.07
1.3.3 -TROCADORES DE CALOR A PLACAS SOLDADOS.....	PG.10
1.3.4 -RESFRIADORES A AR.....	PG.11
1.3.5 - TROCADORES A PLACA ALETADOS.....	PG.14
1.3.6 - TROCADORES DE CIRCUITO IMPRESSO.....	
2.0- CONSTRUÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR CONVENCIONAIS (<i>SHELL AND TUBE</i>).....	PG.16
2.1-TROCADORES DE CALOR PADRONIZADOS PELA NORMA TEMA.....	PG.21
2.2- PROJETO MECÂNICO DE TROCADORES DE CALOR PELA NORMA TEMA.....	PG.28
2.2.1- PROJETO MECÂNICO DO CASCO E DO CARRETEL.....	PG.29
2.2.2- ESPAÇAMENTO MÁXIMO DOS PARAFUSOS PARA FLANGES DO CASCO E DO CARRETEL.....	PG.
2.2.3- PROJETO DO FEIXE TUBULAR.....	PG.30
2.2.4- CÁLCULO DOS ESPELHOS.....	PG.30
2.2.5- CÁLCULO DA TAMPA DO CARRETEL.....	PG.32
3.0 BIBLIOGRAFIA.....	PG.34



1.0- TROCADORES DE CALOR

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.

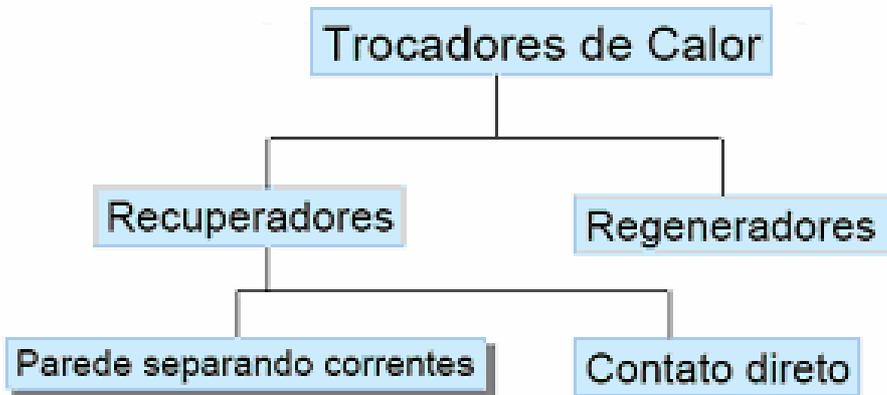
O TERMO **PERMUTADOR DE CALOR** EMBORA UTILIZADO PARA QUASE TODOS OS EQUIPAMENTOS DE TROCA DE CALOR, SE APLICA COM MAIS PROPRIEDADE NOS CASOS EM QUE OS DOIS EFEITOS, RESFRIAMENTO DO FLUIDO E AQUECIMENTO DO OUTRO, SÃO NECESSÁRIOS E DESEJADOS NO PROCESSO.

1.1 FINALIDADES DOS TROCADORES DE CALOR

FINALIDADES:

- **COLOCAR O FLUIDO NA TEMPERATURA DESEJADA PARA A PRÓXIMA ETAPA DO PROCESSO (REAÇÕES NORMALMENTE EXIGEM CARGAS A ELEVADAS TEMPERATURAS);**
- **CONDENSAR VAPORES;**
- **VAPORIZAR LÍQUIDOS;**
- **RECUPERAR CALOR PARA UTILIZÁ-LO NO PROCESSO;**
- **REJEITAR CALOR;**
- **ACIONAR UM CICLO DE GERAÇÃO.**

1.2 PRINCIPAIS CATEGORIAS DE TROCADORES DE CALOR



Muitos trocadores tem duas correntes, quente e frio, mas alguns tem mais de duas

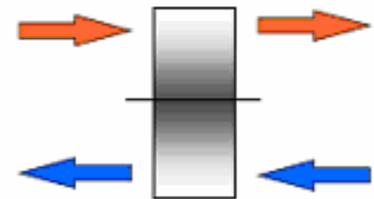
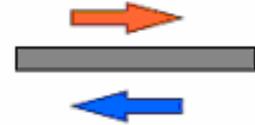
Recuperadores/regeneradores

Recuperativo

Tem passagens separadas para cada fluido que circulam simultaneamente pelo trocador transferindo calor entre as correntes

Regenerativo

Tem uma única passagem por onde circulam alternadamente os fluidos quente e frio.



TROCADORES DE CALOR RECUPERATIVOS: SÃO OS TROCADORES DE CALOR NOS QUAIS OS FLUIDOS ESCOAM SIMULTANEAMENTE ATRAVÉS DO EQUIPAMENTO EM PERCURSOS SEPARADOS POR PAREDES, SENDO ATRAVÉS DELAS QUE O CALOR TRANSFERE-SE DO FLUIDO QUENTE PARA O FLUIDO FRIO.

EX: TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBO.

TROCADORES DE CALOR REGENERATIVOS: SÃO OS TROCADORES DE CALOR NOS QUAIS OS FLUIDOS ESCOAM ALTERNATIVAMENTE ATRAVÉS DE UM ELEMENTO TÉRMICO DESTINADO A RETER E A LIBERAR O CALOR DOS FLUIDOS

EX: RESFRIADORES A AR.

1.3 TIPOS DE TROCADORES DE CALOR

OS PRINCIPAIS TIPOS DE TROCADORES DE CALOR ESTÃO LISTADOS ABAIXO:

- Casco e tubo
- Trocadores a placas com gaxetas (PHE)
- Trocadores a placas soldados
- Trocadores resfriados a ar (ACHE)
- Trocadores a placas aletados (PFHE)
- Trocadores de circuito impresso (PCHE)

1.3.1 TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO (SHELL AND TUBE)

Casco e Tubo



- Área por casco: 10 a 1000 m²
- Peso do feixe: 15 toneladas (Petrobras)
- Para espelho fixo, limite de peso máximo é bem maior, pois feixe não é retirado. A limitação é função do guindaste disponível.



TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO DE PEQUENO PORTE

Vantagens e desvantagens do Casco e Tubo

- Vantagens
 - ✓ Projeto extremamente flexível e robusto
 - ✓ Fácil de manter em operação e reparar
 - ✓ Pode ser projetado para ser fácil manutenção
 - ✓ Muitos fornecedores
- Desvantagens
 - ✓ Requer espaço elevado – normalmente necessário espaço para remover o feixe
 - ✓ Trocador a placas pode ser mais barato para pressão abaixo de 25 bar (man) e temperatura inferior a 130°C, quando utilizando material especial

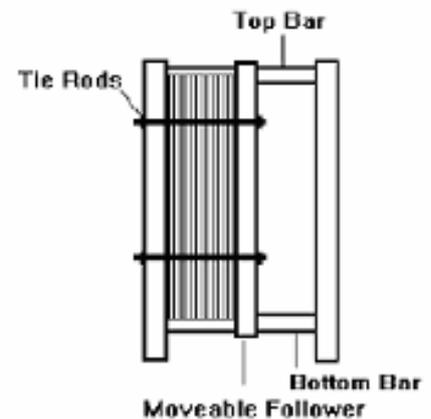
Escopo do Casco e Tubo

- Pressão máxima
 - ✓ 300 bar (abs) (4500 psia) no lado do casco
 - ✓ 1400 bar (abs) (21000 psia) no lado dos tubos
- Faixa de temperatura
 - ✓ -100 to 600°C
 - ✓ Possibilidade de extensão da faixa com novos materiais
- Limitações do fluido
 - ✓ Função dos materiais
 - ✓ Máximo $\varepsilon = 0.9$ (menor com vários passes)
 - ✓ Mínimo $\Delta T = 5\text{ C}$

1.3.2 TROCADORES DE CALOR A PLACA COM GAXETAS

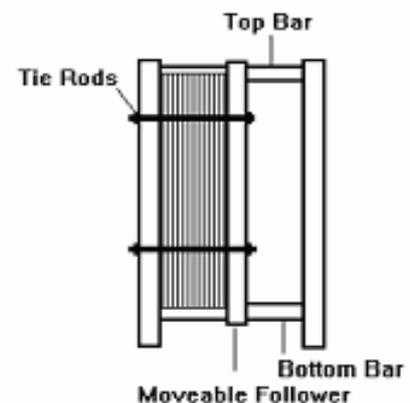
Trocadores a placas (Plate and frame) PHE

- Placas suportadas verticalmente e apertadas entre suportes
- Gaxetas direcionam os fluidos entre placas alternadas e previnem vazamentos externos
- Placas fabricadas de inox ou outro material nobre
- Placas corrugadas para dar pontos de suporte e aumentar a transferência de calor



Trocadores a Placas com gaxetas (Plate and Frame) PHE

- Placas prensadas de inox ou outro material nobre
 - titânio
 - incoloy
 - hastalloy
- Gaxeta é o ponto fraco. Fabricadas de
 - Borracha nitrílica
 - hypalon
 - viton
 - neoprene

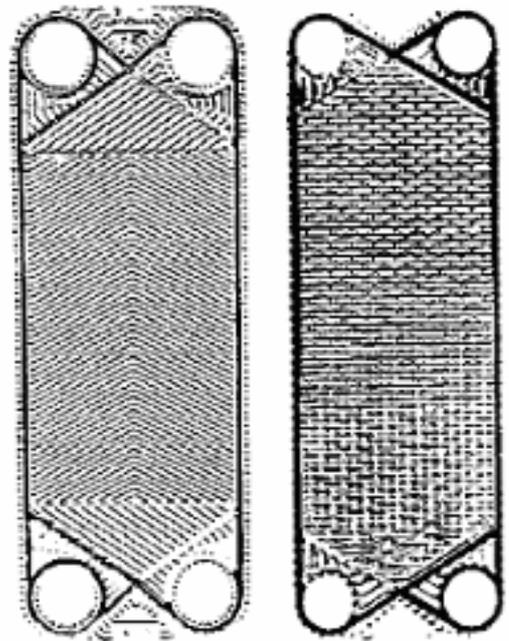


TROCADOR DE CALOR A PLACAS

Tipos de placas

Corrugação na placa aumenta a transferência de calor e a rigidez

Muitos pontos de contacto e caminho tortuoso

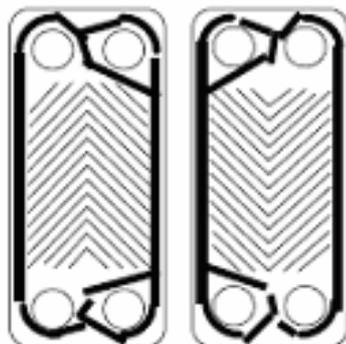
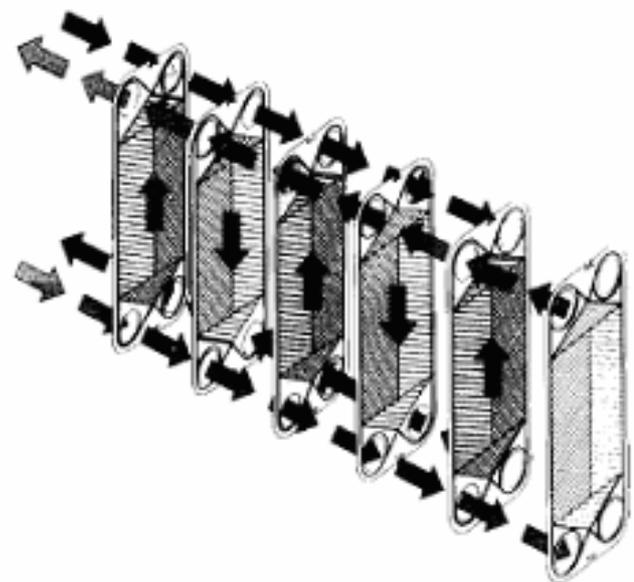


Chevron

Washboard

Arranjo do escoamento num PHE

Gaxetas arrançadas para cada corrente escoar entre placas alternadas



Placas alternadas (normalmente mesmo tipo invertidas)

Vantagens do trocador a placas com gaxetas

- **Elevada transferência de calor** – turbulento nos dois lados
- **Elevada efetividade térmica** – 0,9 a 0,95 possível
- **Baixo ΔT** – até 1 C
- **Compacto** – comparado com C&T
- **Custo** – baixo pois placas são finas
- **Acessibilidade** – pode ser aberta para inspeção e limpeza
- **Flexibilidade** – Placas extras podem ser adicionadas (dentro de certos limites)
- **Tempo de retenção reduzido** com baixo inventário de líquido
- **Deposição (fouling)** – baixos valores de r são possíveis

Desvantagens dos trocadores a placas com gaxetas

- **Pressão** – valor máximo limitado pela selagem das gaxetas e estrutura.
- **Temperatura** – limitada pelo material da gaxeta.
- **Capacidade** – limitada pelo diâmetro dos bocais
- **Entope** com facilidade quando há sólidos em suspensão, a menos que placas com passos maiores sejam usadas
- **Corrosão** – Placas resistentes, mas gaxetas podem não resistir aos fluidos
- **Vazamento** – Gaxetas sempre aumentam o risco
- **Resistência a fogo** – não resistem a fogo prologado (usualmente não aceitos em refinarias)

Escopo dos trocadores a placas com gaxetas

- Pressão máxima
 - 25 bar (abs) normal (375 psia)
 - 40 bar (abs) com projetos especiais (600 psia)
- Faixa de temperatura
 - -25 to +175°C normal
 - -40 to +200°C especial
- Limitações do fluido
 - Principalmente devido à gaxeta
- ⊗ Maximum $\varepsilon = 0.95$
- ⊗ Minimum $\Delta T = 1 \text{ C}$

1.3.3 TROCADORES DE CALOR A PLACAS SOLDADOS

Trocadores a placas soldados

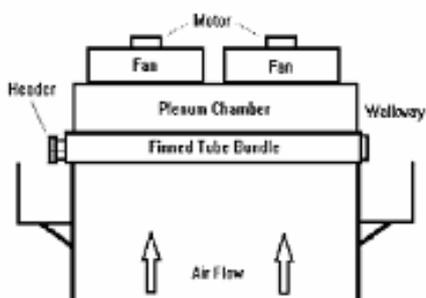
- Grande variedade de tipos, normalmente proprietários
- Não possuem gaxetas, não podendo ser abertos. Entretanto, alguns deles permitem limpeza com hidrojateamento;
- Pares de placas soldadas podem ser utilizados em trocadores com gaxetas, permitindo a limpeza no lado não soldado;

Equipamentos proprietários

- Muitos são fabricados por mais de uma companhia, sem patentes de proteção
- Outros são fabricados por uma única companhia, com proteção de patente. Um exemplo é o de circuito impresso "printed circuit exchanger" da Heatric (PCHE)
- Um trocador a placas soldado, que vem sendo muito utilizado, é o Compabloc da Alfa Laval. A VIEX tem um equipamento similar, denominado Viexbloc.

1.3.4 RESFRIADORES A AR

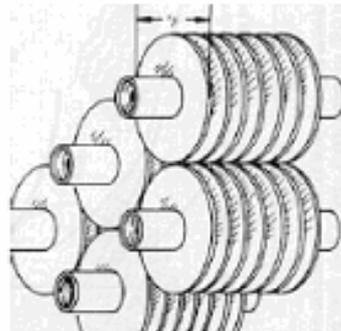
Trocadores resfriados a ar (Air cooled heat exchangers) ACHE



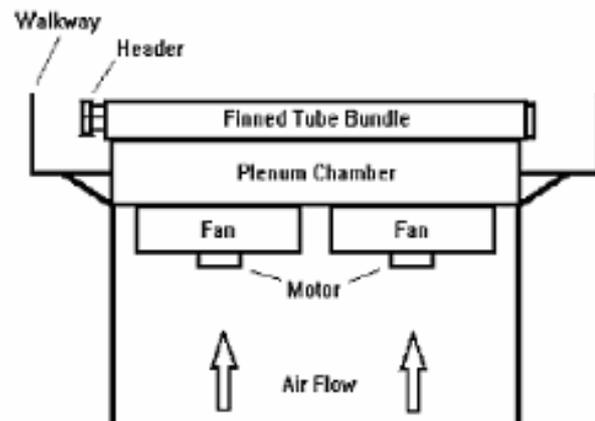
TROCADOR DE CALOR A AR.

Resfriador a ar (Air-cooled exchanger) ACHE

- Ar soprado através dos tubos aletados (tiragem forçada)
- Ar succionado (tiragem induzida)



Tubos aletados



Vantagens dos resfriadores a ar

- O ar está sempre disponível. A água pode não existir, ou seu custo ser elevado. É uma tendência crescente, devido ao meio ambiente;
- Investimento total (custo do trocador + instalação + custo operacional + manutenção) pode ser inferior ao com água;
- Custo de manutenção é geralmente menor que o do casco e tubo;
- No caso de falha de energia, continua trocando calor por convecção natural;
- Projeto mecânico geralmente mais simples, pois pressão do lado do ar é atmosférica;
- Em pressões elevadas, é geralmente a opção requerida, pois vazamentos podem contaminar o sistema de água de resfriamento. Além disso, o lado da água teria que ser dimensionado para pressões mais elevadas, em caso de falha de tubos;
- Em pressões elevadas, a água pode vir a ser colocada no casco, o que geralmente (dependendo da água) pode levar a incrustação severa;
- A deposição (fouling) no lado do ar é normalmente ignorada;

Desvantagens dos resfriadores a ar

- Ruído – os ventiladores estão sendo projetados para baixo ruído, mas reduzindo eficiência e elevando custos de energia;
- Podem requerer proteção para períodos mais frios, para evitar problemas de baixo ponto de fluidez ou congelamento;
- Não conseguem resfriar a temperaturas tão baixas quanto a água;
- Requerem maior espaço físico. São normalmente colocados em cima de tubovias;

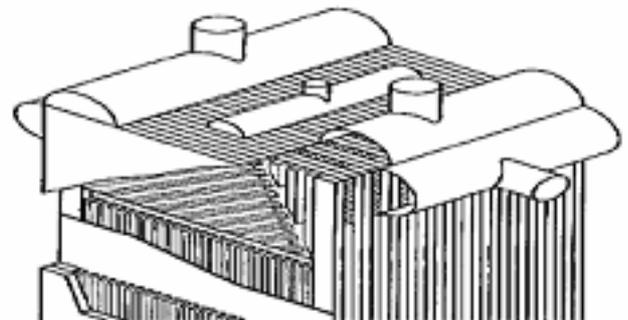
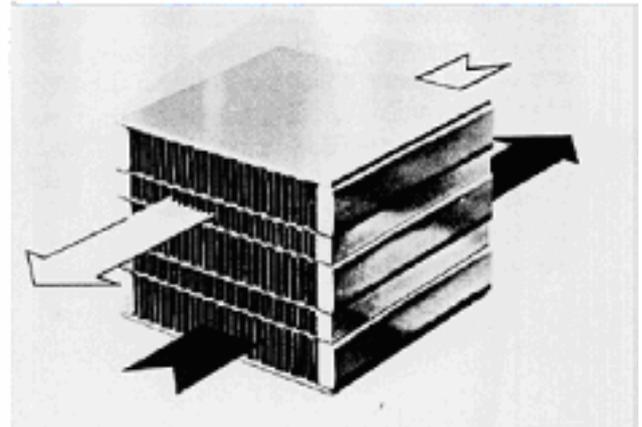
Escopo dos Resfriadores a Ar

- Pressão máxima (lado dos tubos): 500 bar (abs) (7300 psia)
- Máxima temperatura: 600°C (1100°F)
- Fluidos: depende do material dos tubos
- Tamanho: 5 a 350 m² por feixe (referido ao tubo liso). Pode ter vários feixes para um mesmo serviço;

1.3.5 TROCADORES A PLACA ALETADOS

Trocadores a placas aletados (Plate Fin Exchangers)

- Formado pela brazagem de placas de alumínio em forno de vácuo, separadas por placas de aletas
- Dimensões e peso reduzidos. Geralmente, com volume de 500 m²/m³ mas podendo ser de 1800 m²/m³
- Utilização em serviços criogênicos (plantas petroquímicas e liquefação de ar)
- Podem ser construídos em aço-inox



Escopo dos trocadores a placas aletados

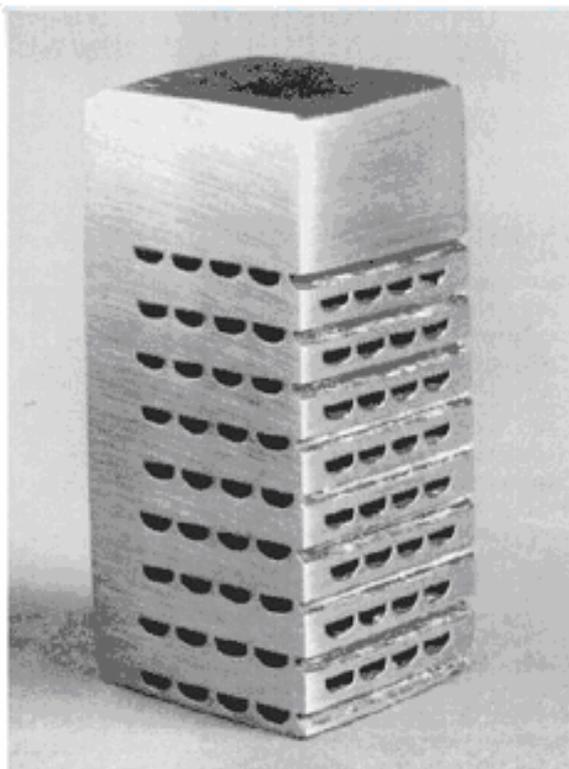
- | | |
|-------------------------------|--|
| • Pressão máxima: | 90 bar (depende do tamanho) |
| • Temperatura: | -200 to 150°C em alumínio
até 600°C em inox |
| • Fluidos: | Limitados pelo material |
| • Serviços: | Monofásicos e bifásicos |
| • Configuração do escoamento: | Fluxo cruzado, contracorrente |
| • Várias correntes: | até 12 correntes (7 normal) |
| • Baixo ΔT : | até 0,1°C |
| • Máximo ΔT : | 50°C típico |
| • Alta ϵ | até 0,98 |

Usar apenas com fluidos limpos

1.3.6 TROCADORES DE CIRCUITO IMPRESSO

Trocadores de Circuito Impresso (Printed Circuit Exchanger) PCHE

- Muito compacto
- Construção robusta pela solda de difusão
- Canais pequenos (diâmetro hidráulico médio típico 1 - 2 mm)
- Pode ser construído em inox, ligas de níquel, ligas de cobre e titânio



Escopo dos Trocadores de Circuito Impresso (PCHE)

- Pressão máxima: 1000 bar (diferencial 200bar)
- Temperatura: -200 to +800°C para inox (depende do material)
- Fluidos: **limpo**
- Tamanho normal: 1 to 1000 m²
- Escoamento: Cruzado ou contracorrente
- Efetividade (ϵ): até 0,98
- Baixo ΔT : sim
- Oscilação térmica: pode causar problemas

2.0- CONSTRUÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR CONVENCIONAIS (SHELL AND TUBE)

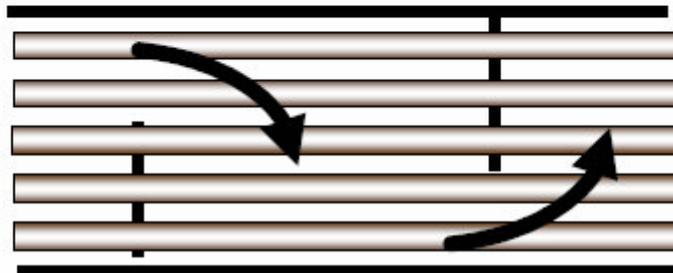
Por que um casco e tubo?

Cerca de 85% dos trocadores utilizados nas indústrias de petróleo, petroquímica, química e geração de energia são casco e tubo. Por que?

- Podem ser projetados para praticamente qualquer carga térmica, pressão e temperatura
- Ser construído em muitos materiais
- Muitos fabricantes
- Manutenção efetuada por não especialistas
- Métodos de projeto e códigos mecânicos estabelecidos por anos de experiência

Construção

- Feixe de tubos em um casco cilíndrico
- Chicanas usadas como suportes dos tubos e para providenciar o fluxo cruzado entre os tubos
- Folgas necessitam ser deixadas entre as chicanas e o casco e entre os tubos e chicanas para possibilitar montagem



SÃO OS TROCADORES DE CALOR MAIS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA DE ÓLEO & GÁS. NOS TROCADORES DE CALOR CONVENCIONAIS, TEMOS DOIS FLUIDOS CIRCULANDO POR DOIS CIRCUITOS INDEPENDENTES: O FLUIDO QUENTE E O FLUIDO FRIO. UM DESSES FLUIDOS PASSA POR DENTRO DOS TUBOS DO FEIXE TUBULAR: É 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 “LADO DOS TUBOS” (*TUBE-SIDE*) E “LADO DO CASCO” (*SHELL SIDE*) RESPECTIVAMENTE. CADA UM DESSES DOIS CIRCUITOS PODE SER FEITO EM UMA SÓ PASSAGEM OU EM VÁRIAS PASSAGENS SUCESSIVAS.

OS TROCADORES CONVENCIONAIS TÊM TRÊS PARTES PRINCIPAIS, CADA UMA COMPOSTA DE VÁRIAS PEÇAS:

- 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 VÁRIAS DISPOSIÇÕES.

PARA PERMITIR A MANUTENÇÃO E LIMPEZA INTERNA DO EQUIPAMENTO, TEM-SE QUASE SEMPRE O FEIXE TUBULAR REMOVÍVEL, E TAMPAS TAMBÉM REMOVÍVEIS NO CARRETEL E NO CORPO, PARA ACESSO AO INTERIOR DO EQUIPAMENTO.

EM TODOS OS TROCADORES DE CALOR EXISTE SEMPRE UMA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE O CORPO E O FEIXE TUBULAR, EM CONSEQUÊNCIA DA DIFERENÇA

DE TEMPERATURA ENTRE OS DOIS FLUIDOS CIRCULANTES, TEMOS, PORTANTO, UMA DILATAÇÃO DIFERENCIAL ENTRE ESSAS DUAS PARTES. EXISTEM VÁRIAS FORMAS DE CONTROLAR ESSA DILATAÇÃO DIFERENCIAL, SENDO MAIS FREQUENTES AS SEGUINTE:

- FEIXE TUBULAR COM ESPELHO FLUTUANTE (*FLOATING HEAD BUNDLE*);
- FEIXE TUBULAR EM U (*U TUBE BUNDLE*);
- JUNTA DE EXPANSÃO NO CASCO E ESPELHO FIXOS.

A FIGURA 2.7 (A) A SEGUIR MOSTRA UM EXEMPLO DE TROCADOR DE CALOR DE FEIXE TUBULAR COM ESPELHO FLUTUANTE. O FEIXE TUBULAR TEM UM ESPELHO FIXO, PRESO ENTRE OS FLANGES DO CARRETEL E DO CORPO. O OUTRO ESPELHO, JUNTAMENTE COM A TAMPA FLUTUANTE, PODE MOVIMENTAR-SE LIVREMENTE DENTRO DO CASCO, EM CONSEQUÊNCIA DA DILATAÇÃO. PARA LIMPEZA INTERNA DO FEIXE TUBULAR BASTA REMOVER AS TAMPAS, SEM NECESSÁRIO DESCONECTAR AS TUBULAÇÕES QUE ESTÃO LIGADAS AOS BOCAIS DO CARRETEL.

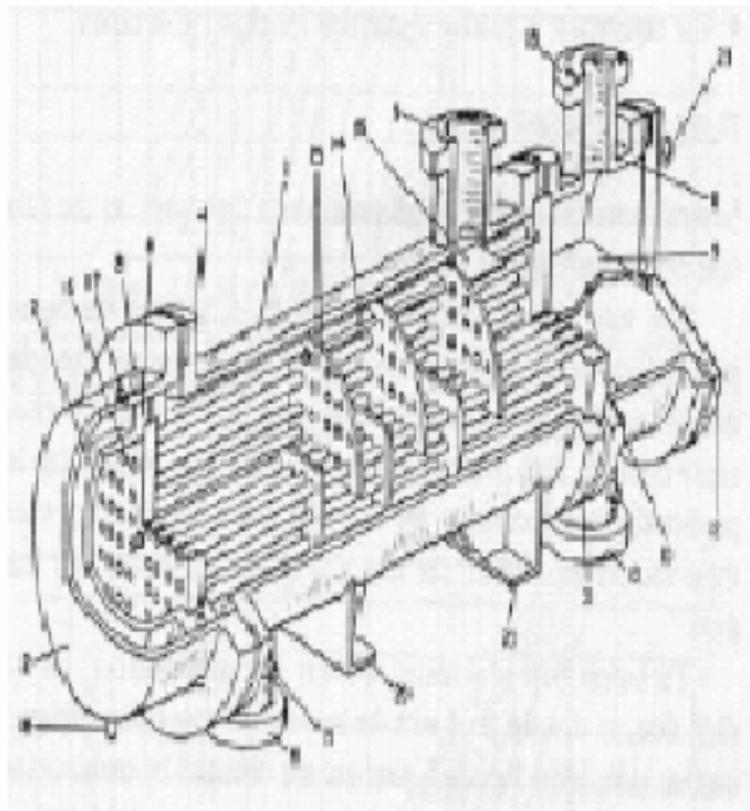
A FIGURA 2.7 (B) É UM EXEMPLO DE TROCADOR DE CALOR COM FEIXE TUBULAR EM “U”. O FEIXE TUBULAR TEM UM ÚNICO ESPELHO, FIXO, E É REMOVÍVEL, JUNTAMENTE COM O ESPELHO, PELO LADO DO CARRETEL. DEVIDO A FORMA DOS TUBOS, A DILATAÇÃO MAS A LIMPEZA INTERNA DOS TUBOS É DIFÍCIL, SENDO IMPOSSÍVEL A LIMPEZA MECÂNICA.

OS TROCADORES COM JUNTA DE EXPANSÃO NO CASCO ESTÁ REPRESENTADO NA FIGURA 2.7 (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 E VERSA.

A FIGURA 2.7 (D) APRESENTA O TROCADOR DE CALOR COM TUBOS RETOS E AMBOS ESPELHOS FIXOS, UTILIZADOS PARA PEQUENOS DIFERENCIAIS DE TEMPERATURA ENTRE OS DOIS FLUIDOS (ATÉ 50°C NO MÁXIMO).



CONSTRUÇÃO DE FEIXE TUBULAR



VISTA EXPLODIDA DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

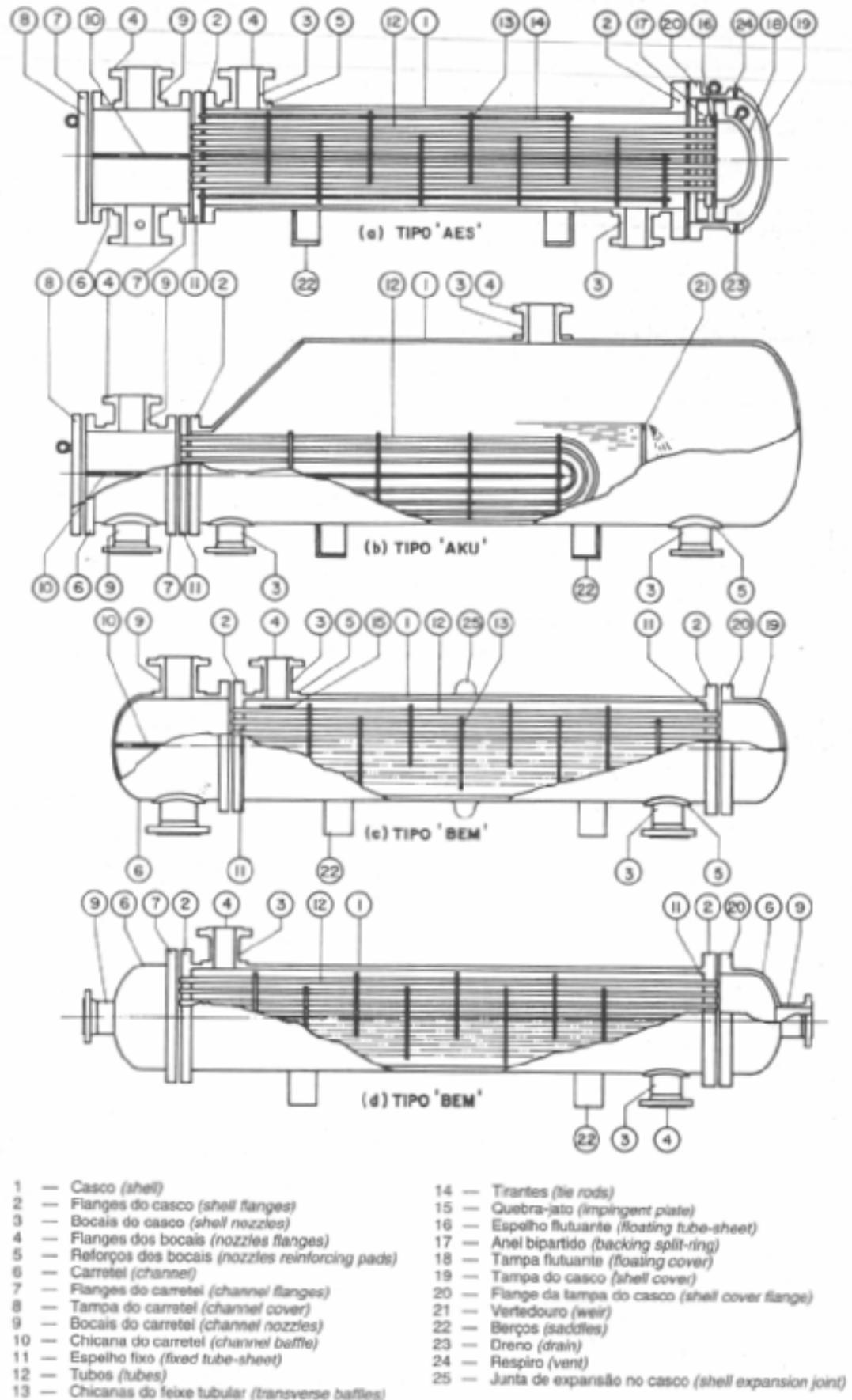
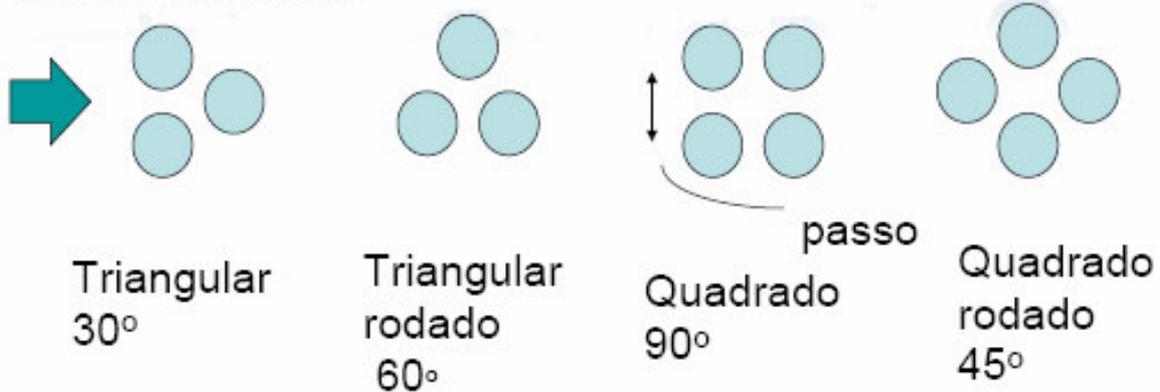


Fig. 2.7 Partes de trocadores de calor convencionais.

Arranjo dos Tubos



- Típico: tubos 1" com passo 1.25" ou 0.75" com passo 1"
- Arranjo triangular: para fluidos limpos; mais tubos por casco
- Arranjo quadrado: permite limpeza mecânica

2.1- TROCADORES DE CALOR PADRONIZADOS PELA NORMA TEMA

A ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE FABRICANTES DE TROCADORES DE CALOR (*TUBULAR EXCHANGERS MANUFACTURERS 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, CONFORME FIGURA 2.12.

Norma TEMA

- O projeto é baseado normalmente na norma TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers' Association). API Std 660/ISO 16812 e ASME
- Recomendações gerais de detalhes construtivos, folgas, terminologia, boas práticas de projeto, etc.
- Providencia bases para contratos entre cliente e fabricante
- Podem ser adicionadas recomendações adicionais pelo cliente, uma vez que ele é quem conhece o processo
- A seleção do material é efetuada pelo cliente, ou pelo fabricante, a partir de infirmações fornecidas pelo usuário

26 / Vasos de Pressão

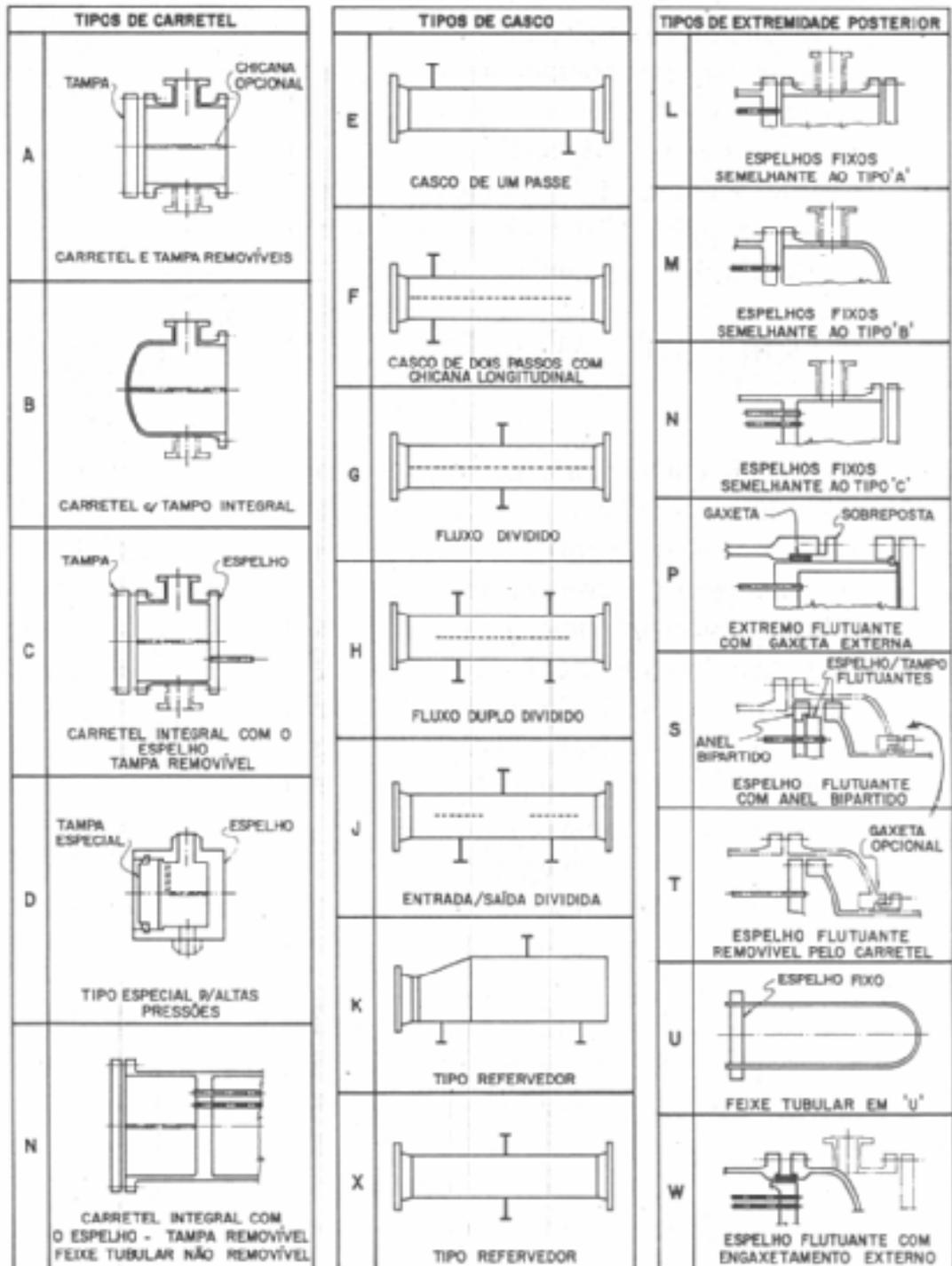
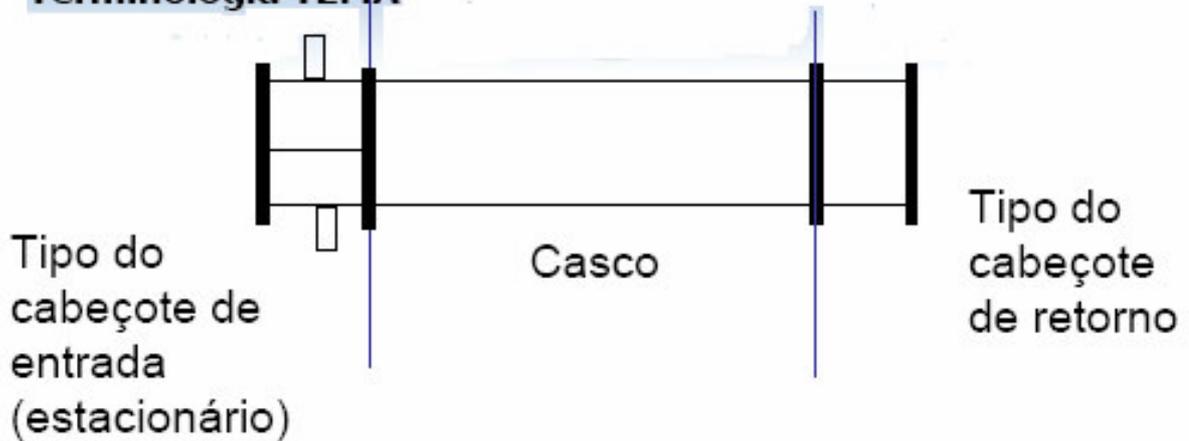


Fig. 2.12 Tipos de trocadores de calor padronizados pela norma TEMA (baseada na Fig. N-1.2 dessa norma).

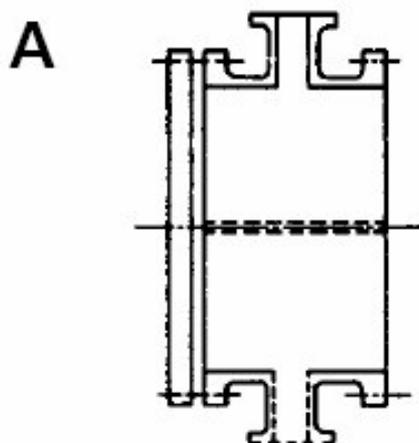
Terminologia TEMA



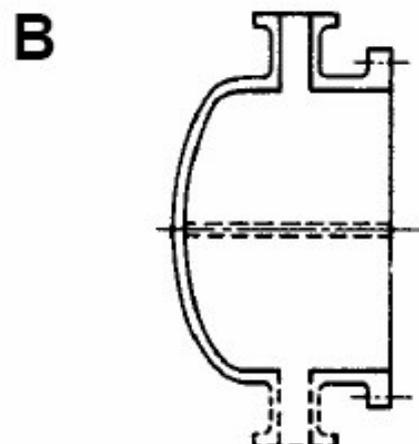
- Letras dadas para o cabeçote de entrada, casco e cabeçote de saída
- Tipo do trocador é dado por três letras
- Exemplo acima é tipo AEL

Tipo do Cabeçote de entrada

- Tipo A usual quando o fluido dos tubos é sujo
- Tipo B utilizado quando o fluido dos tubos é limpo. Mais barato e simples. Usar sempre que possível.



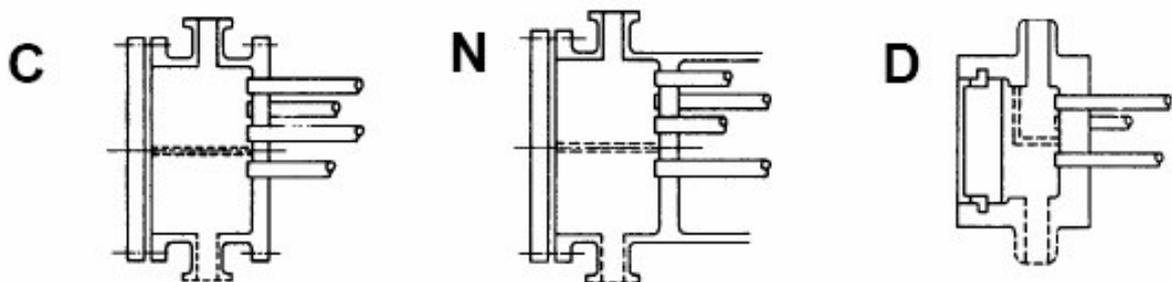
Carretel (com tampo removível)



Boleado (tampo integral)

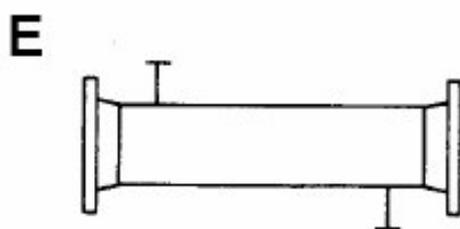
Outros tipos de cabeçotes de entrada

- Tipo C utilizado para casco ou feixe removíveis, serviços com fluidos perigosos no lado dos tubos, feixes pesados, ou serviços que necessitem limpeza frequente no lado do casco
- Tipo N utilizado com fluidos perigosos no lado do casco, espelho fixo
- Tipo D ou soldado no espelho para alta pressão (acima de 100 bar). Pode ser utilizado para pressões menores, com grandes diâmetros

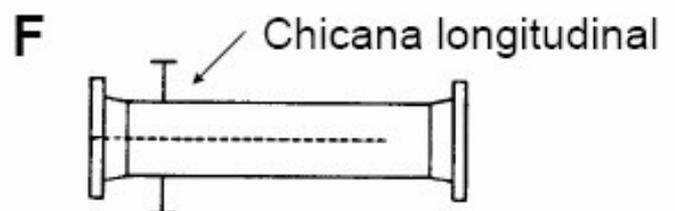


Tipos de Casco

- Tipo E utilizado sempre que possível
- Tipo F possibilita contra-corrente puro (quase, pois há as fugas térmica e hidráulica) quando usando dois passes nos tubos. Reduz número de cascos. Não utilizado para serviços alta pressão (tubos)/baixa pressão (casco) devido a problemas de vazamento



Um passe no casco

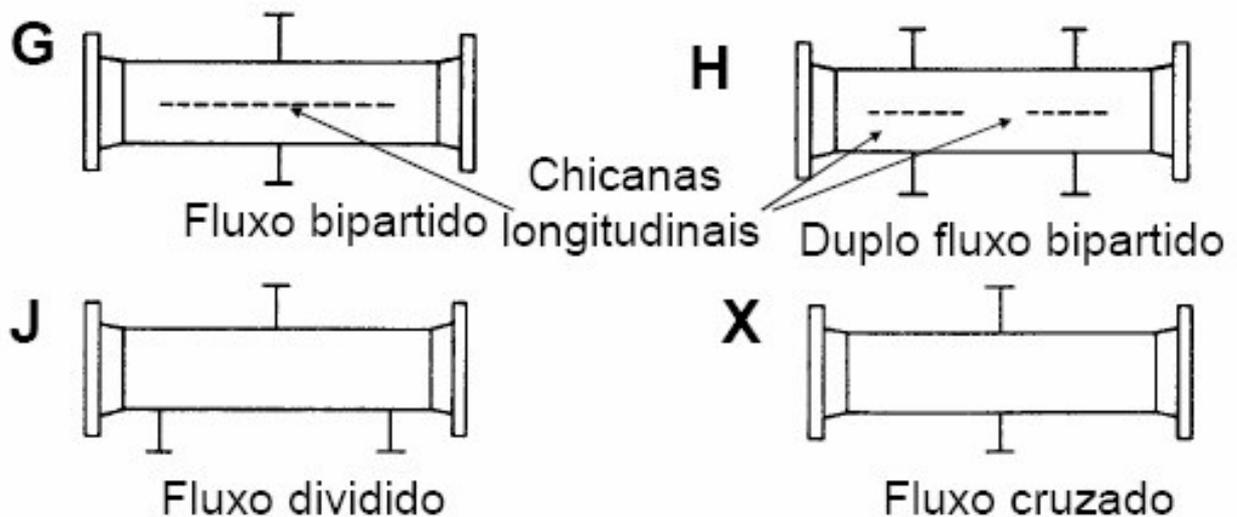


Dois passes no casco

Notar que a chicana longitudinal é difícil de selar com o casco, especialmente ao reinseri-la no casco após a manutenção

Mais tipos de cascos

- Tipos G e H normalmente utilizados em termosifões horizontais
- Tipos J e X quando perdas de pressão admissíveis muito baixas



Tipos de cabeçotes de retorno

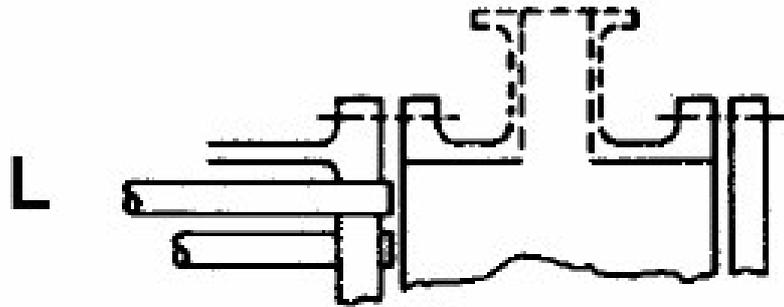
Tem-se três tipos gerais

- Espelho fixo (L, M, N)
- Tubo U
- Cabeçote flutuante (P, S, T, W)

Utilizar espelho fixo se a dilatação diferencial tubo/casco for baixa (normalmente se $\Delta T < 50^{\circ}\text{C}$), caso contrário, utilizar outro tipo. O projeto mecânico deverá verificar se as tensões resultantes são adequadas.

Juntas de dilatação no casco não são geralmente aceitáveis na Petrobras, principalmente com fluidos inflamáveis.

Tipos de cabeçotes de retorno espelho fixo



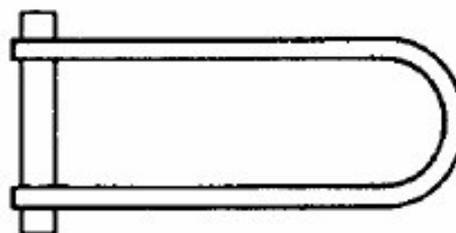
Espelho fixo

- L é equivalente ao tipo A para o cabeçote de retorno
- M é equivalente ao tipo B para o cabeçote de retorno
- N é equivalente ao tipo N para o cabeçote de retorno

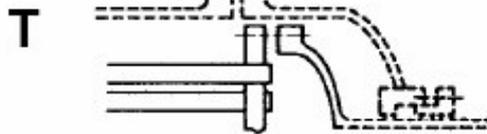
Cabeçotes flutuantes e tubo U

Permite remoção do feixe e limpeza mecânica no lado do casco

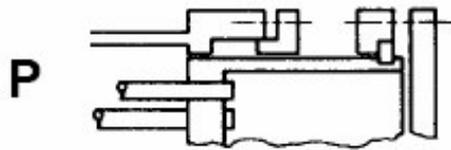
- O tipo tubo U é o projeto mais simples, mas é difícil de limpar no lado dos tubos nas curvas



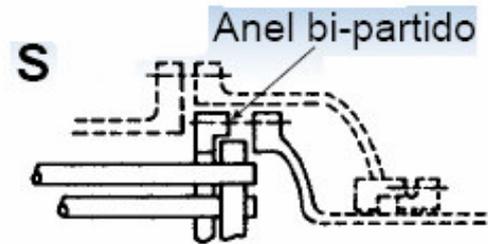
Cabeçotes flutuantes



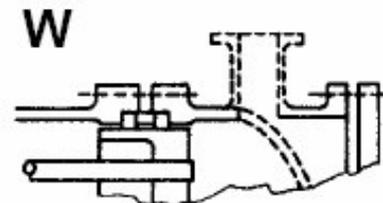
Com ligação aparafusada
no espelho
Notar folga elevada casco/feixe



Com vedação por preme-gaxeta
para dar pequena folga casco/feixe



Similar ao T, mas com menor
folga casco/feixe



Com vedação extena por preme-gaxeta
Máximo de 2 passes nos tubos

Regra prática sobre custo

- O preço cresce fortemente com o diâmetro do casco/número de tubos devido à espessura do casco, espelho e flanges
- O preço cresce pouco com o comprimento dos tubos
- Trocadores compridos e finos são usualmente mais baratos
- Considere dois trocadores de mesma área: espelho fixo, 30 bar dos dois lados, aço carbono, área de 564 m² (6060 pes²), tubos de 19 mm (3/4")

Comprimento	Diâmetro	Tubos	Custo
3048 mm	1524 mm	3139	\$112k (£70k)
18290 mm	635 mm	523	\$54k (£34k)



2.2- PROJETO MECÂNICO DE TROCADORES DE CALOR PELA NORMA TEMA

A ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE FABRICANTES DE TROCADORES DE CALOR (**TUBULAR EXCHANGERS MANUFACTURERS ASSOCIATION - TEMA**) PUBLICOU UMA NORMA QUE INCLUI EXIGÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO, SELEÇÃO DE MATERIAIS, TESTES, INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR. NO QUE DIZ RESPEITO AO PROJETO, A NORMA ABRANGE TANTO O PROJETO MECÂNICO, COMO TAMBÉM O PROJETO TÉRMICO. VEREMOS OS ASPECTOS MAIS IMPORTANTES DO PROJETO MECÂNICO. ESSA NORMA, CONHECIDA COMO NORMA **TEMA**, DECLARA EXPRESSAMENTE QUE SE DESTINA APENAS A COMPLETAR E NÃO A SUBSTITUIR O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, PARA VASOS DE PRESSÃO. DESSA FORMA OS TROCADORES DE CALOR CONSTRUÍDOS DE ACORDO COM A NORMA **TEMA** DEVEM OBEDECER A TODOS OS REQUISITOS E EXIGÊNCIAS DO CÓDIGO ASME, DO QUAL A NORMA TEMA É SIMPLEMENTE UM ADENDO PARA ATENDER ÀS CONDIÇÕES PECULIARES DOS TROCADORES.

TODAS AS EXIGÊNCIAS E RECOMENDAÇÕES SOBRE MATERIAIS, DETALHES DE PROJETO, BEM COMO AS TABELAS DE TENSÕES ADMISSÍVEIS DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, DEVEM, PORTANTO, SER OBSERVADAS NO PROJETO DOS TROCADORES.

ESTÃO INCLUÍDOS NA NORMA TEMA **SOMENTE OS TROCADORES DE CASCO E FEIXE TUBULAR**, DENTRO DAS SEGUINTE LIMITAÇÕES:

- DIÂMETRO INTERNO DO CASCO ATÉ 60" (1.524 mm);
- PRESSÃO DE PROJETO (DO CASCO OU DOS TUBOS) ATÉ 3.000 psi (204 Kg/cm²);
- PRODUTO DO DIÂMETRO INTERNO DO CASCO (OU DO CARRETEL), EM POLEGADAS, PELA PRESSÃO DE PROJETO (DO CASCO OU DOS TUBOS), EM psi, ATÉ 60.000.

ALÉM DOS TROCADORES COM CONDIÇÕES FORA DESSES LIMITES, ESSA NORMA **NÃO ABRANGE** TAMBÉM OUTROS TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE TROCA DE CALOR, TAIS COMO **RESFRIADORES A AR, CONDENSADORES DE SUPERFÍCIE, TROCADORES A PLACA, ETC.**

A NORMA TEMA DISTINGUE TRÊS CLASSES DE TROCADORES DE CALOR, DENOMINADAS DE CLASSE **R**, CLASSE **C** e CLASSE **B**.

A CLASSE **R** INCLUI OS EQUIPAMENTOS DESTINADOS A SERVIÇOS SEVEROS, ISTO É, SERVIÇOS CONTÍNUOS E DE RESPONSABILIDADE, OU SERVIÇOS COM ALTO RISCO POTENCIAL. PERTENCEM A ESTA CLASSE A MAIORIA DOS TROCADORES DE REFINARIAS, INDÚSTRIAS PETROQUÍMICAS, OUTRAS INDÚSTRIAS DE PROCESSO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO E INDÚSTRIAS QUÍMICAS.

AS CLASSES **C** e **B** ABRANGEM OS TROCADORES PARA SERVIÇOS DE RISCO E RESPONSABILIDADE MODERADOS, CUJO PROJETO ATENDE PRIMORDIALMENTE À ECONOMIA. APESAR DESTA DISTINÇÃO SALIENTADA PELA NORMA, OS REQUISITOS DE PROJETO MECÂNICA PARA ESSAS TRÊS CLASSES SÃO QUASE OS MESMOS.

A SEGUIR TRATAREMOS ESPECIALMENTE DAS EXIGÊNCIAS RELATIVAS À CLASSE **R**, QUE É A MAIS FREQUENTEMENTE EMPREGADA.

2.2.1- PROJETO MECÂNICO DO CASCO E DO CARRETEL

O CÁLCULO DOS CORPOS CILÍNDRICOS DO CASCO, CARRETEL E PESCOÇOS DE BOCAIS DE TROCADORES DE CALOR É FEITO DIRETAMENTE PELAS FÓRMULAS DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1. ESSA FÓRMULAS APLICAM-SE TAMBÉM AO CÁLCULO DE TRANSIÇÕES CÔNICAS DO CASCO, TAMPOS ELÍPTICOS E TORIESFÉRICOS DO CASCO E DO CARRETEL, BEM COMO PARA OS REFORÇOS DE ABERTURAS. INDEPENDENTEMENTE DOS VALORES CALCULADOS, A NORMA **TEMA** EXIGE OS VALORES MÍNIMOS DE ESPESSURA DADOS NA TABELA R-3.13, REPRODUZIDA A SEGUIR. ESSES VALORES MÍNIMOS, QUE NÃO INCLUEM QUALQUER MARGEM PARA CORROSÃO, EROSÃO, ETC, APLICAM-SE TANTO AOS CORPOS CILÍNDRICOS DO CASCO E CARRETEL, COMO AOS TAMPOS ELÍPTICOS OU TORIESFÉRICOS, DE TROCADORES DAS CLASSES **R, C e B**.

DIÂMETRO INTERNO DO CASCO (mm)	AÇOS-CARBONOS E AÇOS-LIGA		AÇOS INOXIDÁVEIS
	TUBOS	CHAPAS	
200 - 300	ESP. "SÉRIE 30"	-	3,2 mm
330 - 730	9,5 mm	9,5 mm	4,8
760 - 990	-	11,1	6,3
1.000 - 1.500	-	12,7	7,9

PARA DIÂMETROS PEQUENOS (ATÉ CERCA DE 400 mm), OS FLANGES DO CASCO E DO CARRETEL (*GIRTH FLANGES*) DOS TROCADORES COSTUMAM SER FLANGES NORMALIZADOS. OS FLANGES DE BOCAIS DO CASCO E DO CARRETEL SÃO QUASE SEMPRE PEÇAS NORMALIZADAS PARA QUAISQUER TROCADORES, INDEPENDENTEMENTE DO SEU DIÂMETRO. PARA TODOS ESSES FLANGES NÃO É NECESSÁRIO NENHUM CÁLCULO, SENDO A SELEÇÃO FEITA DE ACORDO COM AS CLASSES DE PRESSÃO.

OS FLANGES DO CASCO E DO CARRETEL DE DIÂMETROS MAIORES SÃO USUALMENTE DIMENSIONADOS INDIVIDUALMENTE, NÃO SENDO NESSE CASO COSTUME, POR MOTIVO DE ECONOMIA, O EMPREGO DE FLANGES PADRONIZADOS. É EVIDENTE QUE UM FLANGE PADRONIZADO PODERÁ ESTAR BASTANTE SUPERDIMENSIONADO PARA AS CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DE SERVIÇO, DEVIDO AOS DEGRAUS DAS CLASSES DE PRESSÃO DA NORMA DE FLANGES.

2.2.2- ESPAÇAMENTO MÁXIMO DOS PARAFUSOS PARA FLANGES DO CASCO E DO CARRETEL

A NORMA TEMA DÁ AS SEGUINTE RECOMENDAÇÕES SOBRE O ESPAÇAMENTO MÁXIMO DOS PARAFUSOS PARA OS FLANGES DO CASCO E DO CARRETEL:

$$B_{max} = 2d_B + \frac{6t}{(m + 0,5)}$$

ENGR. ALEXANDRE MARCHON REDD



ONDE:

B_{max} = ESPAÇAMENTO MÁXIMO ENTRE CENTROS DE PARAFUSOS (POLEGADAS);

d_B = DIÂMETRO NOMINAL DOS PARAFUSOS (POLEGADA);

t = ESPESSURA DO FLANGE (POLEGADAS);

m = FATOR DE JUNTA USADO NO CÁLCULO DO FLANGE, DE ACORDO COM O APÊNDICE 2 DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1.

2.2.3- PROJETO DO FEIXE TUBULAR

A ESPESSURA NECESSÁRIA PARA OS TUBOS DO FEIXE TUBULAR DEVE SER CALCULADA DE ACORDO COM O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, DEVENDO SER OBSERVADO QUE É NECESSÁRIO CALCULAR SEPARADAMENTE PARA A PRESSÃO INTERNA (COM A PRESSÃO DE PROJETO DO LADO DOS TUBOS), E PARA A PRESSÃO EXTERNA (COM A PRESSÃO DE PROJETO DO LADO DO CASCO). O CÁLCULO PARA A PRESSÃO INTERNA E EXTERNA É FEITO COMO SE FOSSE UM CASCO CILÍNDRICO, PELAS FÓRMULAS DO CÓDIGO ASME, NÃO É NECESSÁRIO ACRESCENTAR NENHUMA MARGEM DE CORROSÃO PARA OS TUBOS DO FEIXE TUBULAR.

PARA TUBOS DOBRADOS EM U, A NORMA EXIGE UMA ESPESSURA MAIOR PARA COMPENSAR O ADELGAÇAMENTO DECORRENTE DO PROCESSO DE CURVAMENTO. A ESPESSURA MÍNIMA PARA OS TUBOS, MEDIDA ANTES DO CURVAMENTO, É DADA PELA FÓRMULA:

$$t_0 = t_1 \left(1 + \frac{d}{4R} \right)$$

EM QUE:

t_1 = ESPESSURA MÍNIMA NECESSÁRIA PARA UM TUBO RETO, NAS MESMAS CONDIÇÕES DE MATERIAL, DE PRESSÃO E DE TEMPERATURA;

d = DIÂMETRO EXTERNO DO TUBO;

R = RAIO MÉDIO DE CURVATURA DO TUBO.

2.2.4- CÁLCULO DOS ESPELHOS

A NORMA TEMA FORNECE UM MÉTODO DE CÁLCULO DE ESPELHOS DE TROCADORES DE CALOR, RESUMIDO A SEGUIR, QUE É APLICÁVEL A TODOS OS TROCADORES INCLUÍDOS NO ESCOPO DESSA NORMA, DESDE QUE AS LIGAÇÕES TUBOS-ESPELHOS SEJAM CAPAZES DE SUPOORTAR ADEQUADAMENTE O ESFORÇO DE PRESSÃO SOBRE OS ESPELHOS (LIGAÇÕES MANDRILHADAS E/OU SOLDADAS, POR EXEMPLO), E QUE OS TUBOS SE ENCONTREM UNIFORMEMENTE ESPALHADOS EM PRATICAMENTE TODA SUPERFÍCIE LIVRE DOS ESPELHOS. DEVE SER OBSERVADO QUE O CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII CONTÉM UM PROCEDIMENTO DE CÁLCULO ESPECÍFICO PARA ESPELHOS DE TROCADORES NA PARTE UHX.



AS FÓRMULAS DA TEMA CALCULAM A DENOMINADA “ESPESSURA EFETIVA” DO ESPELHO T. ESSE CÁLCULO É FEITO SEPARADAMENTE PARA OS EFEITOS DE FLEXÃO E DE CISALHAMENTO DEVIDO À PRESSÃO, DEVENDO-SE ADOTAR O MAIOR DOS DOIS VALORES CALCULADOS. PARA OS TROCADORES DA CLASSE R, COM TUBOS MANDRILHADOS, A ESPESSURA EFETIVA DO ESPELHO NÃO PODERÁ SER INFERIOR AO DIÂMETRO EXTERNO DOS TUBOS.

A ESPESSURA NOMINAL t DA CHAPA DO ESPELHO DEVERÁ, POR SUA VEZ, SER NO MÍNIMO O MAIOR VALOR DOS SEGUINTE VALORES:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = T + C_c + C_t \\ t = T + C_c + R_c \end{array} \right.$$

SENDO:

T = ESPESSURA EFETIVA CALCULADA PARA O ESPELHO;

C_c = MARGEM PARA CORROSÃO DO LADO DO CASCO;

C_t = MARGEM PARA CORROSÃO DO LADO DOS TUBOS;

R_c = PROFUNDIDADE DO RASGO PARA ENCAIXE DAS CHICANAS DO CARRETEL. ESSA PROFUNDIDADE COSTUMA SER DE 5 mm.

AS FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DE T , À FLEXÃO E AO CISALHAMENTO, SÃO AS SEGUINTE:

FLEXÃO: $T = \frac{FG}{2} \sqrt{\frac{P}{nS}}$

CISALHAMENTO : $T = \frac{1,24 A}{C \left[1 - \frac{d_o}{b} \right]} \left[\frac{P}{S} \right]$

NESSAS EXPRESSÕES TEMOS:

T = ESPESSURA EFETIVA DO ESPELHO (POL.);

P = PRESSÃO DE PROJETO (PSI), DO LADO DO CASCO OU DO LADO DOS TUBOS;

S = TENSÃO ADMISSÍVEL DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, PARA O MATERIAL DO ESPELHO, EM FUNÇÃO DE CADA UMA DAS TEMPERATURAS DE PROJETO (PSI);

n = VALORES INDICADOS NA TABELA RCB-7.132, DA NORMA TEMA;

C = PERÍMETRO FORMADO PELA LINHA PASSANDO PELOS CENTROS DOS TUBOS MAIS EXTERNOS DO ESPELHO, MEDIDO “EM DEGRAUS” (POL.);

A = ÁREA COMPREENDIDA DENTRO DO PERÍMETRO C (POL.²).

d_o = DIÂMETRO EXTERNO DOS TUBOS DO FEIXE TUBULAR (POL.)

b = DISTÂNCIA DE CENTRO A CENTRO DOS TUBOS (POL.)

F, G = COEFICIENTES NUMÉRICOS QUE TÊM OS SEGUINTE VALORES PARA OS TROCADORES USUAIS, NOS QUAIS OS ESPELHOS APRESENTAM JUNTAS DE VEDAÇÃO DE AMBOS OS LADOS.

- ESPELHO FIXO E FLUTUANTE, PARA TUBOS RETOS: $F = 1,0$

G = DIÂMETRO MÉDIO DA JUNTA DE VEDAÇÃO DO ESPELHO (POL.).

- ESPELHO FIXO PARA TUBOS EM "U" : $F = 1,25$;
 $G =$ DIÂMETRO MÉDIO DA JUNTA DE VEDAÇÃO DO ESPELHO (POL.).

2.2.5- CÁLCULO DA TAMPA DO CARRETEL

DE ACORDO COM A NORMA TEMA, AS TAMPAS PLANAS DOS CARRETÉIS DOS TROCADORES DE CALOR, DEVEM TER A ESPESSURA CALCULADA INDEPENDENTEMENTE PELA FÓRMULA DO CÓDIGO ASME, SEÇÃO VIII, DIVISÃO 1, E POR UMA FÓRMULA ESPECIAL DO TEMA, DEVENDO SER ADOTADA A MAIOR ESPESSURA ENCONTRADA.

A FÓRMULA DO CÓDIGO ASME (PARÁGRAFO UG-34) PARA A ESPESSURA MÍNIMA DE TAMPAS PLANAS FLANGEADAS E APARAFUSADAS É A SEGUINTE:

$$T = d \sqrt{\frac{0,3 P}{S}}$$

ONDE:

$d =$ DIÂMETRO INTERNO DO CARRETEL;
 $P =$ PRESSÃO DE PROJETO;
 $S =$ TENSÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL DA TAMPA.

A FÓRMULA DA NORMA TEMA É A SEGUINTE:

$$T = \sqrt[3]{5,7P \left[\frac{G}{100} \right]^4 + \frac{2hG AB}{\sqrt{dB}} \left[\frac{G}{100} \right]}$$

ONDE:

$T =$ ESPESSURA DA TAMPA (POL.)
 $G =$ DIÂMETRO MÉDIO DA JUNTA DE VEDAÇÃO DA TAMPA (POL.);
 $dB =$ DIÂMETRO NOMINAL DOS PARAFUSOS (POL.);
 $hG =$ DISTÂNCIA RADIAL ENTRE O CÍRCULO MÉDIO DA JUNTA DE VEDAÇÃO E O CÍRCULO MÉDIO DA FURAÇÃO DOS PARAFUSOS (POL.);
 $AB =$ ÁREA TOTAL EFETIVA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS PARAFUSOS (POL.²);
 $P =$ PRESSÃO DO PROJETO (psi).

A ESPESSURA CALCULADA PELO MAIOR VALOR OBTIDO DAS FÓRMULAS ACIMA É O QUE A NORMA TEMA DENOMINA DE "ESPESSURA EFETIVA", A ESPESSURA NOMINAL DA TAMPA t SERÁ OBTIDA, POR SEU TURNO, PELO MAIOR DOS DOIS SEGUINTE VALORES:



$$\left\{ \begin{array}{l} t = T + Ct \\ t = T + Rc \end{array} \right.$$

EM QUE **Ct** É A MARGEM PARA CORROSÃO DO LADO DOS TUBOS, E **Rc** É A PROFUNDIDADE DO RASGO DE ENCAIXE DAS CHICANAS DO CARRETEL, QUE COSTUMA SER DE 5 mm.



3.0 BIBLIOGRAFIA

LIVRO: VASOS DE PRESSÃO
AUTOR: PEDRO CARLOS SILVA TELLES
EDITORA: LTC - 2ª EDIÇÃO ATUALIZADA - 2007.

NORMA PETROBRAS N-466 “PROJETO DE TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO”.