



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CÁLCULO MECÂNICO DE UM TROCADOR DE
CALOR DO TIPO CASCO E TUBO (SHELL AND
TUBE)**

FERNANDA GONÇALVES SANTOS

CRUZ DAS ALMAS, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CÁLCULO MECÂNICO DE UM TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO (SHELL AND TUBE)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como
parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Vânio Vicente Santos de Souza
FERNANDA GONÇALVES SANTOS

CRUZ DAS ALMAS, 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CÁLCULO MECÂNICO DE UM TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBO (SHELL AND TUBE)

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES:

Prof. Msc. Vânio Vicente Santos de Souza	ASS _____
Prof. Cliver da Rocha Silva	ASS _____
Prof. Luccas Barbosa Carneiro	ASS _____

FERNANDA GONÇALVES SANTOS

CRUZ DAS ALMAS, 2019.

RESUMO

Este trabalho consiste em apresentar as principais partes do cálculo mecânico de um trocador de calor (condensador de topo) existente, do tipo casco e tubo. Foi feito um estudo de um caso real onde são detalhados os itens mais importantes referentes ao projeto mecânico. Este equipamento encontra-se em final de vida útil, dessa maneira, foi necessário realizar um novo projeto, com os mesmos dados existente. Assim, os objetivos desse trabalho é apresentar a teoria, realizar o cálculo mecânico utilizando as normas de projeto, e mostrar para a Engenharia Mecânica a sua importância. O trocador de calor (casco e tubo) é formado, basicamente, por um feixe tubular (tubos e espelhos) e casco; onde um dos fluidos circula externamente ao feixe e o outro pelo interior dos tubos, logo, é um equipamento utilizado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas e pressões. Para o desenvolvimento do cálculo foram utilizadas duas principais normas – TEMA e ASME SEÇÃO VIII DIVISÃO 1, sendo que a primeira foi aplicada no feixe tubular. A motivação é mostrar um exemplo aplicativo real realizado com muita frequência aqui no Brasil pelo setor de Engenharia Mecânica de empresas de projetos industriais de engenharia. Assim, o dimensionamento mecânico realizado permite que o permutador trabalhe com os dados de operação, além de, possibilitar a sua fabricação.

Palavras-Chave: trocador de calor; cálculo mecânico; normas de projeto.

ABSTRACT

This work consists of presenting the main parts of the mechanical calculation of heat exchanger (top condenser), of the type shell and tube. A real case study was done detailing the most important aspects of the project. This equipment is at the end of its useful life, in this way, it was necessary to carry out a new project, with the same existing data. Thus, the objectives of this work is to present the theory, to perform the mechanical calculation using the design norms, and to show Mechanical Engineering its importance. The heat exchanger (shell and tube) consists basically of tubes, tubesheet and shell; one of fluids circulates externally to the measure of the interior of the tubes, so it is a possible use of the process of the interval between fluids in different temperatures and pressures. For the development of the calculation two main standards were used - TEMA and ASME SECTION VIII DIVISION 1, the first one was applied in the tubesheet. The motivation is to show a real application example carried out very often here in Brazil by the Mechanical Engineering sector of industrial engineering project companies. Thus, the mechanical design carried out allows the exchanger to work with the operation data, in addition to enabling its manufacture.

Keywords: Heat exchanger; mechanical calculation; standards.

LISTA DE ABREVIATURAS

AGR	Água de resfriamento
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
BWG	Birmingham Wire Gauge (medida de arame de Birmingham)
CET	Comprimento entre tangents
DI	Diâmetro interno
FR	Face com ressalto
FP	Face plana
HC C3's	Hidrocarboneto
Sch.	Schedule
TEMA	<i>Tubular Exchanger Manufacturers Association</i>
VIII	Número 8 escrito em algarismo romano
LWN	Long Neck Welding
WN	Welding-Neck

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trocador de calor duplo-tubo com escoamento paralelo. Fonte: BEJAN, 1996.	21
Figura 2: Trocador de calor casco e tubo com dois passes. Fonte: https://www.slideshare.net/HelderVaz07/trocador-de-calor-65915578 . Acesso em: 14/05/2019, às 18:25.	21
Figura 3: Trocador de calor espiral. Fonte: https://www.ebah.com.br/content/ABAAAebsAF/trocador-calor?part=2 . Acesso em 15/05/2019, às 09:15.	22
Figura 4: Trocador de calor de placas. Fonte: https://www.mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2014/01/Trocadores-de-calor.pdf . Acesso em 15/05/2019, às 09:45.....	22
Figura 5: Posição de instalação dos vasos de pressão: (a) Vertical, (b) Horizontal. Fonte: MACINTYRE (1997). Adaptado.	23
Figura 6: Representação do cabeçote de entrada tipo A. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.	25
Figura 7: Representação do casco tipo E. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.	25
Figura 8: Representação do feixe e cabeçote de retorno tipo M. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.....	26
Figura 9: Trocador de calor casco e tubo em fabricação. Fonte: https://www.incase.com.br/trocador-calor-casco-e-tubo . Acesso em: 28/05/2019, às 10:23. .	28
Figura 10: Componentes básicos do trocador de calor – casco e tubo, do tipo condensador. Fonte: https://www.solucoesindustriais.com.br/lista/trocador-de-calor-duplo-tubo . Acesso em: 28/05/2019, às 14:18.	29
Figura 11: Tipos de tampos (a) Tampo torisférico (b) Tampo semi elíptico. Fonte: http://www.unitampos.com.br/tampos.html . Acesso em: 14/04/2019, às 08:45.....	29
Figura 12: Principais formatos de casco (a) Casco cilíndrico (b) Esférico. Fonte: TELLES (1996). Adaptado.	30
Figura 13: Vista de um feixe tubular (a) Vista lateral; (b) Vista do espelho. Fonte: SABINO (2008).	31
Figura 14: Deformação consequente de uma abertura. Fonte: TELLES (1996).	33
Figura 15: Reforço com anel sobreposto. Fonte: Fonte: TELLES (1996).	33
Figura 16: Utilização do trocador de calor aplicado na Petrobrás. Fonte: REVISTA GRUPO MPE (2009).	34

Figura 17: Croqui de conjunto. Fonte: Desenho do conjunto geral do equipamento (2018). Adaptado.....	38
Figura 18: Croqui do feixe tubular. Fonte: RUBBO, 2014. Adaptado.....	39
Figura 19: Fluxograma do procedimento do cálculo do trocador de calor. Fonte: Autor.	45
Figura 20: Variáveis do cálculo do tempo torisférico 2:1. Fonte: http://www.metaltamos.com.br/produtos . Acesso em: 15/06/2019, às 20:32. Adaptado.	49
Figura 21: Variável do cálculo do tempo plano. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.....	51
Figura 22: Variável do cálculo do casco. Fonte: http://armariodaeq.blogspot.com/2014/10/trocadores-de-calor.html . Acesso em: 15/06/2019, às 20:45. Adaptado.	52
Figura 23: Desenho do bocal C1. Fonte: Desenho de detalhe do casco do trocador de calor. Adaptado.....	55
Figura 24: Desenho do bocal C2. Fonte: Desenho de detalhe do casco do trocador de calor. Adaptado.....	58
Figura 25: Desenho dos bocais T1 e T2. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.....	61
Figura 26: Desenho dos bocais T3 e T4. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.....	64
Figura 27: Desenho da representação dos flanges principais. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.....	68
Figura 28: Desenho do feixe tubular. Fonte: Desenho de detalhe do feixe tubular do trocador de calor. Adaptado.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do trocador de calor.....	40
Tabela 2: Dados de operação.....	40
Tabela 3: Dados de projeto.....	41
Tabela 4: Materiais das principais partes do trocador de calor.	41
Tabela 5: Tensões admissíveis dos materiais	41
Tabela 6: Dados de processo	42
Tabela 7: Pesos do equipamento.	42
Tabela 8: Dados iniciais dos bocais.....	43
Tabela 9: Dados iniciais dos flanges padronizados dos bocais	43
Tabela 10: Dados da junta, estojo e porca padronizados dos flanges dos bocais T3 e T4	43
Tabela 11: Dados dos tubos do feixe.....	44
Tabela 12: Dados de entrada para cálculo do tampo torisférico 2:1	49
Tabela 13: Dados de saída do tampo torisférico 2:1	49
Tabela 14: Dados de entrada para cálculo do tampo plano	52
Tabela 15: Dados de saída do tampo plano	52
Tabela 16: Dados de entrada para cálculo do casco	53
Tabela 17: Dados de saída do casco	53
Tabela 18: Dados de entrada para cálculo do cilindro do cabeçote.....	54
Tabela 19: Dados de saída do cilindro do cabeçote.....	54
Tabela 20: Dados de entrada para cálculo do bocal C1.....	55
Tabela 21: Dados de saída do bocal C1.....	56
Tabela 22: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal C1	56
Tabela 23: Dados de saída do reforço do bocal C1	57
Tabela 24: Dados do flange do bocal C1.....	57
Tabela 25: Dados de entrada para cálculo do bocal C2.....	58
Tabela 26: Dados de saída do bocal C2.....	59
Tabela 27: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal C2	59
Tabela 28: Dados de saída do cilindro do reforço do bocal C2.....	60
Tabela 29: Dados do flange do bocal C2.....	60
Tabela 30: Dados de entrada para cálculo do bocal T1 e T2.....	61
Tabela 31: Dados de saída do bocal T1 e T2.....	62

Tabela 32: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal T1 e T2	62
Tabela 33: Dados de saída do reforço do bocal T1 e T2	63
Tabela 34: Dados dos flanges dos bocais T1 e T2	63
Tabela 35: Dados de entrada para cálculo do bocal T3 e T4.....	64
Tabela 36: Dados de saída do bocal T3 e T4.....	65
Tabela 37: Dados principais dos flanges LWN dos bocais T3 e T4.....	65
Tabela 38: Dados principais dos flanges cego dos bocais T3 e T4	66
Tabela 39: Dados de entrada para o cálculo do tubo.	66
Tabela 40: Dado de saída do tubo submetido à pressão interna.....	67
Tabela 41: Dados de saída do tubo submetido à pressão externa.....	67
Tabela 42: Recomendações dos dados dos flanges principais	68
Tabela 43: Dados de entrada para cálculo do teste hidrostático.....	69
Tabela 44: Dados de saída da pressão do teste hidrostático	69
Tabela 45: Dados de entrada para cálculo do espelho fixo	70
Tabela 46: Dados de saída do espelho fixo	71

LISTA DE SIGLAS

\emptyset	Representação do diâmetro
°	Representação de Ângulo
kgf	Quilograma força
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro ao quadrado
cm ²	Centímetro ao quadrado
°C	Celsius
Gr.	Grau
in	Polegada
T	Temperatura
S	Tensão admissível em dada temperatura do material
S_{amb}	Tensão admissível em temperatura ambiente do material
%	Representação de percentagem
ρ	Densidade do líquido
D	Diâmetro
DN	Diâmetro nominal
P	Pressão
P_p	Pressão de projeto
T_p	Temperatura de projeto
ϵ	Eficiência das juntas soldadas
C	Corrosão interna admissível
P_h	Pressão hidrostática
R	Raio
h	Altura do tampo
M	Fator do tampo torisférico 2:1
S_{real}	Tensão real corroída
PMTA	Pressão máxima de trabalho admissível
$PMTA_c$	Pressão máxima de trabalho admissível corroído
G'	Diâmetro da gaxeta
W	Aperto do parafuso
h_g	Braço do momento da gaxeta

t_r	Espessura requerida
t_{rn}	Espessura mínima da parede do bocal corroído
t_n	Espessura nominal da parede do tubo
t_r	Espessura mínima do casco/tampo
t_e	Espessura do anel de reforço
t	Espessura nominal do casco/tampo
d	Diâmetro do bocal
A_1	Área requerida
A_2	Área disponível no casco/tampo
A_3	Área disponível da projeção externa do bocal
A_4	Área disponível pelo anel de reforço
e_t	Espessura da parede do tubo
c_{att}	Tolerância à corrosão do tubo
L	Comprimento do tubo reto
P_a	Pressão máxima externa
$P_{th,t}$	Pressão do teste hidrostático (lado do tubo)
$P_{th,c}$	Pressão do teste hidrostático (lado do casco)
P_e	Pressão externa efetiva
P_i	Pressão interna efetiva
F	Fator de suporte
n	Função do arranjo dos tubos
t_{rc}	Espessura requerida do espelho (pressão do casco)
t_{rt}	Espessura requerida do espelho (pressão do tudo)
ps	Passo do tubo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos	17
1.2. Justificativa	17
1.3. Estrutura do trabalho	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1. Trocadores de calor	19
2.1.1. Definição	19
2.1.2. Classificação quanto aos processos de transferências	19
2.1.3. Classificação quanto à aplicação no processo.....	19
2.1.4. Classificação quanto à construção.....	20
2.1.5. Vasos de pressão (Casco).....	22
2.1.5.1. Conceitos.....	22
2.1.5.2. Classes e finalidades	22
2.1.5.3. Posição.....	23
2.2. Normas de projeto.....	24
2.2.1. TEMA	24
2.2.1.1. Classes dos trocadores de calor	24
2.2.1.2. Configuração de corpo e feixe tubular.....	24
2.2.2. ASME	26
2.2.2.1. ASME Seção VIII.....	27
2.3. Trocadores de calor Casco e Tubo	27
2.3.1. Componentes	29
2.3.1.1. Tampos	29
2.3.1.2. Casco	30
2.3.1.3. Cabeçote.....	30
2.3.1.4. Feixe tubular	31
2.3.1.5. Bocais e chapas de reforço.....	31
2.3.1.6. Flanges.....	33

2.4. Aplicação na indústria (casco e tubo)	33
2.5. Projeto de um trocador de calor	34
2.6. Definições de termos importantes	35
2.6.1. Pressão e temperatura de operação	35
2.6.2. Pressão e Temperatura de Projeto	35
2.6.3. Pressão máxima de trabalho admissível	36
2.6.4. Pressão de Teste Hidrostático	36
3. ESTUDO DE CASO	37
3.1. Descrição do problema	37
4. METODOLOGIA	40
4.1. Características do trocador de calor	40
4.2. Dados de operação	40
4.3. Dados de projeto	40
4.4. Dados do processo	42
4.5. Procedimento para o cálculo mecânico	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1. Tampo torisférico 2:1	49
5.2. Tampo plano	51
5.3. Casco	52
5.4. Cilindro do cabeçote	54
5.5. Bocal C1	55
5.5.1. Anel de reforço	56
5.5.2. Flange	57
5.6. Bocal C2	58
5.6.1. Anel de reforço	59
5.6.2. Flange	60
5.7. Bocais T1 e T2	61
5.7.1. Anel de reforço	62
5.7.2. Flanges	63
5.8. Bocais T3 e T4	64
5.8.1. Anel de reforço	65
5.8.2. Flanges	65
5.9. Tubos	66

5.10. Flanges principais.....	68
5.11. Pressão do teste hidrostático	69
5.12. Espelho	70
6. CONCLUSÃO	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
8. ANEXOS	76
ANEXO A: CLASSIFICAÇÃO TEMA DAS FORMAS CONSTRUTIVAS DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO.....	76
ANEXO B: DESENHO DIMENSIONAL DO TROCADOR DE CALOR	77
ANEXO C: DESENHO DE DETALHES DO FEIXE TUBULAR DO TROCADOR DE CALOR.....	78
ANEXO D: CATÁLOGO CONFORJA – FLANGE 150lb	79
ANEXO E: CATÁLOGO CONFORJA – FLANGE 300lb	80
ANEXO F: CATÁLOGO HYDRAULIC & OFFSHORE SUPPLIES – FLANGE 150lb ..	81
ANEXO G: ANÉIS DE REFORÇO DO BOCAL	82
ANEXO H: DIÂMETRO EXTERNO E ESPESSURA DA PAREDE DO TUBO	83
ANEXO I: ESPESSURA PADRÕES DE CHAPAS COMERCIALIZADAS	83
ANEXO J: TABELA GEOMÉTRICA (FATOR A) PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DOS TUBOS A PRESSÃO EXTERNA.....	84
ANEXO K: TABELA GEOMÉTRICA (FATOR B) PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DOS TUBOS A PRESSÃO EXTERNA.....	85
ANEXO L: FIGURA DO FATOR DE SUPORTE PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DO ESPELHO	86

1. INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são equipamentos não sujeitos a chama, típicos da área de Engenharia, encontrados em diversas indústrias, sendo utilizados em inúmeras áreas – petroquímica, farmacêuticas, alimentícia, etc – e em muitas aplicações – aquecimento de ambiente, refrigeração, produção de potência, condicionamento de ar, processamento químico e alimentício, eletrônicos, indústria de manufatura, na recuperação de calor em processos, entre outros.

Este equipamento permite que dois fluidos a diferentes temperaturas troquem calor por meio de uma superfície metálica (contato indireto), sendo capaz também de ocorrer mudança de fase dos fluidos. Isso ocorre para satisfazer condições de dados de processo (BRAGA FILHO, 2004).

Em relação à construção, o trocador de calor pode ser classificado em duplo tubo, casco e tubo, e compactos. O mais comum empregados em processos industriais é o tipo casco e tubo, que tem como vantagem a flexibilidade operacional e a facilidade de manutenção. O trocador de calor casco e tubo contém, principalmente, um casco cilíndrico e tubos no seu interior, esses tubos são presos por espelhos. O conjunto de tubos e espelhos é chamado de feixe tubular. Além de possuir outros componentes, como: cabeçotes de entrada e saída, bocais, suportes, etc.

Os trocadores de calor de casco e tubos constituem cerca de 60% de todos os trocadores de calor empregados nos processos industriais, já que podem ser projetados para operar em diferentes escalas de pressão e temperatura em inúmeras aplicações (HEWITT et al, 1993).

A construção destes equipamentos é regida por diversas normas e códigos para garantir a segurança do ambiente. A norma ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) foi criada para padronizar o projeto dando uma maior garantia e proteção, além de ser o primeiro código americano para vasos de pressão, criado em 1925, intitulado “Rules for construction of pressure vessels” section VIII, 1925 Edition (FALCÃO, 2008). A norma TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*), é utilizada para trocadores de calor do tipo casco e tubo, e cita que o projeto dos componentes de trocadores de calor deve ser orientado pelos requisitos do código ASME VIII, divisão 1.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Apresentar o cálculo mecânico de um trocador de calor (condensador de topo) existente em uma planta industrial.

1.1.2. Objetivos específicos

- Mostrar pontos principais da teoria sobre trocadores de calor;
- Realizar o cálculo mecânico de acordo com a ASME e somente a parte do Feixe Tubular através da TEMA;
- Enfatizar para a Engenharia Mecânica a importância do cálculo mecânico de um equipamento industrial, conforme as normas de projeto.

1.2. Justificativa

Os trocadores de calor são assuntos bastante abordados no curso de Engenharia Mecânica, já que se estudam as partes que envolvem o projeto (dados de projeto, funcionamento, análise térmica e mecânica, fabricação, operação, inspeção e manutenção).

O trocador de calor mais utilizado nas indústrias é o do tipo casco e tubo, dessa maneira, é de extrema importância o seu conhecimento e um trabalho que utilize as normas adequadas.

Em alguns casos, podem-se encontrar equipamentos que estão sendo operados sem terem sido analisados mecanicamente. Assim, as grandes indústrias vêm buscando sempre enquadrar as normas regulamentadoras e aumentar a confiabilidade de sua planta industrial.

Diante dessa exigência de mercado, surge a necessidade de demonstrar o método do cálculo mecânico de equipamentos submetidos à pressão e dar suporte para melhor se entender sobre trocador de calor.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho se divide em 8 seções.

A seção 1 apresenta as informações introdutórias necessárias para a compreensão deste trabalho. São apresentados os objetivos, as justificativas para o estudo, e, por fim, a estrutura desta dissertação.

A seção 2 conta com o referencial teórico sobre trocadores de calor. Parte-se do seu conceito, tendo os seus conteúdos essenciais apresentados de forma objetiva e sucinta.

A seção 3 apresenta o estudo de caso, expondo as informações necessárias para poder desenvolver o trabalho.

A seção 4 indica a metodologia utilizada, desta maneira, mostra os dados básicos para a realização dos cálculos, assim como são relacionados os critérios de projeto obtidos do código das normas selecionados para o desenvolvimento do estudo.

A seção 5 apresenta todos os resultados gerados, mostrando sempre os dados de entrada e os dados de saída de cada componente.

A seção 6 é desenvolvida a conclusão geral e são feitas considerações sobre futuros trabalhos acadêmicos, que poderão complementar ou aprofundar o escopo deste trabalho.

A seção 7 mostra as referências bibliográficas utilizadas para a realização do estudo.

A seção 8 apresenta os anexos necessários para a complementação do trabalho desenvolvido.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Trocadores de calor

2.1.1. Definição

Os trocadores de calor podem ser definidos segundo Telles (1996, p. 5), “o trocador de calor é um nome genérico para designar uma grande variedade de equipamentos destinados a efetuar trocas de calor entre dois fluidos” (entre gases, entre líquidos, ou entre ambos).

Já conforme Incropera e De Witt (2008, p. 425) “Trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção”.

2.1.2. Classificação quanto aos processos de transferências

Podem ser classificados como contato direto ou contato indireto.

No contato direto os dois fluidos se misturam, além de que, sua finalidade abrange a transferência de massa e a transferência de calor e sua construção é relativamente barata (BRAGA FILHO, 2004).

No contato indireto existe uma parede que separa o fluxo contínuo de calor do fluido quente ao frio, dessa maneira, não tem a mistura dos fluidos. Assim, o calor é transferido através dessa parede (BRAGA FILHO, 2004).

2.1.3. Classificação quanto à aplicação no processo

Os trocadores de calor são designados por termos correspondentes às modificações que realizam nas condições de temperatura ou estado físico do fluido de processo. Assim, de acordo com o fim a que se remete, pode ser classificado, de acordo com Ghizze (1989), em:

- Trocadores para aquecimento
 - I. Aquecedor (heater) – aquece o fluido de processo através de vapor d’água ou fluido térmico;
 - II. Refervedor (reboiler) – vaporiza um líquido por meio de vapor d’água ou outro fluido em elevada temperatura. Fornece calor a torres de destilação, vaporizando parte do produto do fundo da torre;
 - III. Gerador de vapor (steam generator) aplica-se ao vaporizador que gera vapor d’água, aproveitando calor excedente de um fluido de processo.

- Trocadores para resfriamento
 - I. Resfriador (cooler) – resfria um líquido ou gás por meio de água, ar ou salmoura;
 - II. Condensador (condenser) – retira calor de um vapor até a sua condensação parcial ou total, podendo inclusive sub-resfriar um líquido condensado. O termo condensador de superfície aplica-se ao condensador de vapor exausto de turbinas e máquinas de ciclos térmicos;
 - III. Caixa resfriadora (cooler box) – resfria um líquido de processo passando em uma serpentina no interior de um reservatório de água.

- Intercambiadores
 - I. Recuperador – o fluido quente passa no interior de um ou mais tubos, e através de suas paredes, cede calor sensível, de forma contínua, a um fluido frio que se encontra ao redor dos tubos;
 - II. Regenerador – Opera através de estágios. Assim, é utilizado no aquecimento de ar ou outros gases. O gás quente cede calor ao material refratário de uma câmara, aquecendo-a até que a temperatura de ambos se torne quase igual. Interrompe-se então o fluxo do gás quente e faz-se penetrar o ar frio que se quer aquecer. Este recebe calor das superfícies aquecidas e escoar até que a temperatura tenha baixado a um nível prefixado. Recomeça-se o ciclo, interrompendo-se a entrada do ar a ser aquecido, e deixando-se penetrar o ar (gás) quente como no início da operação.

2.1.4. Classificação quanto à construção

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com o seu tipo de construção, sendo eles:

- I. Trocador duplo tubo – como pode ser visto na figura 1, é formado por dois tubos concêntricos, normalmente com trechos retos e com conexões nas extremidades de cada tubo para transferir os fluidos de uma seção reta para outra. Assim, um fluido escoar pelo tubo interno e outro, pelo espaço anular, a troca de calor ocorre através da parede do tubo interno. Suas vantagens são: facilidade de construção e de montagem, ampliação de área, facilidade de manutenção e de acesso para limpeza (BEJAN, 1996).

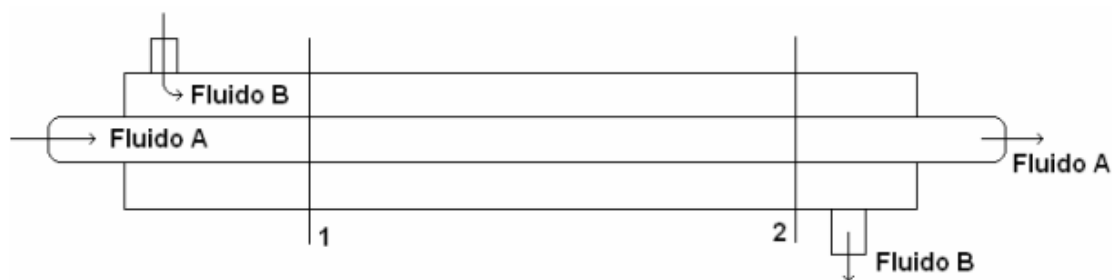


Figura 1: Trocador de calor duplo-tubo com escoamento paralelo. Fonte: BEJAN, 1996.

- II. Trocador de calor casco e tubo - Equipamentos constituídos basicamente por um feixe de tubos envolvidos por um casco visto na figura 2, normalmente cilíndrico, circulando um dos fluidos externamente ao feixe e o outro pelo interior dos tubos (GHIZZE, 1989).

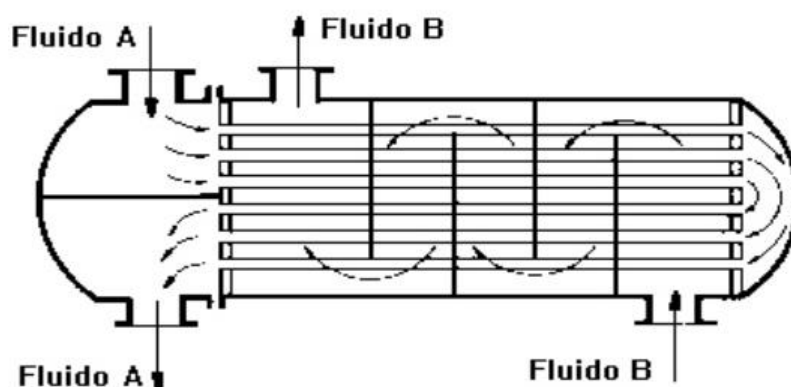


Figura 2: Trocador de calor casco e tubo com dois passes. Fonte: <https://www.slideshare.net/HelderVaz07/trocador-de-calor-65915578>. Acesso em: 14/05/2019, às 18:25.

- III. Trocadores de calor compactos: possuem grande razão entre área de transferência de calor e volume do trocador. Os trocadores de espiral e placa, apresentado nas figuras 3 e 4, respectivamente; trocadores com tubos aletados, resfriadores a ar e variações do trocador casco e tubo (alta taxa de transferência de calor devido à turbulência), são alguns exemplos (BEJAN, 1996).

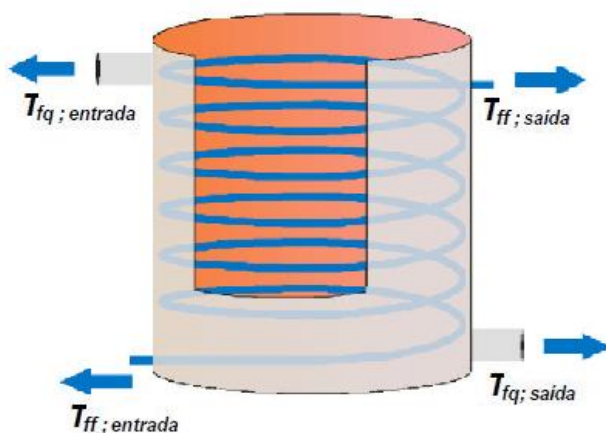


Figura 3: Trocador de calor espiral. Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAebsAF/trocador-calor?part=2>. Acesso em 15/05/2019, às 09:15.

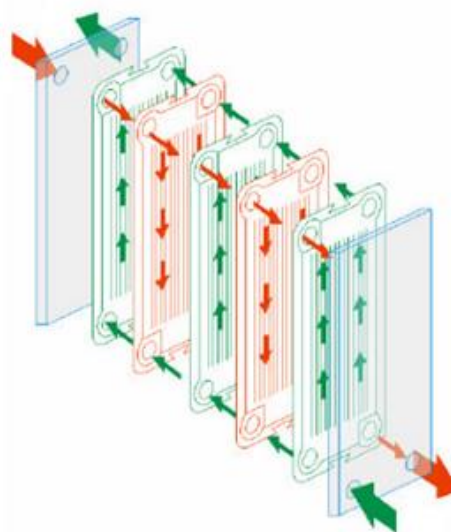


Figura 4: Trocador de calor de placas. Fonte: <https://www.mundomecanico.com.br/wp-content/uploads/2014/01/Trocadores-de-calor.pdf>. Acesso em 15/05/2019, às 09:45.

2.1.5. Vasos de pressão (Casco)

2.1.5.1. Conceitos

Genericamente, o nome vaso de pressão é dado a todos os recipientes estanques, de qualquer tipo, dimensões, formato ou finalidade, capazes de conter um fluido pressurizado, ou sujeito a vácuo total ou parcial. 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 (TELLES, 1996).

Segundo MACINTYRE (1997, p. 176), “vasos de pressão são reservatórios herméticos, submetidos a uma pressão interna superior à pressão externa, a qual, na maioria dos casos, é a pressão atmosférica”.

2.1.5.2. Classes e finalidades

De acordo com TELLES (1996, p. 2), os vasos de pressão são classificados em:

- a) 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: (Trocadores propriamente ditos, Aquecedores, Resfriadores, Condensadores, Refervedores e Resfriadores a ar).

b) Vasos sujeitos a chama:

- Caldeiras;
- Fornos.

Assim, os vasos não sujeitos a chama são utilizados, de forma geral, em: armazenagem de gases sob pressão, processamento de gases e líquidos, ou, acumulação intermediária de gases e líquidos em processos industriais.

2.1.5.3. Posição

Essencialmente, a parede de pressão de um vaso consiste do casco do vaso e dos tampos de fechamento (TELLES, 1996).

A construção da posição de instalação dos vasos de pressão pode ser: verticais, horizontais ou inclinados, podendo ser observado na figura 5. Na instalação vertical o suporte é realizado por “pernas” de perfis de aço soldadas ao corpo do tanque, já na instalação horizontal utilizam-se apoios ou selas de chapa de aço, apoiados em suportes de perfis metálicos (MACINTYRE, 1997).

Essencialmente, a parede de pressão de um vaso consiste do casco do vaso e dos tampos de fechamento (TELLES, 1996).

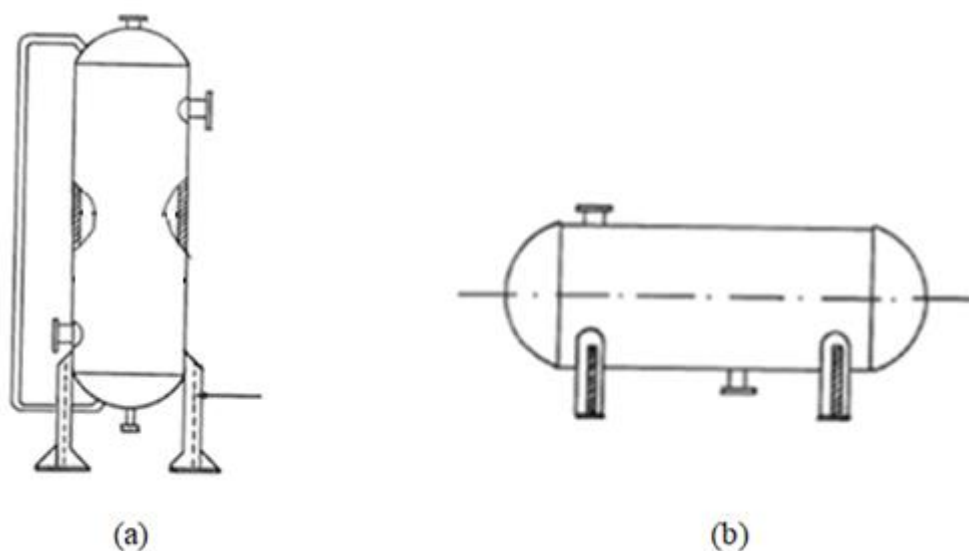


Figura 5: Posição de instalação dos vasos de pressão: (a) Vertical, (b) Horizontal. Fonte: MACINTYRE (1997). Adaptado.

2.2. Normas de projeto

2.2.1. TEMA

A TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) (9th Ed - 2007) possui uma norma que contém condições e recomendações para o projeto, seleção de materiais, testes, instalação e operação de trocadores de calor. Assim, a TEMA engloba tanto o projeto mecânico como o projeto térmico. Além de que, esta norma não exclui, e sim, complementa o código ASME, Seção VIII, Divisão 1, para vasos de pressão; com a finalidade de complementar requisitos peculiares dos trocadores de calor (TELLES, 1996).

A norma refere-se aos trocadores de calor, exclusivamente, de classificação casco e feixe tubular, que possua os seguintes requisitos:

- a) Diâmetro interno do casco até 100 in (2540mm);
- b) Pressão de projeto (do casco ou dos tubos) até 3 psi (20684 kPa);
- c) Produto do diâmetro interno do casco (ou do carretel), em polegadas, pela pressão de projeto (do casco ou dos tubos), em psi, em até 100.000.

Ou seja, o intuito destes requisitos é limitar a espessura máxima da parede do casco para aproximadamente 3 in (76 mm).

2.2.1.1. Classes dos trocadores de calor

A TEMA possui três classes que especificam os permutadores, são elas a classe R, C e B.

- I. Classe R: Para condições severas de processamento de petróleo e produtos químicos, serviços rigorosos, em que se deseja obter segurança e durabilidade.
- II. Classe C: Para condições moderadas de operação, tendo em vista a máxima economia e o mínimo tamanho, condizentes com as necessidades de serviço.
- III. Classe B: Para condições severas de temperatura e fluidos altamente corrosivos, ou seja, serviços de processamento químico.

2.2.1.2. Configuração de corpo e feixe tubular

Para este trabalho a ser realizado a configuração de corpo e feixe tubular do trocador de calor é do tipo AEM, que será abordado cada um nas figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

A TEMA atribuiu uma classificação alfabética correspondente às partes e formas construtivas, onde pode ser visto no ANEXO A. Ou seja, os trocadores de calor casco e tubo são identificados através de três letras que correspondem às seguintes partes: tipo de cabeçote estacionário (A, B, C, N, D), tipo de casco (E, F, H, J, K, X) e tipos de cabeçotes de retorno (L, M, N, P, S, T, U, W).

- Cabeçote de entrada - tipo A (Carretel com tampo removível)

Esse tipo de cabeçote pode ser utilizado em trocadores que possuam espelhos fixos, tubos em U e feixe de tubos removíveis. O carretel e o flange são removíveis. Além de permitir a limpeza dos tubos sem precisar remover as tubulações ligadas ao permutador. A figura 6 representa este modelo.

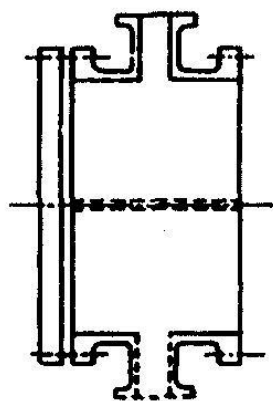


Figura 6: Representação do cabeçote de entrada tipo A. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.

- Casco – tipo E (Um passe no casco)

Como pode ser vista na figura 7, o arranjo do escoamento no corpo (casco) ocorre com uma única passagem. É o casco mais usual, com uma entrada e uma saída em extremidades opostas.

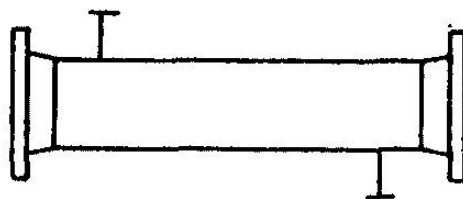


Figura 7: Representação do casco tipo E. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.

- Feixe e cabeçote de retorno – tipo M (Espelho fixo)

Esta identificação é observada na figura 8, assim, os espelhos fixos possuem uma construção simples, é utilizado quando o fluido do lado do casco é limpo e não corrosivo.

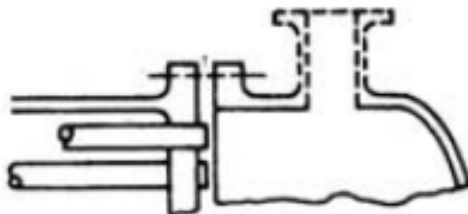


Figura 8: Representação do feixe e cabeçote de retorno tipo M. Fonte: TEMA (2007). Adaptado.

2.2.2. ASME

O primeiro código americano referente a vasos de pressão (casco) foi construído pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) em 1925, intitulado “Rules for construction of pressure vessels” section VIII, 1925 Edition (FALCÃO, 2008).

A ASME é dividida em seções, sendo elas:

- Seção I – Código para Construção de Caldeiras;
- Seção II – Especificação de Materiais;
- Seção III – Regras para construção de Componentes Nucleares;
- Seção IV – Regras para construção de Caldeiras; heating boiler (caldeira de calefação);
- Seção V – Ensaio Não-Destrutivo;
- Seção VI – Regras recomendadas para manutenção e operação de caldeiras;
- Seção VII – Regras recomendadas para manutenção e operação de caldeiras;
- Seção VIII – Regras para construção de vasos de pressão;
- Seção IX – Qualificações de Soldagem e Brasagem;
- Seção X – Código de Vasos de Pressão e Caldeiras – Fibras – Vasos de Pressão com reforço plástico;
- Seção XI – Regras para Inspeção de Plantas e Componentes Nucleares;
- Seção XII – Regras para construção de Tanques Transportáveis.

2.2.2.1. ASME Seção VIII

A norma ASME seção VIII possui três divisões, abaixo serão citadas cada uma delas:

- Divisão 1: Regras para construção de vasos de pressão

Esta norma apresenta regras apenas para dimensionamentos dos componentes principais (casco, tampos, reduções, flanges, bocais e reforços) sujeitos a pressão interna ou externa (TELLES, 1996). Nesta divisão limita-se a pressão interna com no máximo 20685 kPa e no mínimo 103 kPa, ou pressão externa máxima de 103 kPa. Como critério de projeto utiliza-se a teoria da máxima tensão de ruptura.

- Divisão 2: Regras para construção de vasos de pressão – Regras alternativas

Esta divisão foi criada como alternativa à divisão 1, com o intuito de adotar critérios e detalhes de projeto, fabricação, exames e testes mais precisos e tensões admissíveis superiores, sem limitar a pressão de projeto (FALCÃO, 2008). Nela utiliza-se como critério de projeto a teoria da máxima tensão de cisalhamento – critério de Tresca.

Dessa maneira, permite tensões maiores do que as da divisão 1, com menores espessuras e menor peso para o vaso. Quando os vasos são utilizados em: serviços cíclicos (sujeito à análise de fadiga), ou para vasos de construção especial ou vasos para serviços muito severos (fluidos altamente tóxicos, por exemplo) é obrigatório a utilização da divisão 2 (TELLES, 1996).

- Divisão 3: Regras para construção de vasos de pressão – Regras alternativas para vasos de alta pressão

A divisão 3 da ASME é utilizada para equipamentos que serão operados com alta pressão, em geral acima de 68995 kPa. Porém, aplica-se para pressões inferiores e não limita a aplicabilidade, em função da pressão, das divisões 1 e 2. Como critério de projeto utiliza-se a teoria da máxima tensão de cisalhamento, a classificação e análise de tensões e avaliação de fadiga (o mais importante) (FALCÃO, 2008).

2.3. Trocadores de calor Casco e Tubo

O trocador de calor casco e tubo, podendo também ser chamado de multi-tubulares, possui elementos, os quais aprimoram as trocas térmicas, tornando um equipamento essencial nas indústrias para alguns serviços mais exigentes (CARDOSO, 2013).

A norma TEMA, utilizada somente para trocador de calor – casco e tubo, já possui um sistema de classificação para estes trocadores a qual prevê, de acordo com o processo e tipo de fluidos, tipos de cabeçotes, dispositivos e cascos ideais para cada situação (CARDOSO, 2013).

Segundo Ribeiro (1984, p. 1):

O trocador de calor casco e tubo é o tipo de trocador mais amplamente usado, devido à sua construção resistente, à flexibilidade de projeto e de adaptação às condições de processo, tais como condensação, vaporização e troca de calor sem mudança de fase, posicionamento na horizontal ou vertical, ampla faixa de pressão e operação (desde o vácuo até os altos valores de pressão) e ampla faixa da variação da perda de carga permitida.

A figura 9 mostra um trocador de calor real já no final da fabricação, dessa maneira, pode ser observada já sua estrutura externa.



Figura 9: Trocador de calor casco e tubo em fabricação. Fonte: <https://www.incase.com.br/trocador-calor-casco-e-tubo>. Acesso em: 28/05/2019, às 10:23.

2.3.1. Componentes

Os componentes básicos de um trocador de calor – casco e tubo são: feixe tubular, casco, cabeçotes (entrada e saída) e tampo (ROSA, 2009). A figura 10 apresenta um trocador de calor casco e tubo, do tipo condensador, onde podem ser observados os principais componentes.

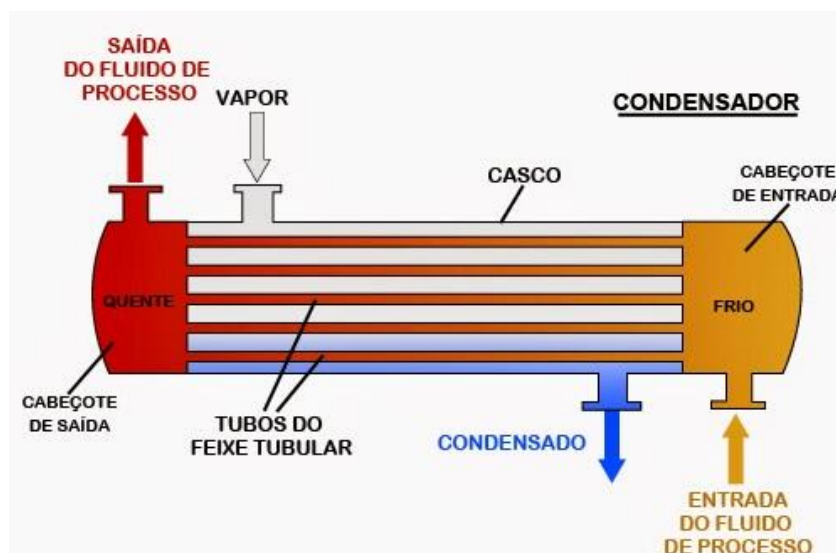


Figura 10: Componentes básicos do trocador de calor – casco e tubo, do tipo condensador. Fonte: <https://www.solucoesindustriais.com.br/lista/trocador-de-calor-duplo-tubo>. Acesso em: 28/05/2019, às 14:18.

2.3.1.1. Tampos

Os tampos são peças que tem como finalidade fechar os cascos cilíndricos dos vasos de pressão. Além de que, existem diversos formatos para os tampos, como por exemplo: elíptico, toriesférico, hemisférico, cônico e plano. A figura 11 apresenta dois desses tipos de tampos, sendo as principais dimensões o D (diâmetro ou altura do líquido), R (raio de abaulamento interno), r (raio de rebordamento interno), e (espessura do tampo) e h (altura do tampo).

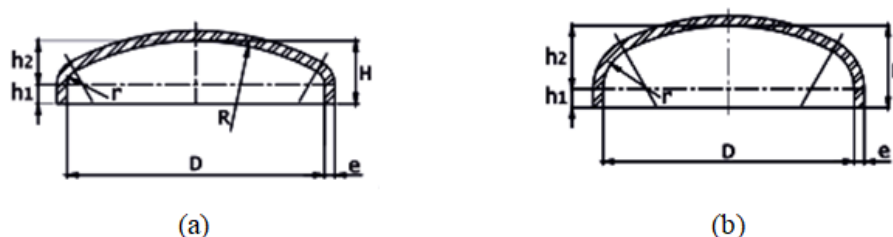


Figura 11: Tipos de tampos (a) Tampo torisférico (b) Tampo semi elíptico. Fonte: <http://www.unitampos.com.br/tampos.html>. Acesso em: 14/04/2019, às 08:45.

2.3.1.2. Casco

O casco dos vasos de pressão possui o modelo de uma superfície de revolução. Praticamente todos os cascos têm três formas básicas: cilíndrica, cônica e esférica, ou combinações dessas formas, a figura 12 apresenta o casco cilindro (a) e esférico (b).

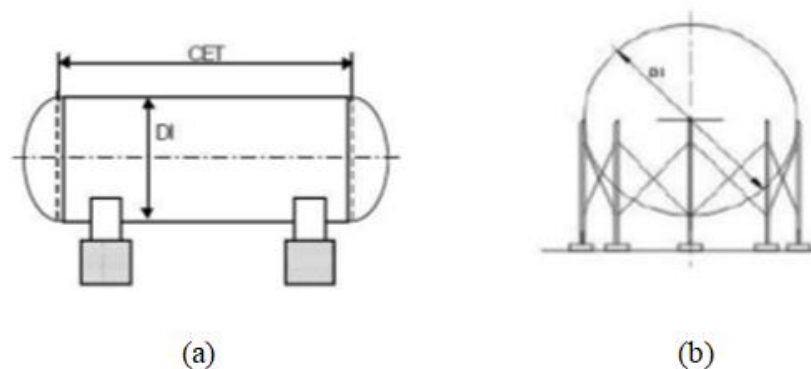


Figura 12: Principais formatos de casco (a) Casco cilíndrico (b) Esférico. Fonte: TELLES (1996). Adaptado.

Na figura 12 também pode ser observado duas dimensões importantes para a caracterização do vaso de pressão, de acordo com a Norma ASME (2017) e Norma N-253 PETROBRAS (2004), sendo eles o diâmetro interno (DI) e o comprimento entre tangentes (CET). O diâmetro interno é medido pela face interna da parede do vaso, além de ser aplicado em qualquer formato do vaso. O comprimento entre tangentes é o comprimento total do corpo cilíndrico, ou a soma dos comprimentos dos corpos cilíndricos e cônicos sucessivos; diferente do DI ele só é aplicado em vasos com corpos cilíndricos ou cilíndricos compostos (TELLES, 1996).

2.3.1.3. Cabeçote

Os cabeçotes têm como função receber e distribuir o fluido que passa pelo feixe tubular (GHIZZE, 1989).

Existe o cabeçote estacionário e o cabeçote de retorno, onde ambos são caracterizados de acordo com a norma TEMA.

2.3.1.4. Feixe tubular

O feixe tubular visto na figura 13 é formado por um conjunto de tubos fixados em suas pontas em espelhos.



(a)



(b)

Figura 13: Vista de um feixe tubular (a) Vista lateral; (b) Vista do espelho. Fonte: SABINO (2008).

Os tubos são essenciais nos trocadores de calor, pois são eles que determinam a troca térmica. É o componente que está mais submetido à corrosão. As dimensões mais utilizadas são $\frac{3}{4}$ " e 1" (BEJAN, 1996).

Os espelhos são suporte para os tubos, assim, o espelho é uma placa de metal perfurada onde são encaixados e fixados os tubos, ou seja, a cada furo corresponde a um tubo do feixe. Esse processo ocorre através de mandrilagem ou de solda (usado que não se deseja vazamento) (BEJAN, 1996).

2.3.1.5. Bocais e chapas de reforço

Os bocais são importantes para o funcionamento de um trocador de calor, já que com sua presença o equipamento consegue executar suas funções e operar com segurança (NICOLA & NETO VIEIRA, 2012).

Assim, suas funções são:

- Entrada e saída do fluido de trabalho;
- Instalação de válvulas de segurança;
- Instalação de instrumentos, drenos e respiros;
- Inspeção do vaso de pressão;
- Ligações com outros corpos do próprio vaso de pressão;
- Ligação direta com outros vasos de pressão;
- Manutenção das partes internas do vaso.

O bocal de dreno tem como finalidade possibilitar a limpeza interna dos equipamentos. São tubos de pequenos comprimentos e flanges (TOMAZINI, 2014). Segundo ASME, os furos de dreno devem ter no mínimo $\frac{1}{4}$ " (6mm) localizado a 180° do respiro.

A abertura na parede do trocador de calor é sempre um ponto fraco, pois a pressão interna tende a causar uma deformação local na parede do equipamento, e também, gerar concentrações de tensões nas bordas da abertura, já que apresenta uma descontinuidade geométrica consequente da abertura (NICOLA & NETO VIEIRA, 2012). A figura 14 exhibe a relação de uma posição não deformada, ou seja, sem a presença do reforço.

Dessa maneira, de acordo com a ASME, Seção VIII, Divisão 1, é obrigatório a utilização das chapas de reforço para abertura de diâmetro nominal $3\frac{1}{2}$ " ou maior. Porém, é importante ressaltar que o reforço não pode ser nem muito volumoso e nem muito rígido, uma vez que isso impossibilita a deformação natural do equipamento devido à pressão ou à concentração das soldas, tendo então, maiores concentrações de tensões no local (NICOLA & NETO VIEIRA, 2012). A figura 15 representa um exemplo comum de reforço, onde ele está sobreposto ao casco e é fixado através de soldas em ângulos, ou seja, soldas de filete.



Figura 14: Deformação consequente de uma abertura.
Fonte: TELLES (1996).

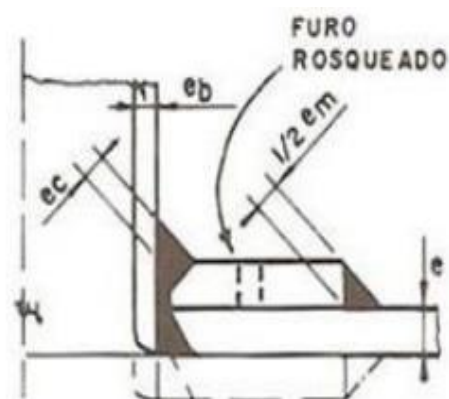


Figura 15: Reforço com anel sobreposto. Fonte:
Fonte: TELLES (1996).

2.3.1.6. Flanges

Os flanges são elementos de suma importância para permitir a desmontagem dos trocadores de calor, e também, em conexões entre equipamentos e tubulações. Existe uma série de padronização onde pode ser buscado de acordo com o diâmetro, logo, até 24'' pode-se utilizar a ASME B.16.5. Entre 24'' a 60'' aplica-se a ASME B.16.47.

Para os flanges ligados aos bocais do equipamento, na maioria das vezes, é possível utilizar o padrão de acordo com a ASME B.16.5. Mas, para os flanges principais do trocador de calor – casco e cabeçotes – é necessário projetar os flanges individualmente para atender as condições específicas do projeto, devido à complexidade de encontrar flanges padronizados com diâmetro grande.

2.4. Aplicação na indústria (casco e tubo)

Os trocadores de calor possuem uma vasta aplicação nas indústrias, sendo de suma importância para processos que envolvam aquecimento e resfriamento de fluidos (CARDOSO, 2013). Logo, pode ser observado em diversos ramos de indústrias como na química, petroquímica, farmacêutico, alimentício, siderúrgico, minerador, energético e de papel e celulose. Sendo utilizado também, para geração de energia e de vapor em usinas de produção de açúcar e indústrias de biocombustíveis (INCASE).

Exemplo de aplicação é na refinaria de petróleo, onde os equipamentos são instalados em várias localizações com o intuito de aquecer ou resfriar correntes dos processos de refino (CARDOSO, 2013). Outro exemplo é no sistema de refrigeração, onde o objetivo é vaporizar o refrigerante para retirar calor de um ambiente e/ou processo, então o refrigerante deve ser

condensado e retornar ao evaporador. E também os condensadores são usados em processos nas indústrias químicas e nos processos envolvidos na geração de energia (RUBBO, 2014)

Em grandes processos industriais existe um grande desperdício de energia ou uma corrente de calor que está sendo extraídos, assim os permutadores servem para recuperar este calor e colocá-lo em uso pelo aquecimento de outra fase no processo, gerando uma economia financeiramente (CARDOSO, 2013).

Assim, os trocadores de calor possuem uma área enorme de aplicação, pois são equipamentos com alta resistência mecânica. A figura16 exhibe um exemplo de um permutador de calor sendo aplicado na Petrobrás, em uma refinaria de Duque de Caxias– REDUC, no Rio de Janeiro.



Figura 16: Utilização do trocador de calor aplicado na Petrobrás. Fonte: REVISTA GRUPO MPE (2009).

2.5. Projeto de um trocador de calor

De acordo com Mattjie e Ristof (2013), o projeto completo de um trocador de calor pode ser separado em três etapas:

- I. Análise Térmica – seu princípio é com a determinação da área necessária à transferência de calor para dadas condições de temperaturas e escoamentos dos

fluidos. E é o primeiro passo do projeto que visa garantir a troca térmica mais eficiente possível dentro das especificações do serviço considerado.

- II. Projeto Mecânico Preliminar – abrangem considerações das forças que o trocador está submetido, além das temperaturas e pressões de operação, as características de corrosão de um ou de ambos os fluidos, as expansões e tensões térmicas, e também, a relação de troca de calor com os outros equipamentos.
- III. Projeto de Fabricação – requer a transformação das características físicas e dimensões em uma unidade, que pode ser fabricada a baixo custo (seleção dos materiais, selos, invólucros e arranjo mecânico ótimo), e os procedimentos na fabricação devem ser especificados.

Existem dois pontos importantes na área da engenharia relacionada com a transferência de calor, que é a avaliação - onde deseja achar a taxa de troca de energia para um dado sistema em temperaturas definidas. E o dimensionamento, ou seja, projetar um sistema para que tenha a transferência de calor desejada em dada temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

2.6. Definições de termos importantes

Em relação às palavras pressão e temperatura existem diversos conceitos importantes e é necessário especificar cada uma quando se refere a vasos de pressão – trocadores de calor.

2.6.1. Pressão e temperatura de operação

A pressão e a temperatura de operação de um vaso são as suas “condições de operação”, significa que serão os valores que o vaso irá trabalhar em condições normais. Esta pressão é medida sempre no topo, e quando preciso, deve-se considerar a pressão da coluna hidrostática de líquido (TELLES, 1996).

2.6.2. Pressão e Temperatura de Projeto

De acordo com a ASME DIV. Sec.VIII Div. I nomeiam-se pressão e temperatura de projeto as “condições de projeto” do vaso de pressão, isto é, os valores considerados para o cálculo do vaso. Assim, a pressão de projeto é a pressão relacionada às situações mais severas de pressão e temperatura coincidentes que possam ser prováveis em serviço normal (TELLES, 1996).

Para partes de um mesmo vaso de pressão, se as variações de temperatura possam ser claramente determinadas, a norma ASME (Seção VIII, Divisão 1), aceita temperaturas de projetos diferentes (TELLES, 1996).

Para ASME DIV. Sec.VIII Div. I (Parag. U.1) O valor mínimo de pressão de projeto é de 1,0 kgf/cm².

2.6.3. Pressão máxima de trabalho admissível

A pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) pode ser calculada a cada uma das partes ou para o todo de um vaso. 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.

O cálculo da PMTA deve ser realizado considerando as espessuras corroídas, retirando-se a margem para a corrosão que houver - ASME DIV. Sec.VIII Div. I 1 (parágrafo UG-98).

A ASME conceitua a PMTA do vaso todo como sendo o maior valor permissível para pressão, indicada no topo do vaso, na sua posição normal de trabalho, na temperatura ligada à pressão considerada, tendo o vaso com a espessura corroída. Assim, essa é pressão que gera na parte mais fraca do vaso, uma tensão igual à tensão admissível do material, isso quer dizer que, será o menor dos valores das PMTA das diversas partes do vaso.

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

2.6.4. Pressão de Teste Hidrostático

A pressão de teste hidrostático é a mais alta possível, compatível com a segurança da parte mais fraca do vaso. Logo, ela é sempre maior que a pressão de projeto e, também, à PMTA do vaso. No procedimento do teste hidrostático, o material ficará submetido a uma tensão acima de sua tensão admissível. Considera que essa situação, apresenta segurança, por ser realizada apenas uma vez, durante um tempo mínimo, com o vaso novo (TELLES, 1996).

O teste hidrostático tem o intuito de garantir que o vaso não apresente defeitos, falhas ou vazamentos em soldas, roscas, partes mandriladas e em outras ligações no próprio vaso ou em seus acessórios externos ou internos.

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso a ser desenvolvido a seguir compreende em descrever os procedimentos adotados por uma Empresa de Engenharia para obtenção dos resultados de uma parte do cálculo de um projeto mecânico de um trocador de calor da Empresa Cliente solicitante. Para isso foi utilizado o desenho de conjunto geral do equipamento (adaptado), apresentado no ANEXO B, para obtenção das dimensões principais.

O trocador de calor ao qual esse trabalho faz referência trata-se de um trocador casco e tubo, localizado em uma planta industrial. Esse equipamento comporta-se como um condensador. O fluido de trabalho é o hidrocarboneto (HC C3 - Propano), enquanto o fluido de resfriamento escolhido é a água de resfriamento (AGR).

A Empresa de Engenharia responsável pelo projeto possui uma multidisciplinaridade, assim, além do setor da engenharia mecânica, existe também o setor de processo, de tubulação, civil, elétrica e instrumentação. Logo, alguns dados desse projeto foram enviados por outros setores para a continuação do mesmo.

3.1. Descrição do problema

O problema trata em substituir o trocador de calor – casco e tubo – classificado como condensador de topo de planta industrial, que se encontra em final de vida útil devido à corrosão no lado da água de resfriamento, da Empresa Cliente solicitante.

Assim, a corrosão acentuada no feixe tubular está diminuindo a confiabilidade operacional. Como consequência a falha desse equipamento causa a parada de toda a planta industrial, trazendo grandes prejuízos para a Empresa Cliente.

A solução é a construção de um novo equipamento que será substituído durante uma parada programada. Já que não é possível efetuar sua retubagem (consiste na fabricação de um feixe tubular novo adequado para o equipamento danificado) durante dada parada, devido ao porte do equipamento. Dessa maneira, trata-se da construção de um novo trocador conforme o projeto atual, ou seja, para trabalhar sob as mesmas condições de operação.

A figura 17 representa um croqui do desenho de conjunto onde foi numerado cada componente calculado para melhor entendimento de sua localização. E a figura 18 mostra o feixe tubular, ou seja, dois espelhos fixos e tubos.

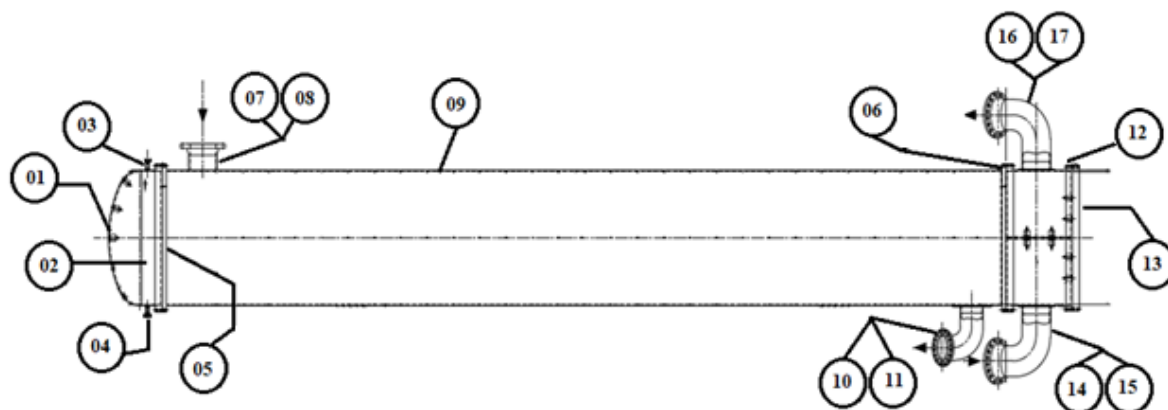


Figura 17: Croqui de conjunto. Fonte: Desenho do conjunto geral do equipamento (2018). Adaptado.

Abaixo a denominação de cada item:

- 01 – Tampo torisférico 2:1
- 02 – Cilindro do cabeçote
- 03 – Bocal T3
- 04 – Bocal T4
- 05 e 06 – Flanges principais
- 07 e 08 – Bocal C1 e reforço
- 09 – Casco
- 10 e 11 – Bocal C2 e reforço
- 12 – Flange principal
- 13 – Tampo plano
- 14 e 15 – Bocal T1 e reforço
- 16 e 17 – Bocal T2 e reforço

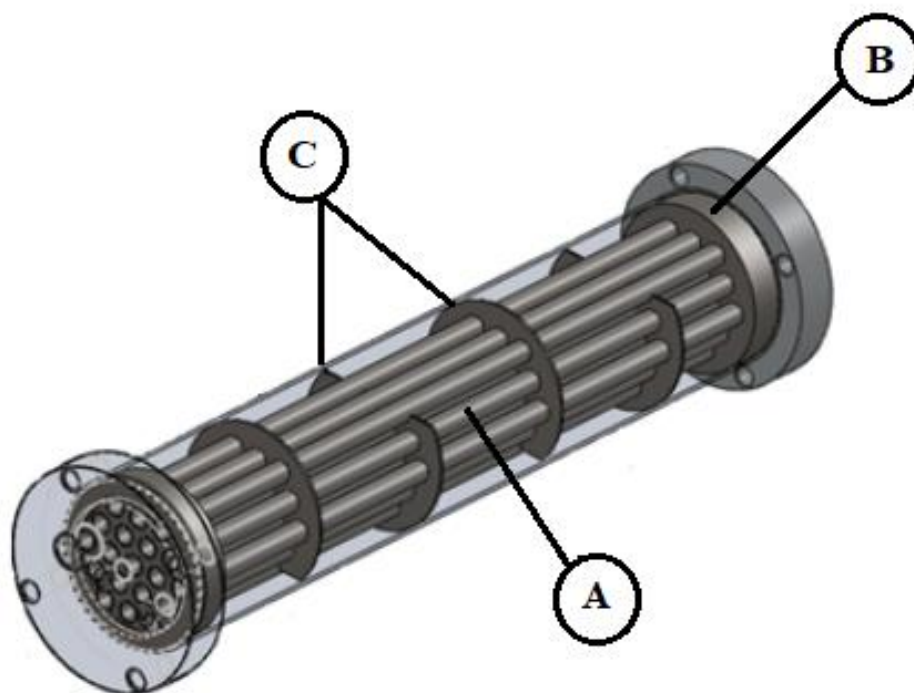


Figura 18: Croqui do feixe tubular. Fonte: RUBBO, 2014. Adaptado.

De acordo com a figura 18, a letra A representa a disposição dos tubos, a letra B mostra o espelho e a letra C apresenta as chicanas (não será considerada). O ANEXO C exibe o desenho de detalhes do feixe tubular do trocador de calor, com suas principais dimensões.

4. METODOLOGIA

4.1. Características do trocador de calor

Sendo um equipamento existente, suas características já estão definidas. Trata-se de um trocador de calor do tipo casco e tubo posicionado na horizontal e constituído por um casco (cilindro), dois tampos (torisférico e plano) e suportes (sela móvel e fixo).

A tabela 1 mostra as principais características de projeto da substituição do equipamento.

Tabela 1: Características do trocador de calor.

Tipo	AEM
Classe TEMA	R
Dimensão	Ø1725mm x 12192mm
Posição	Horizontal
Área por casco	6937mm ²

Fonte: Empresa cliente, 2019.

4.2. Dados de operação

Os dados de operação são informações essenciais para definição da pressão e temperatura de projeto. Onde estes dados serão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Dados de operação

	Lado do casco	Lado dos tubos
Fluido	HC C3's	AGR
Pressão de operação	19,2 kgf/cm ²	4,0 kgf/cm ²
Temperatura de operação de entrada	45,8 °C	31,0 °C
Temperatura de operação de saída	44,0 °C	43,1 °C

Fonte: Empresa cliente, 2019.

4.3. Dados de projeto

Os dados de projeto servirão como base para a análise mecânica do equipamento em estudo. O trocador deverá suportar a temperatura e pressão de projeto apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Dados de projeto

	Lado do casco	Lado dos tubos
Pressão de projeto	22,6 kgf/cm ²	5,0 kgf/cm ²
Temperatura de projeto	65,0 °C	65,0 °C

Fonte: Empresa cliente, 2019.

Além de que, a tabela 4 contém os materiais utilizados em cada componente do equipamento, já que influencia diretamente no cálculo mecânico. Assim como, a tabela 5 apresenta os valores da tensão admissível referente à temperatura de projeto e temperatura ambiente retirado pela norma ASME - seção II - parte D – 2015.

Tabela 4: Materiais das principais partes do trocador de calor.

Partes do trocador de calor	Material
Tampo	SA-285 Gr.C
Casco	SA-516 Gr.70
Espelhos	SA-516 Gr.70
Cabeçote/Carretel	SA-285 Gr.C
Tubos do feixe	SA-179
Flanges principais e conexões	SA-105
Pescoço dos bocais (lado do casco)	SA-516 Gr.70
Pescoço dos bocais (lado dos tubos)	SA-285 Gr.C

Fonte: Empresa cliente, 2019.

Tabela 5: Tensões admissíveis dos materiais

Materiais	Tensão admissível em kgf/cm ²	Tensão admissível em kgf/cm ²
	(T=65°C) - S	(T=ambiente) - S _{amb}
SA-285 Gr.C	1103,82	1103,82
SA-516 Gr.70	1406,18	1406,18
SA-179	942,14	942,14

Fonte: ASME, Seção II - parte D, 2015. Adaptado.

4.4. Dados do processo

Os dados de processo foram obtidos na folha de dados elaborada pelo setor de Engenharia de Processos.

A tabela 6 mostra informações importantes para que o trocador de calor seja projetado de maneira segura.

Tabela 6: Dados de processo

	Lado do casco	Lado dos tubos
Temperatura média de metal	44,0 °C	39,5 °C
Número de passe (por casco)	1	2
Corrosão admissível	3,0 mm	3,0 mm
Eficiência das juntas soldadas	100%	85%
Tipos de juntas de vedação	Confinada	Confinada
Isolamento térmico	Não	Não
Tratamento térmico	Não	Não

Fonte: Setor de processo, 2019.

Os valores do peso do equipamento referente à quando se encontra vazio, cheio d'água e em operação; é exposta na tabela 7.

Tabela 7: Pesos do equipamento.

Peso vazio	66.160 kgf
Peso cheio d'água	98.615 kgf
Peso em operação	91.125 kgf

Fonte: Setor de processo, 2019.

Além de que, a engenharia de processos indica quais são os bocais necessários para o equipamento executar sua função. A tabela 8 mostra os dados iniciais de todos os bocais do trocador.

Tabela 8: Dados iniciais dos bocais

Bocal	Diâmetro	Ângulo de Layout	Descrição
C1	16 in	0°	Entrada de HC C3's
C2	12 in	180°	Saída de HC C3's
T1	16 in	180°	Entrada de AGR
T2	16 in	0°	Saída de AGR
T3	1in	0°	Respiro
T4	1in	180°	Dreno

Fonte: Setor de processo, 2019.

A tabela 9 expõe os dados iniciais dos flanges padronizados utilizados nos bocais tendo como base dados de tubulação existente.

Tabela 9: Dados iniciais dos flanges padronizados dos bocais

Flange do bocal	Tipo	Classe	Face	Identificação	Sch.
C1	WN	300#	FR	XS	-
C2	WN	300#	FR	XS	-
T1	WN	150#	FP	-	40
T2	WN	150#	FP	-	40
T3	LWN e cego	150#	FP	-	-
T4	LWN e cego	150#	FP	-	-

Fonte: Setor de tubulação, 2019.

A tabela 10 expõe os dados da junta, estojo e porca padronizados, utilizados nos flanges dos bocais T3 e T4.

Tabela 10: Dados da junta, estojo e porca padronizados dos flanges dos bocais T3 e T4

Tipo	Quantidade	Descrição	Material
Junta	2	1,6 mm x Ø108/34	NA-1002
Estojo	8	Ø1/2in UNC x 70	SA-193-Gr.B7
Porca sextavada	16	Ø1/2in UNC	SA-194-Gr.2H

Fonte: Setor de tubulação, 2019.

A parte dos tubos é de extrema importância neste equipamento, já que ele é o responsável por efetuar a troca térmica, logo, o processo realiza o cálculo para que o equipamento atue como desejado. A tabela 11 expõe os resultados.

Tabela 11: Dados dos tubos do feixe

Quantidade	3780
Diâmetro externo	3/4 in
Passo	25,4 mm
Espessura	BWG 13
Arranjo dos tubos	Triangular 30°
Comprimento	12192 mm

Fonte: Setor de processo, 2019.

4.5. Procedimento para o cálculo mecânico

Para a realização do cálculo mecânico do trocador de calor é necessário, primeiramente, definir quais normas que serão utilizadas, já que elas asseguram as características esperadas do equipamento, garantindo a segurança, qualidade, eficiência e confiabilidade.

Dessa maneira, este estudo utilizará duas normas para a obtenção dos resultados, são elas:

- I. ASME Section VIII, Division 1 – 2015;
- II. TEMA Ed.9th – 2007.

Será utilizada uma memória de cálculo mecânico de um permutador de calor semelhante ao do trabalho, que foi calculado pelo Software PV-elite, para a obtenção de alguns dados de entrada.

A figura 19 apresenta o fluxograma do procedimento para o cálculo dos componentes do trocador de calor, ou seja, informa quais são as variáveis que se deseja obter nos resultados.

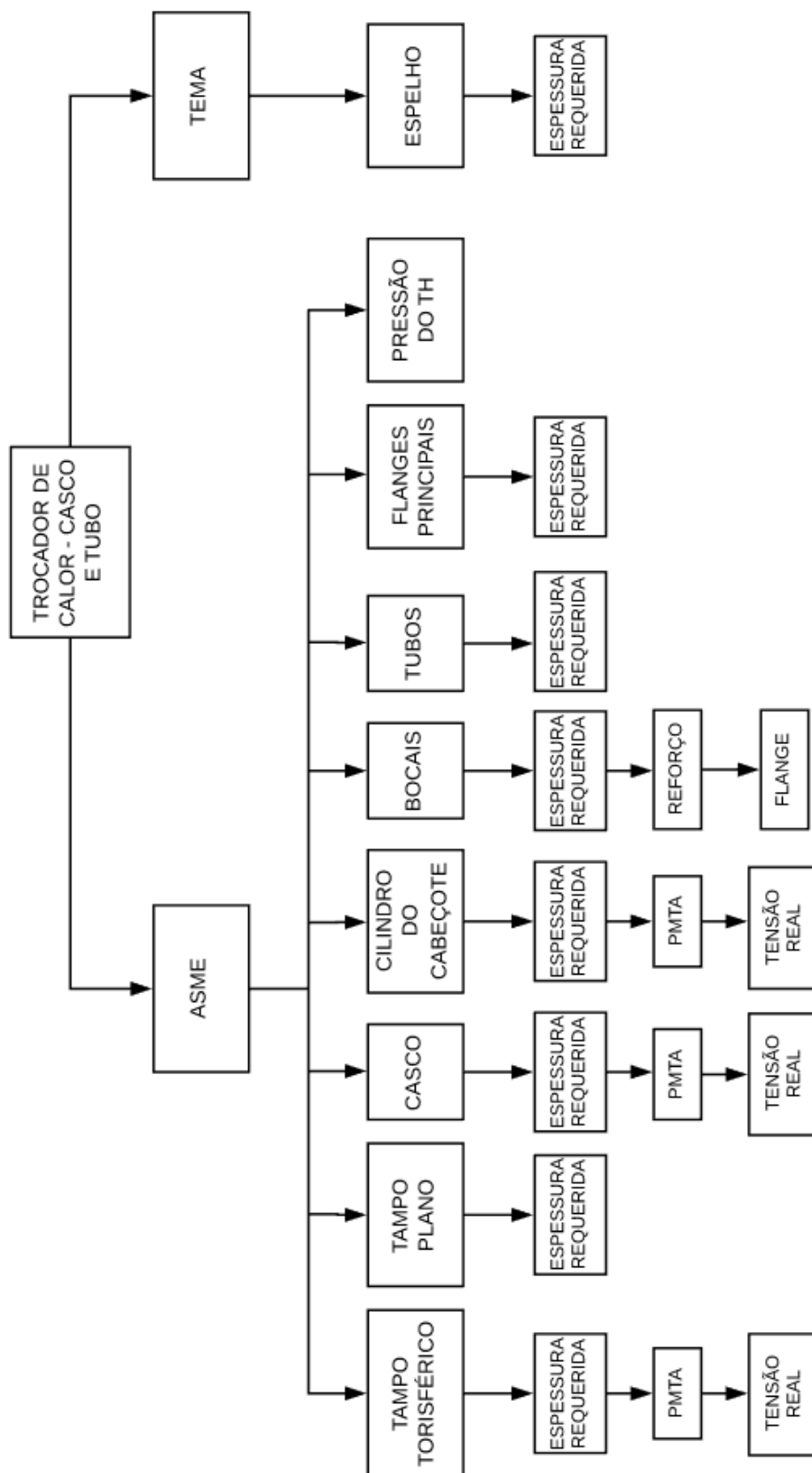


Figura 19: Fluxograma do procedimento do cálculo do trocador de calor. Fonte: Autor.

Logo, de acordo com a figura 19, o cálculo mecânico do permutador de calor foi dividido em duas partes, pois ele será feito de cada componente separadamente, aplicando a norma adequada. Para a localização de cada componente o capítulo 3.1 apresenta as figuras 17 e 18, sendo associado cada componente a seu item ou letra, e o capítulo que se encontra os resultados.

1. Para as partes abaixo será aplicada a ASME para a obtenção dos resultados, além de que será consultada uma tabela padrão (ANEXO I) para valores de espessuras comerciais.

- Item 01: Tampo torisférico 2:1 (capítulo 5.1.)

- Pressão hidrostática;
- Pressão equivalente;
- Raio de abaulamento interno (caso corroído e não corroído);
- Raio de rebordeamento interno;
- Altura do tampo;
- Fator do tampo torisférico;
- Espessura requerida;
- Espessura requerida após conformação;
- Espessura padrão;
- Espessura padrão após conformação;
- PMTA (caso corroído e não corroído);
- Tensão real corroída.

- Item 13: Tampo plano (capítulo 5.2.)

- Espessura requerida.

- Item 09: Casco (capítulo 5.3.)

- Raio interno (caso corroído e não corroído);
- Espessura requerida;
- Espessura padrão;
- PMTA (caso corroído e não corroído);
- Tensão real corroída.

- Item 02: Cilindro do cabeçote (capítulo 5.4.)

- Pressão hidrostática
- Pressão equivalente;
- Raio interno (caso corroído e não corroído);
- Espessura requerida;
- Espessura padrão;
- PMTA (caso corroído e não corroído);
- Tensão real corroída.

- Itens 03, 04, 07, 10, 14 e 16: Bocais

Bocal T3 e T4 – capítulo 5.8

Bocal C1 – capítulo 5.5

Bocal C2 – capítulo 5.6

Bocal T1e T2 – capítulo 5.7

- Espessura requerida da parede do bocal;
- Necessidade do uso de reforço;
- Largura mínima do reforço;
- Dados dos flanges padronizados.

- Letra B: Tubos (capítulo 5.9.)

O cálculo dos tubos utilizando a ASME é feito para o cálculo mecânico, a norma TEMA dimensiona a parte térmica (não é objetivo do TCC).

Para o dimensionamento da espessura dos tubos será considerado dois casos, são eles:

- Espessura requerida considerando à pressão interna;
- Espessura requerida considerando a pressão externa.

- Itens 05, 06 e 12: Flanges principais (capítulo 5.10.)

- Dimensões com recomendações técnicas.

- Pressão de teste hidrostático (capítulo 5.11.)

Para encontrar o valor da pressão de teste hidrostático foi feito o cálculo considerando dois casos:

- Lado do casco;
- Lado do tubo.

2. Para o cálculo do espelho fixo será utilizado a TEMA, já que os dois espelhos são iguais, será feito uma única análise.

- Letra A: Espelho (capítulo 5.12.)

Para o dimensionamento da espessura do espelho será feito dois cálculos, sendo eles:

- Espessura requerida considerando à flexão;
- Espessura requerida considerando o cisalhamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Tampo torisférico 2:1

Para o dimensionamento do tampo torisférico 2:1 foram utilizados os dados de entrada da tabela 12. Os dados de saída são apresentados na tabela 13. Para o acompanhamento das variáveis pode ser visto a figura 20.

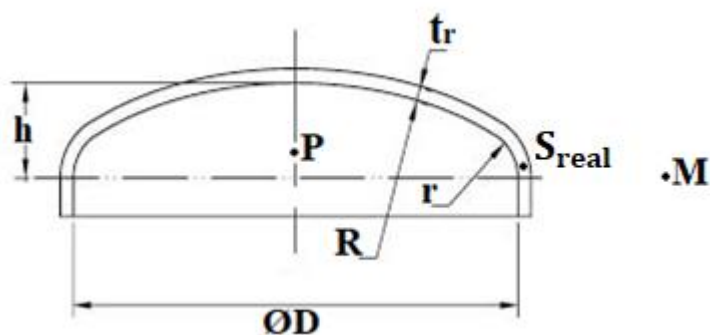


Figura 20: Variáveis do cálculo do tampo torisférico 2:1. Fonte: <http://www.metaltampos.com.br/produtos>. Acesso em: 15/06/2019, às 20:32. Adaptado.

Tabela 12: Dados de entrada para cálculo do tampo torisférico 2:1

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Densidade do líquido	ρ	1000	kgf/m ³
Altura do líquido / Diâmetro	D	1725	mm
Pressão interna de projeto	P	5,0	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Eficiência das juntas soldadas (longitudinal)	ϵ	1,0	-
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 13: Dados de saída do tampo torisférico 2:1

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Pressão hidrostática	$P_h = \rho D$	Teorema de Stevin	0,173	kgf/cm ²
Pressão equivalente	$P_1 = P_h + P$	Teorema de	5,17	kgf/cm ²

		Stevin		
Raio de abaulamento interno	$R = 0,9D$	UG-32	1552,5	mm
Raio de abaulamento interno corroído	$R_1 = R + C$	UG-32	1555,5	mm
Raio de rebordamento interno	$r = 0,17D$	UG-32	293,0	mm
Altura do tampo	$h = \frac{D}{4}$	UG-32	431,0	mm
Fator do tampo torisférico 2:1	$M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R}{r}} \right)$	UG-32 (APPENDIX 1-4)	1,32	-
Espessura requerida	$t_r = \frac{P_1 R_1 M}{2S\epsilon - 0,2P_1} + C$	UG-32 (APPENDIX 1-4)	7,8	mm
Espessura requerida após conformação	$t = 1,25t_r$	-	9,8	mm
Espessura padrão	$t' = \text{tabelado}$	ANEXO I	16,0	mm
Espessura padrão após conformação	$t'' = \frac{t'}{1,25}$	-	13,0	mm
PMTA corroído (t=10mm)	$PMTA_c = \frac{2Set}{MR_1 + 0,2t} - P_h$	UG-32 (APPENDIX 1-4)	10,54	kgf/cm ²
PMTA não corroído	$PMTA = \frac{2Set''}{MR + 0,2t''}$	UG-32 (APPENDIX 1-4)	13,92	kgf/cm ²
Tensão real corroída	$S_{real} = \frac{P(MR_1 + 0,2t)}{2\epsilon t}$	UG-32 (APPENDIX 1-4)	533,0	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

Para diâmetro menor que 1800 mm, é utilizado apenas uma chapa, dessa maneira, não haverá o processo de soldagem na fabricação do tampo, isso justifica o fato da eficiência das juntas soldadas ser 1,0.

Durante a fabricação do tampo com o intuito de conseguir alcançar o formato desejado é necessário realizar o processo de conformação. Logo, espessura até 50 mm é utilizada conformação a frio - já maiores de 50,0 mm utiliza-se o processo a quente. Para o dimensionamento da tabela 13, é aplicada conformação a frio onde ocorrerá uma perda de espessura entre 18 a 21%.

Logo, uma chapa após conformada acima de 9,8 mm atende os requisitos. A espessura da chapa padrão considerada foi de 16,0 mm.

O valor da pressão máxima de trabalho admissível corroída foi de 10,54 kgf/cm², ou seja, considerando que a espessura é de 10 mm.

5.2. Tampo plano

Para o cálculo do tampo plano, os valores de entrada é apresentado na tabela 14, onde foi retirado de uma memória de cálculo existente. O dado de saída é mostrado na tabela 15. A figura 21 mostra a variável encontrada na tabela 13.

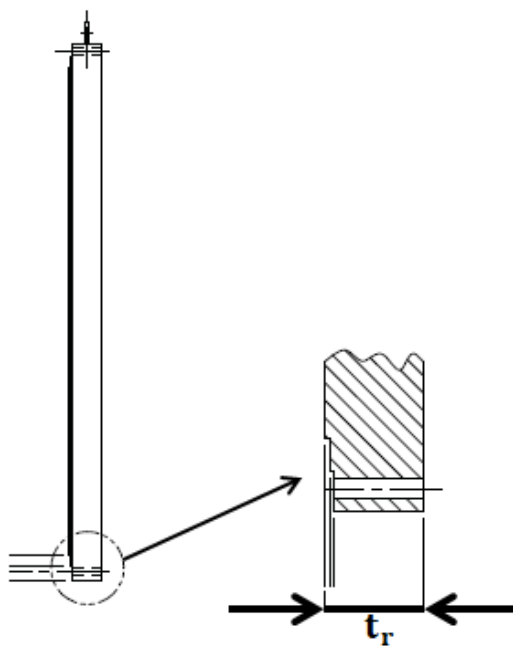


Figura 21: Variável do cálculo do tampo plano. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 14: Dados de entrada para cálculo do tampo plano

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Diâmetro da gaxeta	G'	1787,15	mm
Pressão interna de projeto	P	5,0	kgf/cm ²
Tensão admissível do material	S	1406,18	kgf/cm ²
Aperto do parafuso	W	192513,8	kg
Braço do momento da gaxeta	h_g	26,4	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 15: Dados de saída do tampo plano

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura requerida	$t_r = G' \sqrt{\frac{0,3P}{S} + \frac{1,9Wh_g}{SG'^3}}$	SILVEIRA, 2003	101,12	mm

Fonte: Autor, 2019.

Dessa maneira, o fabricante deverá selecionar uma chapa com no mínimo da espessura requerida, que é 101,12 mm. Como o tampo é plano, não existe a necessidade do processo de conformação.

5.3. Casco

Para os resultados do casco do trocador de calor, são utilizados os valores de entrada da tabela 16, e os dados de saída apresentados na tabela 17. A figura 22 mostra a variável do casco.

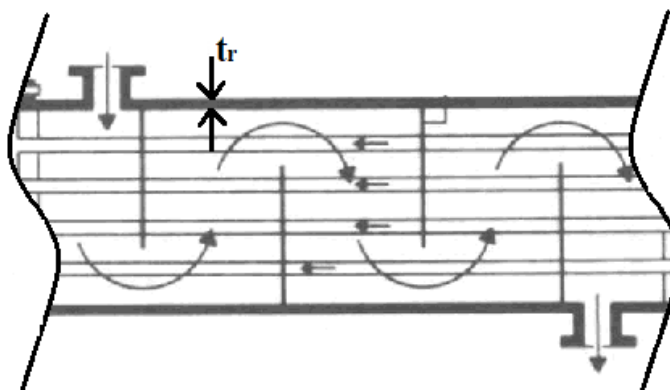


Figura 22: Variável do cálculo do casco. Fonte: <http://armariodaeq.blogspot.com/2014/10/trocadores-de-calor.html>. Acesso em: 15/06/2019, às 20:45. Adaptado.

Tabela 16: Dados de entrada para cálculo do casco

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Altura do líquido / Diâmetro	D	1725	mm
Pressão interna de projeto	P	22,6	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_P	65	°C
Eficiência das juntas soldadas	ϵ	1,0	-
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 17: Dados de saída do casco

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Raio interno	$R = \frac{D}{2}$	-	862,5	mm
Raio interno corroído	$R_1 = R + C$	-	865,5	mm
Espessura requerida	$t_r = \frac{PR_1}{S\epsilon - 0,6P} + C$	UG-27	14,0	mm
Espessura padrão	$t' = \text{tabelado}$	ANEXO I	19,0	mm
PMTA corroído (t=16mm)	$PMTA_c = \frac{Set}{R_1 + 0,6t}$	UG-27	25,80	kgf/cm ²
PMTA não corroído	$PMTA = \frac{Set'}{R + 0,6t'}$	UG-27	30,50	kgf/cm ²
Tensão real corroída	$S_{real} = \frac{P(R_1 + 0,6t)}{\epsilon t}$	UG-27	1240,7	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

Como pode ser visto na tabela 17, a espessura requerida para a fabricação do casco do equipamento é de 14 mm. A espessura utilizada pelo fabricante foi de 19,0 mm.

5.4. Cilindro do cabeçote

Para o cálculo do cilindro do cabeçote, a tabela 18 apresenta os valores de entrada, e os dados de saída é mostrado na tabela 19.

Tabela 18: Dados de entrada para cálculo do cilindro do cabeçote

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Densidade do líquido	ρ	1000	kgf/m ²
Altura do líquido / Diâmetro	D	1725	mm
Pressão interna de projeto	P	5,0	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Eficiência das juntas soldadas	ϵ	0,85	-
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 19: Dados de saída do cilindro do cabeçote

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Pressão hidrostática	$P_h = \rho D$	Teorema de Stevin	0,173	kgf/cm ²
Pressão equivalente	$P_1 = P_h + P$	Teorema de Stevin	5,17	kgf/cm ²
Raio interno	$R = \frac{D}{2}$	-	862,5	mm
Raio interno corroído	$R_1 = R + C$	-	865,5	mm
Espessura requerida	$t_r = \frac{P_1 R_1}{S\epsilon - 0,6P_1} + C$	UG-27	4,78	mm
Espessura padrão	$t' = \text{tabelado}$	ANEXO I	12,5	mm
PMTA corroído (t=9,5mm)	$PMTA_c = \frac{S\epsilon t}{R_1 + 0,6t} - P_h$	UG-27	10,06	kgf/cm ²
PMTA não corroído	$PMTA = \frac{2S\epsilon t'}{MR + 0,6t'}$	UG-27	13,48	kgf/cm ²
Tensão real corroída	$S_{real} = \frac{P_1(R_1 + 0,6t)}{\epsilon t}$	UG-27	558,09	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

O valor da espessura requerida do cilindro do cabeçote é de 4,78 mm, dessa maneira, foi utilizado um valor padrão de 12,5 mm que atende esse requisito. O valor da PMTA caso corroído é de 10,06 kgf/cm².

5.5. Bocal C1

Para o dimensionamento do bocal C1 com diâmetro de 16 in (406,4 mm), os dados de entrada e os dados de saída, são mostrados na tabela 20 e 21, respectivamente. A figura 23 mostra a variável t_{rn} que será calculada, além de representar o anel de reforço e o flange, que será visto no capítulo 5.5.1 e 5.5.2, respectivamente.

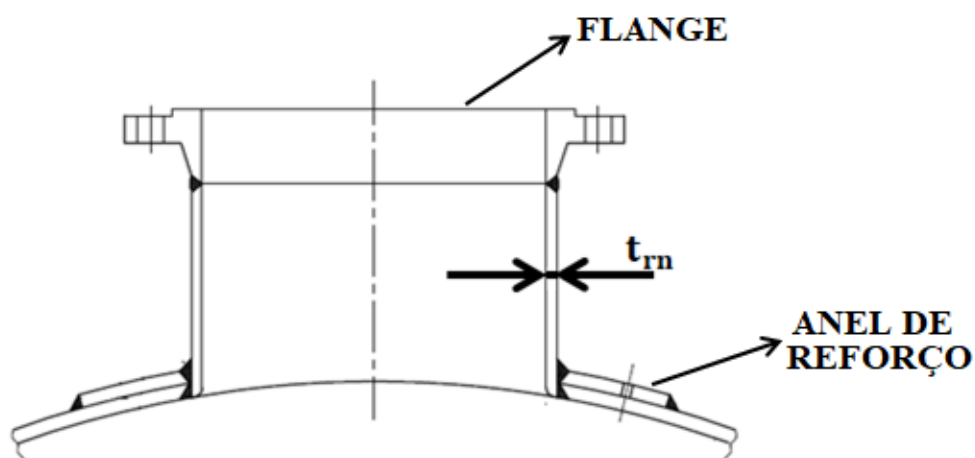


Figura 23: Desenho do bocal C1. Fonte: Desenho de detalhe do casco do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 20: Dados de entrada para cálculo do bocal C1

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão de projeto	P	22,6	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Tensão admissível do material	S	1406,18	kgf/cm ²
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm
Raio do bocal	R_o	203,2	mm
Eficiência das juntas soldadas (pescoço do bocal)	ϵ	1,0	-

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 21: Dados de saída do bocal C1

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura mínima da parede do bocal - corroído	$t_{rn} = \frac{PR_o}{S\epsilon + 0,4P}$	UG-27	3,26	mm
Espessura mínima da parede do bocal	$t_{rn} + C$	UG-27	6,26	mm

Fonte: Autor, 2019.

Desta forma, a espessura mínima do bocal C1 é 3,26 mm, considerando o caso corroído.

5.5.1. Anel de reforço

Para o dimensionamento do anel de reforço do bocal C1 é considerado o caso corroído. Assim, a tabela 22 mostra os dados de entrada. A tabela 23 apresenta os dados de saída.

Tabela 22: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal C1

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Espessura nominal da parede do tubo	t_n	9,7	mm
Espessura mínima do casco/tampo	t_r	14,0	mm
Espessura do anel de reforço	t_e	16,0	mm
Espessura mínima da parede do tubo	t_{rn}	3,26	mm
Espessura nominal do casco/tampo	t	16,0	mm
Diâmetro do bocal	d	387,0	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 23: Dados de saída do reforço do bocal C1

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Área requerida	$A_1 = dt_r + 2tt_n$	UG-37	5728,4	mm ²
Área disponível no casco/tampo	$A_2 = d(t - t_r) - 2t_n(t - t_r)$	UG-37	735,2	mm ²
Área disponível da projeção externa do bocal	$A_3 = 5t(t_n - t_{rn})$	UG-37	5215,2	mm ²
Largura mínima do reforço	ANEXO G	UG-37	139,9	mm
Área disponível pelo anel de reforço	$A_4 = 2Lt_e$	UG-37	4478,0	mm ²

Fonte: Autor, 2019.

O ANEXO G ilustra as áreas relacionadas para o cálculo do anel de reforço, além de mostrar quando é necessário o cálculo da largura mínima do reforço. Logo, de acordo com a ASME Section VIII, Division 1 – 2015 (UG-37), a largura mínima do anel de reforço para atender os requisitos é de 139,9 mm.

5.5.2. Flange

A tabela 24 mostra os principais dados do flange utilizado no bocal C1, que é padronizado, para demais informações consultar o ANEXO E.

Tabela 24: Dados do flange do bocal C1

Tipo	Pescoço	-
Classe	300	lb
Diâmetro nominal (DN)	16	in
Tipo de face	Ressalto	-
Diâmetro total (D)	648	mm
Pescoço (M)	483	mm
Face ressaltada (G)	470	mm

Fonte: Autor, 2019.

5.6. Bocal C2

Para o cálculo do bocal C2 com diâmetro de 12 in (304,8 mm), os dados de entrada e os dados de saída, são mostrados na tabela 25 e 26, respectivamente. A figura 24 mostra a variável calculada.

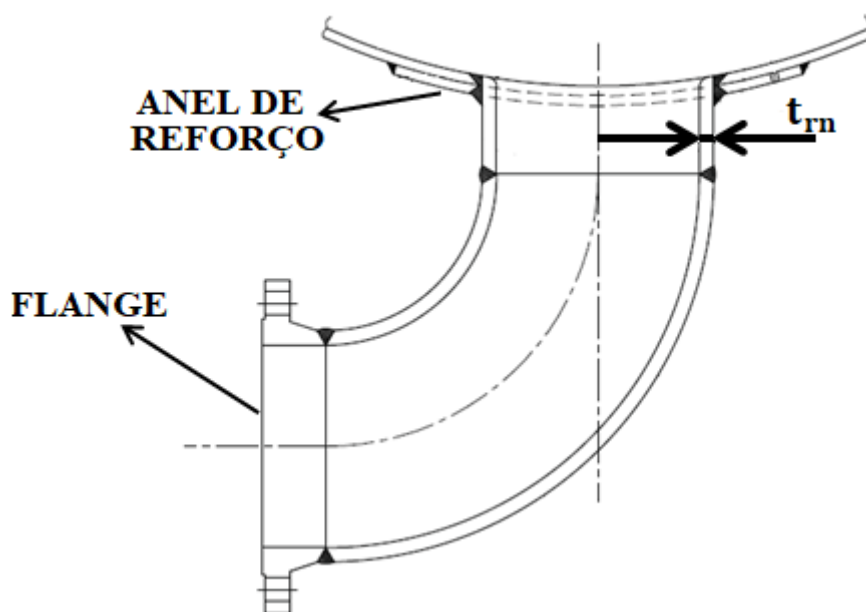


Figura 24: Desenho do bocal C2. Fonte: Desenho de detalhe do casco do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 25: Dados de entrada para cálculo do bocal C2

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão de projeto	P	22,6	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Tensão admissível do material	S	1406,18	kgf/cm ²
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm
Raio do bocal	R_o	152,4	mm
Eficiência das juntas soldadas (pescoço do bocal)	ϵ	1,0	-

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 26: Dados de saída do bocal C2

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura mínima da parede do bocal - corroído	$t_{rn} = \frac{PR_o}{S\epsilon + 0,4P}$	UG-27	2,43	mm
Espessura mínima da parede do bocal	$t_{rn} + C$	UG-27	5,43	mm

Fonte: Autor, 2019.

A tabela 26 mostra o valor de espessura mínima para a fabricação da parede do bocal, sendo de 2,43 mm. Para um caso não corroído, a espessura é de 5,43 mm.

5.6.1. Anel de reforço

Para o cálculo do anel de reforço do bocal C2 foi analisado como corroído. A figura 24 ilustra a sua posição. Dessa maneira, a tabela 27 mostra os dados de entrada, e a tabela 28 os dados de saída.

Tabela 27: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal C2

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Espessura nominal da parede do tubo	t_n	6,5	mm
Espessura mínima do casco/tampo	t_r	14,0	mm
Espessura do anel de reforço	t_e	16,0	mm
Espessura mínima da parede do tubo	t_{rn}	2,43	mm
Espessura nominal do casco/tampo	t	16,0	mm
Diâmetro do bocal	d	305,0	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 28: Dados de saída do reforço do bocal C2

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Área requerida	$A_1 = dt_r + 2tt_n$	UG-37	4478,0	mm ²
Área disponível no casco/tampo	$A_2 = d(t - t_r) - 2t_n(t - t_r)$	UG-37	584,0	mm ²
Área disponível da projeção externa do bocal	$A_3 = 5t(t_n - t_{rn})$	UG-37	325,6	mm ²
Largura mínima do reforço	ANEXO G	UG-37	111,5	mm
Área disponível pelo anel de reforço	$A_4 = 2Lt_e$	UG-37	3568,4	mm ²

Fonte: Autor, 2019.

A tabela 28 apresenta os cálculos necessários para saber se tem a necessidade de pôr o anel de reforço, logo, de acordo com o anexo G, o bocal C2 necessita de reforço com a largura mínima de 111,5 mm.

5.6.2. Flange

A tabela 29 apresenta as informações do flange padronizado utilizado no bocal C2 – onde pode se ser visto na figura 24 - assim, o ANEXO E mostra todos os dados desse tipo de flange.

Tabela 29: Dados do flange do bocal C2

Tipo	Pescoço	-
Classe	300	lb
Diâmetro nominal (DN)	12	in
Tipo de face	Ressalto	-
Diâmetro total (D)	521	mm
Pescoço (M)	375	mm
Face ressaltada (G)	381	mm

Fonte: Autor, 2019.

5.7. Bocais T1 e T2

Para a obtenção dos resultados dos bocais T1 e T2, ambos com diâmetro de 16 in (406,4 mm), a tabela 30 mostra os valores de entrada e a tabela 31 o valor de saída. A figura 25 mostra a variável encontrada, o flange e o anel de reforço.

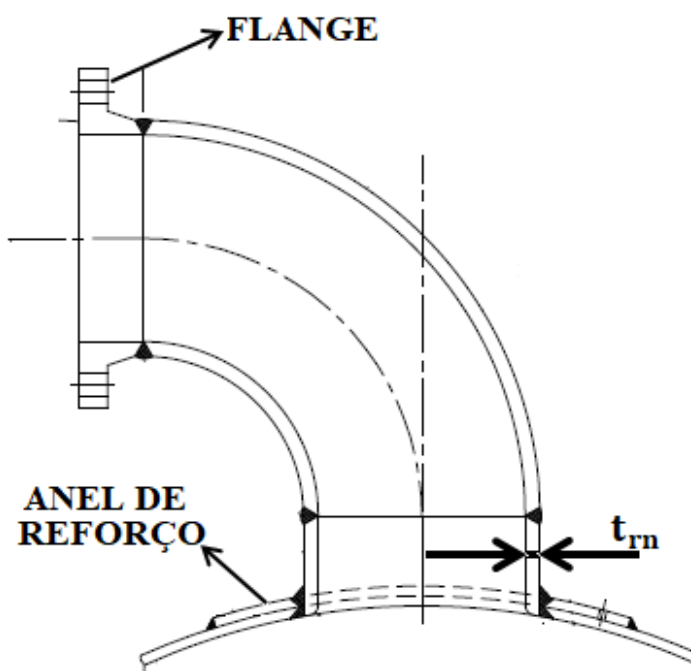


Figura 25: Desenho dos bocais T1 e T2. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 30: Dados de entrada para cálculo do bocal T1 e T2

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão de projeto	P	5,0	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Tensão admissível do material	S	1103,85	kgf/cm ²
Corrosão interna admissível	C	3,0	mm
Raio do bocal	R_o	203,2	mm
Eficiência das juntas soldadas (pescoço do bocal)	ϵ	1,0	-

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 31: Dados de saída do bocal T1 e T2

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura mínima da parede do bocal - corroído	$t_{rn} = \frac{PR_o}{S\epsilon + 0,4P}$	UG-27	0,92	mm
Espessura mínima da parede do bocal - corroído	$t_{rn} + C$	UG-27	3,92	mm

Fonte: Autor, 2019.

A tabela 31 apresenta o valor requerido para a espessura da parede do bocal T1 e T2 sendo de 0,92 mm, já que os dois possuem as mesmas características, e considerando um caso corroído. Se fosse analisado como não corroído a espessura mínima seria de 3,92 mm, pois é somado com o valor da corrosão admissível de projeto.

5.7.1. Anel de reforço

Para o cálculo do anel de reforço do bocal T1 e T2 foi analisado como corroído. Dessa maneira, são apresentados os dados de entrada e de saída na tabela 32 e 33, respectivamente.

Tabela 32: Dados de entrada para cálculo do reforço do bocal T1 e T2

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Espessura nominal da parede do tubo	t_n	9,7	mm
Espessura mínima do casco/tampo	t_r	14,0	mm
Espessura do anel de reforço	t_e	9,5	mm
Espessura mínima da parede do tubo	t_{rn}	0,92	mm
Espessura nominal do casco/tampo	t	16,0	mm
Diâmetro do bocal	d	387	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 33: Dados de saída do reforço do bocal T1 e T2

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Área requerida	$A_1 = dt_r + 2tt_n$	UG-37	5728,4	mm ²
Área disponível no casco/tampo	$A_2 = d(t - t_r) - 2t_n(t - t_r)$	UG-37	735,2	mm ²
Área disponível da projeção externa do bocal	$A_3 = 5t(t_n - t_{rn})$	UG-37	702,4	mm ²
Largura mínima do reforço	ANEXO G	UG-37	225,8	mm
Área disponível pelo anel de reforço	$A_4 = 2Lt_e$	UG-37	4290,8	mm ²

Fonte: Autor, 2019.

5.7.2. Flanges

A tabela 34 mostra as informações dos flanges padronizados utilizados nos bocais T1 e T2, já que são do mesmo tipo e mesmo diâmetro. O ANEXO D apresenta todos os demais dados.

Tabela 34: Dados dos flanges dos bocais T1 e T2

Tipo	Pescoço	-
Classe	150	lb
Diâmetro nominal (DN)	16	in
Tipo de face	Plano	-
Diâmetro total (D)	597	mm
Pescoço (M)	457	mm
Face ressaltada (G)	470	mm

Fonte: Autor, 2019.

5.8. Bocais T3 e T4

Para o dimensionamento dos bocais T3 e T4, bocais de respiro e dreno, respectivamente. Os dois com diâmetro de 1 in (25,4 mm), a tabela 35 mostra os valores de entrada e a tabela 36 o valor de saída. A figura 26 apresenta a variável encontrada e os dois flanges utilizados.

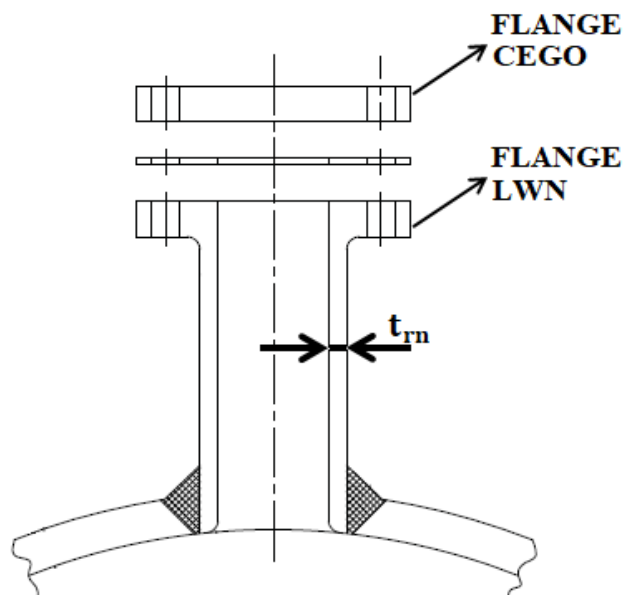


Figura 26: Desenho dos bocais T3 e T4. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 35: Dados de entrada para cálculo do bocal T3 e T4

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão de projeto	P	5,0	kgf/cm ²
Temperatura de projeto	T_p	65	°C
Tensão admissível do material	S	1103,85	kgf/cm ²
Corrosão interna admissível	C	1,5	mm
Raio do bocal	R_o	16,7	mm
Eficiência das juntas soldadas (pescoço do bocal)	ϵ	1,0	-

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 36: Dados de saída do bocal T3 e T4

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura mínima da parede do bocal - corroído	$t_{rn} = \frac{PR_o}{S\epsilon + 0,4P}$	UG-27	0,076	mm
Espessura mínima da parede do bocal	$t_{rn} + C$	UG-27	1,576	mm

Fonte: Autor, 2019.

Assim, como esperado o valor da espessura da parede do bocal T3 e do bocal T4 é pequeno, de aproximadamente 0,08 mm, já que o seu diâmetro é de 1 in. Pelo diâmetro desses bocais, a corrosão admissível foi considerada de 1,5 mm.

5.8.1. Anel de reforço

Os bocais T3 e T4 não necessitam de reforço, já que de acordo com o código ASME, Seção VIII, Divisão 1 (UG-36), o reforço é exigido para aberturas de diâmetro nominal 3 ½” ou maior.

5.8.2. Flanges

O ANEXO F apresenta os dados referentes ao flange padronizados do tipo LWN (Long Neck Welding), ou seja, de solda longa de pescoço. A tabela 37 mostra as principais informações.

Tabela 37: Dados principais dos flanges LWN dos bocais T3 e T4

Tipo	LWN	-
Classe	150	lb
Diâmetro nominal (DN)	1	in
Tipo de face	Plano	-
Diâmetro total (D)	108	mm
Diâmetro do cubo do bisel (E)	50,8	mm
Diâmetro do furo (B)	25,4	mm

Fonte: Autor, 2019.

O ANEXO D fornece os dados do flange cego padronizados. A tabela 38 apresenta alguns de seus dados.

Tabela 38: Dados principais dos flanges cego dos bocais T3 e T4

Tipo	CEGO	-
Classe	150	lb
Diâmetro nominal (DN)	1	in
Tipo de face	Plano	-
Diâmetro total (D)	108	mm

Fonte: Autor, 2019.

5.9. Tubos

Para o dimensionamento dos tubos será realizado dois procedimentos, a primeira considerando a pressão interna, e, a segunda a pressão externa; de acordo com o critério da ASME.

A tabela 39 mostra os dados de entrada para o cálculo do tubo referente à pressão interna e a pressão externa. O valor da espessura da parede do tubo é obtido no ANEXO H.

A tabela 40 apresenta o dado de saída quando o tubo está submetido à pressão interna.

Tabela 39: Dados de entrada para o cálculo do tubo.

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Espessura da parede do tubo	e_t	2,41	mm
Tolerância à corrosão do tubo	c_{att}	0,3	mm
Diâmetro externo do tubo	D	19,05	mm
Raio externo do tubo	R_o	9,525	mm
Tensão admissível do material	S	942,14	kgf/cm ²
Comprimento do tubo reto	L	12049,0	mm
Eficiência das juntas soldadas	ϵ	1,0	-
Temperatura de projeto dos tubos	T	65,0	°C
Pressão interna de projeto	P_i	5,0	kgf/cm ²
Pressão externa de projeto	P_e	22,6	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

- Submetido à pressão interna

Tabela 40: Dado de saída do tubo submetido à pressão interna

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Espessura do tubo requerida	$t_r = \frac{P_i R_o}{S\epsilon + 0,4P_i} + c_{att}$	UG-27	0,35	mm

Fonte: Autor, 2019.

A tabela 40 mostra o valor obtido da espessura requerida considerando a pressão interna, sendo de 0,35 mm.

- Submetido à pressão externa

Para o cálculo, deve-se supor uma espessura, assim, considerando $t = 0,4718\text{mm}$. A espessura requerida é:

$$t_r = t + c_{att} = 0,4718 + 0,3 = 0,7718\text{mm}$$

Dessa maneira, a tabela 41 apresenta os dados para mostrar que o valor de t é permitido.

Tabela 41: Dados de saída do tubo submetido à pressão externa

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
-	D/t	UG-28	40,38	-
-	L/D	UG-28	50	-
Fator A	ANEXO J	UG-28	0,00067	-
Fator B	ANEXO J	UG-28	684,44	-
Pressão máxima externa	$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D}{t}\right)}$	UG-28	22,6	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

A tabela 41 utilizou o ANEXO J para a obtenção do fator A e B, sendo que o fator B foi encontrado em uma memória de cálculo. Logo, a espessura de 0,4718 mm atendeu a norma, já que a pressão máxima externa encontrada na tabela 41 deu o valor da pressão externa de projeto.

Deste modo, considerando os valores da espessura do tubo requerida para a pressão interna e externa, a que apresentou o maior valor foi quando submetido à pressão externa, sendo assim, esse valor que deve ser considerado para a fabricação dos tubos.

5.10. Flanges principais

Para as dimensões dos flanges padronizados, segue a tabela 42 com os dados segundo recomendações técnicas, apresentando o item relacionado com a figura 17 e sua descrição, respectivamente. A figura 27 mostra a representação dos flanges, além de representar as principais dimensões.

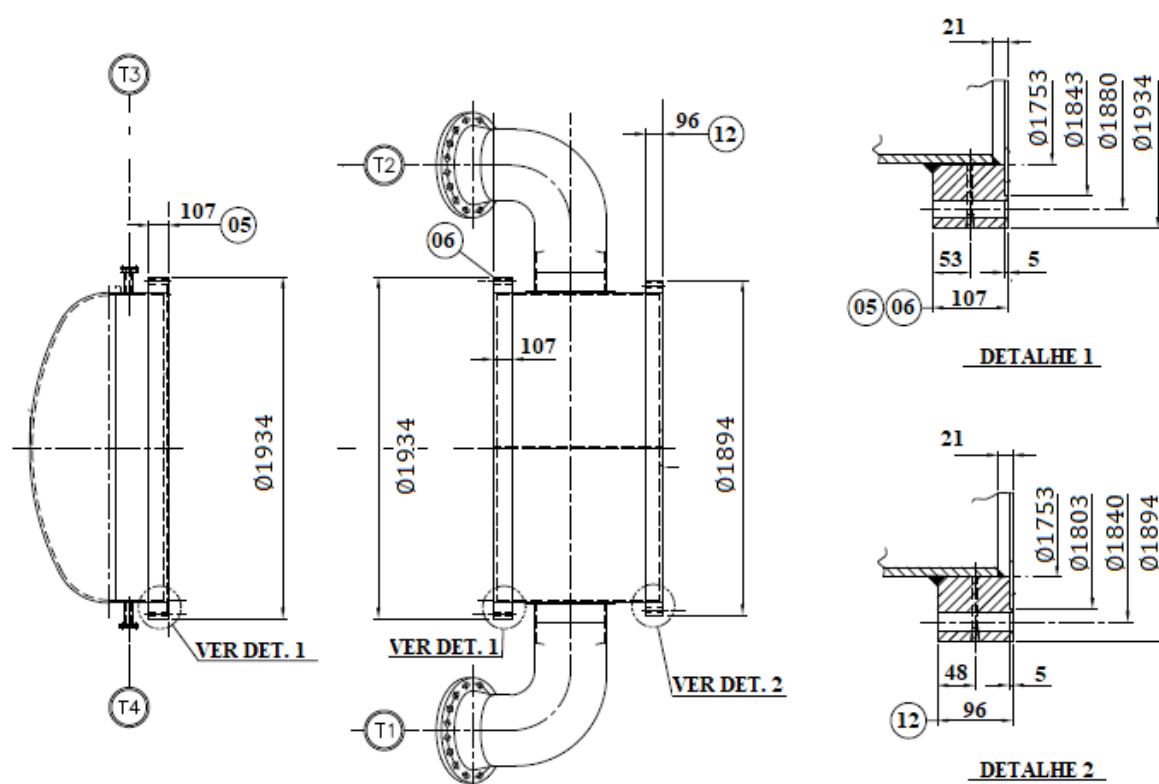


Figura 27: Desenho da representação dos flanges principais. Fonte: Desenho de detalhe do cabeçote do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 42: Recomendações dos dados dos flanges principais

	Descrição
Item 05	FLANGE 107 mm x Ø 1934/1753
Item 06	FLANGE 107 mm x Ø 1934/1753
Item 12	FLANGE 96 mm x Ø1894/1753

Fonte: Autor, 2019.

5.11. Pressão do teste hidrostático

Para o cálculo da pressão do teste hidrostático, considerou a pressão do lado do tubo e o lado do casco, como mostrado na tabela 43. A tabela 44 apresenta os dados de saída.

Tabela 43: Dados de entrada para cálculo do teste hidrostático

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão de projeto - lado do tubo	P_t	5,0	kgf/cm ²
Pressão de projeto - lado do casco	P_c	22,6	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 44: Dados de saída da pressão do teste hidrostático

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Pressão do teste hidrostático (lado do tubo)	$P_{th,t} = \frac{1}{3} P_t \frac{S_{amb}}{S}$	UG-99	6,5	kgf/cm ²
Pressão do teste hidrostático (lado do casco)	$P_{th,c} = \frac{1}{3} P_c \frac{S_{amb}}{S}$	UG-99	29,38	kgf/cm ²

Fonte: Autor, 2019.

Os valores de tensão admissível do ambiente e da temperatura de projeto se encontram na tabela 5.

Logo, a pressão do teste hidrostático a ser realizado é de 6,5 kgf/cm², já que deve ser considerado o menor valor encontrado, para que o equipamento não danifique o lado do casco.

5.12. Espelho

Para o dimensionamento dos espelhos fixos foi considerado apenas um, já que os dois são iguais. Foi realizado o cálculo considerando a pressão do lado do casco (cálculo a flexão) e do lado dos tubos (cálculo ao cisalhamento), de acordo com a norma TEMA.

A tabela 45 mostra os dados de entrada para o cálculo do espelho, onde a pressão externa e interna efetiva e o diâmetro efetivo foram retirados da memória de cálculo.

A tabela 46 apresenta os dados de saída do espelho fixo, ou seja, os resultados obtidos. A figura 28 mostra a representação do espelho e dos tubos, além de representar a variável desejada para espessura requerida do espelho.

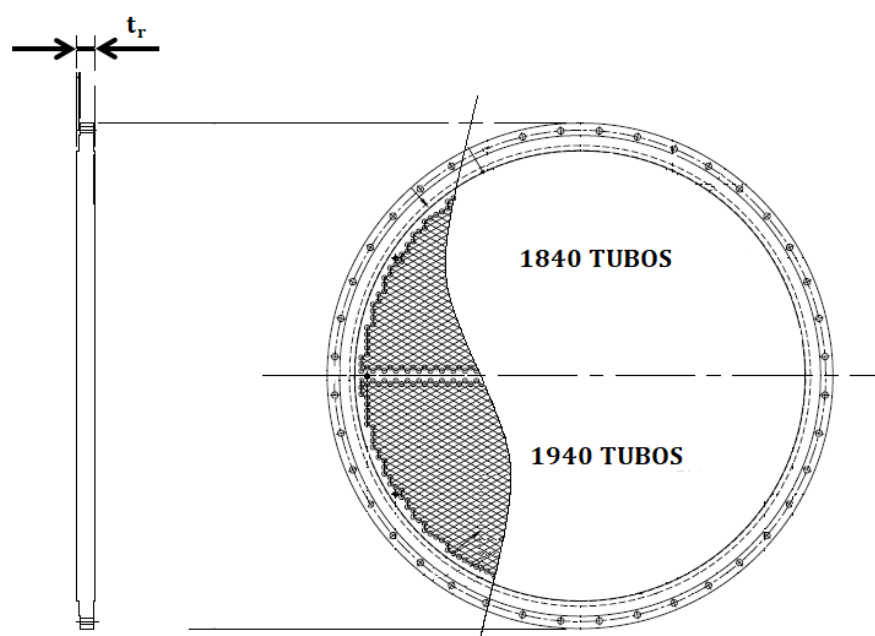


Figura 28: Desenho do feixe tubular. Fonte: Desenho de detalhe do feixe tubular do trocador de calor. Adaptado.

Tabela 45: Dados de entrada para cálculo do espelho fixo

Nome	Sigla	Valor	Unidade
Pressão externa efetiva (casco)	P_e	7,74	kgf/cm ²
Pressão interna efetiva (tubo)	P_i	3,64	kgf/cm ²
Tensão admissível do material	S	1406,18	kgf/cm ²
Diâmetro efetivo	G	1731,0	mm
Passo	ps	25,4	mm
Diâmetro externo do tubo	D	19,05	mm

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 46: Dados de saída do espelho fixo

Nome	Fórmula	Fonte	Valor	Unidade
Fator de suporte	F	ANEXO L	1,0	-
Função do arranjo dos tubos	$n = 1 - \frac{0,907}{\frac{pS}{D}}$	TEMA RCB- 7.132	0,4898	-
Espessura requerida (pressão do casco)	$t_{rc} = \frac{FG}{3} \sqrt{\frac{P_e}{nS}}$	TEMA RCB- 7.132	61,65	mm
Espessura requerida (pressão do tudo)	$t_{rt} = \frac{FG}{3} \sqrt{\frac{P_i}{nS}}$	TEMA RCB- 7.132	42,25	mm

Fonte: Autor, 2019.

Dessa maneira, a espessura requerida para a fabricação do espelho é de 61,65 mm, considerando o maior valor obtido, gerado pela pressão do casco (externa), ou seja, considerando a flexão.

6. CONCLUSÃO

O cálculo mecânico do trocador de calor atente as condições de operação dado pela empresa cliente, de acordo com as normas utilizadas.

No capítulo 5 foram obtidos os resultados de cada componente do equipamento separadamente, resumindo:

- Tampo torisférico: Espessura requerida de 9,8 mm;
- Tampo plano: Espessura requerida de 101,12 mm;
- Casco: Espessura requerida de 14 mm;
- Cilindro do cabeçote: Espessura requerida de 4,78 mm;
- Bocal C1: Espessura mínima 6,26 mm (não corroído) e largura mínima do anel de reforço de 139,9 mm;
- Bocal C2: Espessura mínima 5,43 mm (não corroído) e largura mínima do anel de reforço de 111,5 mm;
- Bocais T1 e T2: Espessura mínima 3,92 mm (não corroído) e largura mínima do anel de reforço de 225,8 mm;
- Bocais T3 e T4: Espessura mínima 1,576 mm (não corroído), pelo diâmetro dos bocais não existe a necessidade do reforço;
- Tubos: Diâmetro externo 3/4” com espessura BWG 13, espessura do tubo requerida de 0,4718 mm
- Espelhos: Espessura requerida de 61,65 mm

De acordo com a norma ASME SEÇÃO VIII, DIV 1 (UG-27) “a espessura mínima exigida dos reservatórios sob pressão não deve ser inferior à calculada”, logo, deve sempre considerar as espessuras sendo maior ou igual aos valores encontrados no capítulo 5.

Os materiais das espessuras dos componentes localizadas no capítulo 5 podem ser encontrados em tipo padrão, que são comercializadas no mercado; dessa maneira, possibilita a fabricação do equipamento.

O teste hidrostático do equipamento deve ser realizado a 6,5 kgf/cm² (lado do tubo).

Não foi considerada para o cálculo do trocador de calor a mudança de fluidos, a fadiga, a variação de pressão, a variação de temperatura, as juntas soldadas. Além de que, não foram calculados os suportes (chicanas, tirantes, sela móvel e sela fixa), as juntas de vedação e os parafusos dos flanges principais.

Assim, a teoria exposta no capítulo 2 permitiu um conhecimento amplo na área dos trocadores de calor, e também, uma fundamentação para a realização do cálculo mecânico.

As propostas para trabalhos futuros são:

- Construir um software que realize o procedimento do cálculo;
- Realizar o cálculo térmico do trocador de calor;
- Fazer o cálculo utilizando outros tipos de materiais nos componentes;
- Calcular os flanges principais;
- Calcular as juntas e parafusos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, Celso. **Transmissão de Calor**. São Paulo: LTC, 1978.

ASME (American Society of Mechanical Engineering), Section VIII, Division 1. **Rules For Construction of Pressure Vessels**, New York, 2007.

AZEVEDO, João Luís Toste. **Apontamentos de Permutadores de Calor – Equipamentos Térmicos**. 2005

BEJAN, Adrian. **Transferência de Calor**. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1996.

BRAGA FILHO, Washington. **Transmissão de Calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

CARDOSO, Pedro Henrique Gameiro. **Projeto de trocador de calor casco e tubo para resfriamento de óleo resíduo**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. São Paulo: Amgh, 2012.

FALCÃO, Carlos. **Projeto Mecânico – Vasos de Pressão e trocadores de calor casco e tubos**. Sem editora. Revisao 2008. Texto registrado sob o número 284827 do Livro 514 folha 487 do Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura.

GASPAR, A. **Física**. São Paulo, v.2, Ática, 2002.

GHIZZE, Antonio. **Manual de Trocadores de Calor, Vasos e Tanques**.

HEWITT, G.F.,SHIRES, G. L.; BOTT, T.R.: **Process heat transfer**, p.1-6, 197-198. CRC Press Inc, (1993).

IBRASA. Instituição Brasileira de Difusão Cultural Ltda, São Paulo, 1989.

INCASE. Disponível em: <<https://www.incase.com.br/trocador-calor-industrial>> Acesso em 25 de março de 2019.

INCROPERA, Frank; DEWITT, David; BERGMAN, Theodore. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KREITH, I. **Princípios da Transmissão de Calor**. 3ª. Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.

MACINTYRE, Archibald Joseph.Jr. **Equipamentos Industriais e de Processo**. 1ª edição; Livros Técnicos e Científicos, 1997.

MATTJIE, Clovis A.; RISTOF, Renato. **Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Faculdade Horizontina. Horizontina, 2013.

NICOLA, Marcelo Dalvi; NETO VIEIRA, Marcos Fernando. **Projeto mecânico e construção de vaso de pressão: estudo de caso serviço com sulfeto de hidrogênio.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

OLIVEIRA, P.J. **Transmissão de calor – Radiação.** Departamento Engenharia Eletromecânica, UBI, Dezembro 2014.

OZISIK, M.N. Transferência de Calor. Um Texto Básico, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro. 1990.

PETROBRAS. **N-253: Projeto de Vaso de Pressão PETROBRAS.** Rev.J. Maio, 2004.

REVISTA GRUPO MPE . Rio de Janeiro, ano XXI, n. 26, 2º semestre de 2009. Disponível em:< <http://www.grupompe.com/dynfiles/Revista%202009.pdf>>. Acesso em 02 de maio de 2019.

ROSA, Ricardo Badek. **Análise da viabilidade da substituição dos tubos de um trocador de calor casco e tubos de vidro por carbetto de silício.** 2009. 20 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

RIBEIRO, Celina Maria Cunha. **Comparação de métodos de cálculo termo-hidráulico para trocadores de calor casco e cubo, sem mudança de fase.** 1984. 220 p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Unicamp, Campinas, 1984.

RUBBO, Patrick Nikson. **DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE UM CONDENSADOR DO TIPO CASCO E TUBO DE UM CHILLER POR ADSORÇÃO DE AMÔNIA EM NaBr.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Santa Catarina – Araranguá, 2014.

SABINO, Ricardo Schayer. **INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES DE TROCADORES DE CALOR.** Trabalho de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG, 2008.

SILVEIRA, Leonardo Toledo. Permutadores de calor. PETROBRAS Petróleo Brasileiro S.A, 2003.

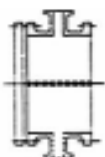
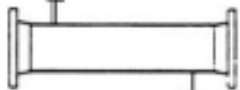
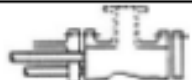

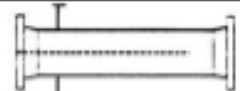
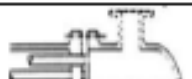
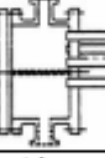
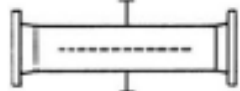

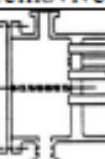
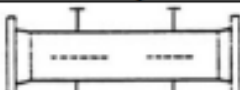
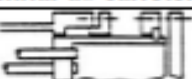

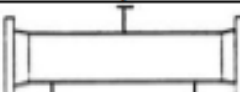
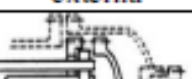


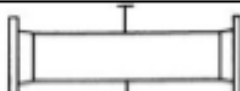


TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Vasos de Pressão.** 2ª edição atualizada; Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1996.

TEMA, "**Standards of Tubular Exchangers Manufactures Association**", 9th Edn., New York, 2007.

TOMAZINI, G. A. **Diretrizes básicas para projetos de vasos de pressão segundo a ASME.** 2014. 43 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

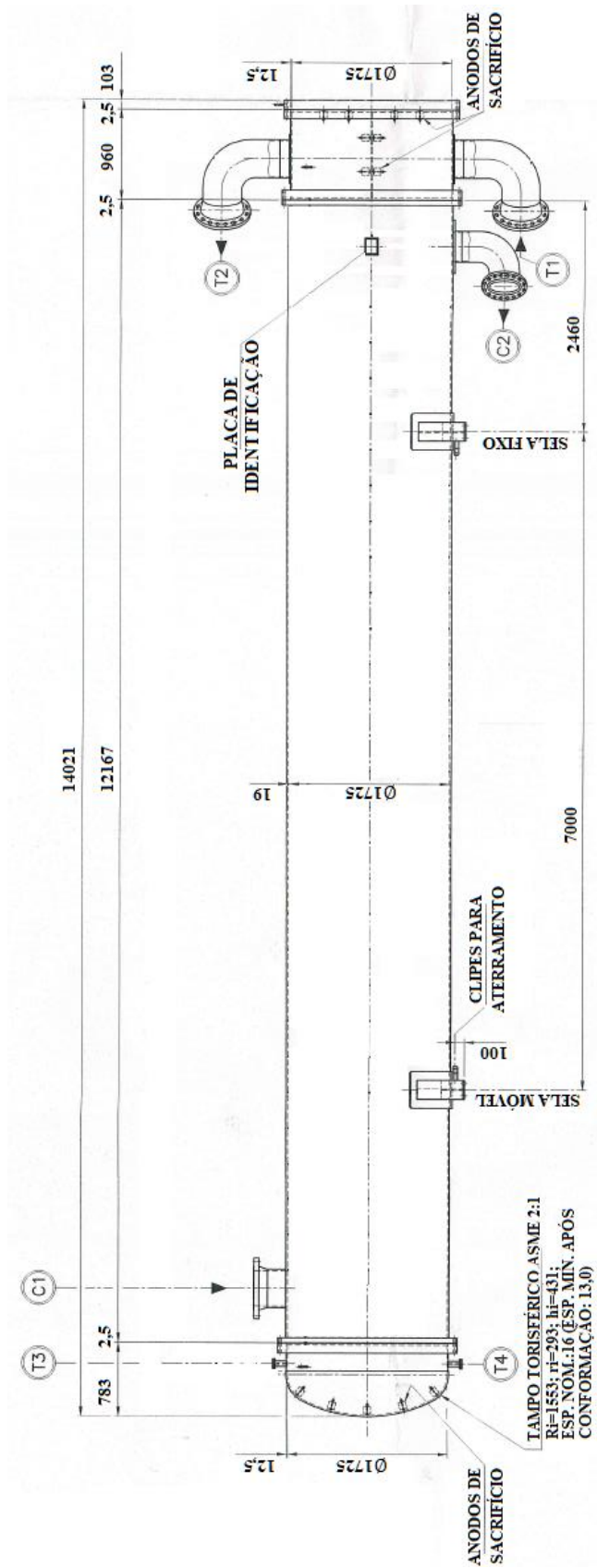
8. ANEXOS

ANEXO A: CLASSIFICAÇÃO TEMA DAS FORMAS CONSTRUTIVAS DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

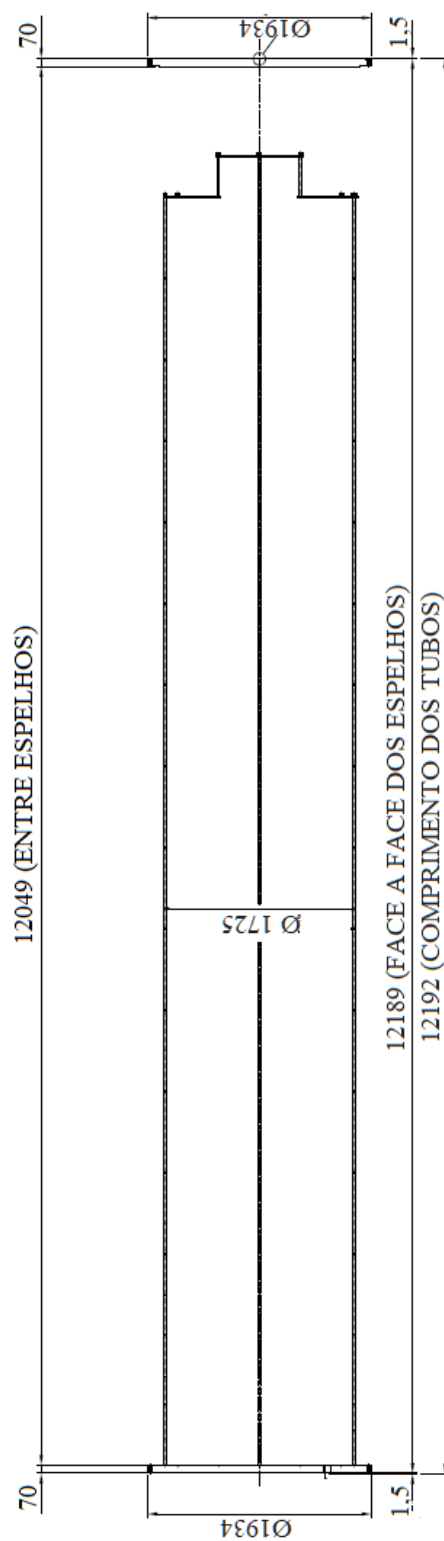
Extremidades frontais		Cascos		Extremidades finais	
A		E		L	
	Carretel e tampa removíveis		Passo único		Espelho fixo Similar ao carretel A
B		F		M	
	Carretel tipo boleado (carretel integral)		Dois passos no casco com chicana longitudinal		Espelho fixo Similar ao carretel B
C		G		N	
	Carretel integrado ao feixe e tampas removíveis		Fluxo separado		Espelho fixo Similar ao carretel N
N		H		P	
	Carretel integrado ao casco e feixe com tampa removível		Fluxo separado duplo		Caixa flutuante com vedação externa
D		J		S	
	Carretel especial para altas pressões		Fluxo dividido		Caixa flutuante com vedação externa
		K		T	
			Refervedor		Caixa flutuante com vedação externa
		X		U	
			Fluxo cruzado		Feixe tubular em U
				W	
					Espelho flutuante com vedação no casco

Fonte: TEMA 2007. Adaptado.

ANEXO B: DESENHO DIMENSIONAL DO TROCADOR DE CALOR

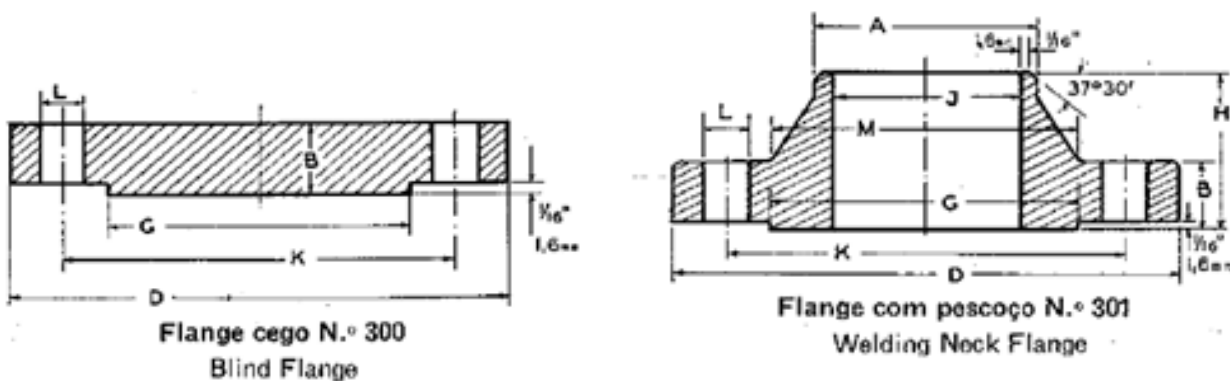


Fonte: Desenho do conjunto geral do equipamento. Adaptado.

ANEXO C: DESENHO DE DETALHES DO FEIXE TUBULAR DO TROCADOR DE CALOR

Fonte: Desenho do desenho de detalhes do equipamento (2019). Adaptado.

ANEXO D: CATÁLOGO CONFORJA – FLANGE 150lb

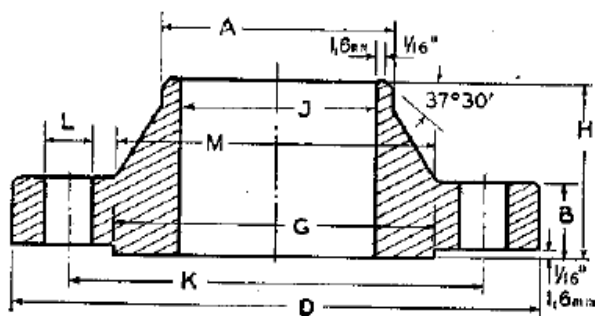


ANSI B 16.5

Diâmetro nominal Nominal Pipe Size	Med. em Dimension in	Medidas comuns Common Dimensions							Furos Drilling				
		D	G	M	B	N.º	L	K	J	E	C	F	V
1/2"	pol./Inch. mm	3 1/2 88,9	1 3/8 34,9	1 3/16 30,2	7/16 11,1	4	5/8 15,9	2 3/8 60,3	0,62 15,7	Flange roscado 150 lb. sem onem encaixe Threaded Flanges 150 # without socket	0,88 22,4	0,62 15,7	0,90 22,9
3/4"	pol./Inch. mm	3 7/8 98,4	1 11/16 42,9	1 1/2 38,1	1/2 12,7	4	5/8 15,9	2 3/4 69,8	0,82 20,8		1,09 27,7	0,82 20,8	1,11 23,2
1"	pol./Inch. mm	4 1/4 108	2 50,8	1 13/16 49,2	5/16 14,3	4	3/8 15,9	3 1/8 79,4	1,05 26,7		1,36 34,5	1,05 26,7	1,38 35,1
1 1/4"	pol./Inch. mm	4 5/8 117	2 1/2 63,5	2 3/16 58,7	3/8 15,9	4	3/8 15,9	3 1/2 88,9	1,38 35,1		1,70 43,2	1,38 35,1	1,72 43,7
1 1/2"	pol./Inch. mm	5 127	2 7/8 73,0	2 3/16 65,1	11/16 17,5	4	3/8 15,9	3 7/8 98,4	1,61 40,9		1,95 49,5	1,61 40,9	1,97 50,0
2"	pol./Inch. mm	6 152	3 5/8 92,1	3 1/16 77,8	3/4 19,0	4	3/4 19,0	4 3/4 121	2,07 52,6		2,44 62,0	2,07 52,6	2,46 62,5
2 1/2"	pol./Inch. mm	7 178	4 1/8 105	3 9/16 90,5	7/8 22,2	4	3/4 19,0	5 1/2 140	2,47 62,7		2,94 74,7	2,47 62,7	2,97 75,4
3"	pol./Inch. mm	7 1/2 190	5 127	4 1/4 108	15/16 23,8	4	3/4 19,0	6 152	3,07 78,0		3,57 90,7	3,07 78,0	3,60 91,4
3 1/2"	pol./Inch. mm	8 1/2 216	5 1/2 140	4 13/16 122	13/16 23,8	8	3/4 19,0	7 178	3,55 90,2		4,07 103	3,55 90	4,10 104
3 1/2"	pol./Inch. mm	8 1/2 216	5 1/2 140	4 13/16 122	13/16 23,8	8	3/4 19,0	7 178	3,55 90,2		4,07 103	3,55 90	4,10 104
4"	pol./Inch. mm	9 229	6 3/16 157	5 9/16 135	15/16 23,8	8	3/4 19,0	7 1/2 190	4,03 102		4,57 116	4,03 102,4	4,60 117
5"	pol./Inch. mm	10 254	7 5/16 186	6 7/16 164	15/16 23,8	8	7/8 22,2	8 1/2 216	5,05 128		5,66 144	5,05 128,3	5,69 145
6"	pol./Inch. mm	11 279	8 1/2 216	7 9/16 192	1 25,4	8	7/8 22,2	9 3/8 241	6,07 154		6,72 171	6,07 154,2	6,75 171
8"	pol./Inch. mm	13 1/2 343	10 5/8 270	9 11/16 246	1 1/8 28,6	8	7/8 22,2	11 3/4 293	7,98 203		8,72 221	7,98 202,7	8,75 222
10"	pol./Inch. mm	16 406	12 3/4 324	12 305	1 3/16 30,2	12	1 25,4	14 1/4 362	10,02 255		10,88 276	10,02 25,45	10,92 277
12"	pol./Inch. mm	19 483	15 381	14 3/8 365	1 1/4 31,8	12	1 25,4	17 432	12,00 305		12,88 327	12 304,8	12,92 328
14"	pol./Inch. mm	21 533	16 1/4 413	15 3/4 400	1 3/8 34,9	12	1 1/8 28,6	18 3/4 476	13,25 336,5		14,14 359	13,25 336,5	14,18 360
16"	pol./Inch. mm	23 1/2 597	18 1/2 470	18 457	1 7/16 36,5	16	1 1/2 28,6	21 1/4 540	15,25 387		16,16 410	15,25 387	16,19 411
18"	pol./Inch. mm	25 635	21 533	19 7/8 505	1 9/16 39,7	16	1 1/4 31,8	22 3/8 578	17,25 438		18,18 462	17,25 438,1	18,20 462
20"	pol./Inch. mm	27 1/2 698	23 584	22 559	1 11/16 42,9	20	1 3/4 31,8	25 635	19,25 489		20,20 513	19,25 488,9	20,25 514
24"	pol./Inch. mm	32 813	27 1/4 692	26 1/8 664	1 7/8 47,6	20	1 3/8 34,9	29 1/2 749	23,25 590,5	24,25 616	23,25 590,5	24,25 616	

Fonte: Catálogo Conforja. Adaptado.

ANEXO E: CATÁLOGO CONFORJA – FLANGE 300Ib



Flange com pescoço N.º 301
Welding Neck Flange

ANSI B 16.5

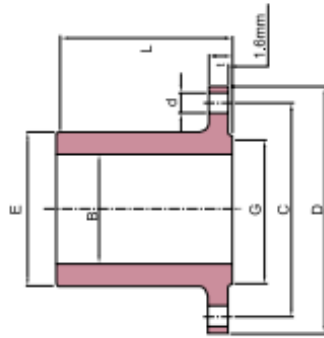
Diâmetro nominal Nominal Pipe Size	Med. em Dimensions in	Medidas comuns Common Dimensions							Furos Drilling				
		D	G	M	B	N.º	L	K	J	E	C	F	V
1/2"	pol./Inch. mm	3 3/4 95,2	1 3/8 34,9	1 1/2 38,1	3/16 14,3	4	3/8 15,9	2 3/8 66,7	0,62 15,7	0,93 23,6	0,88 22,4	0,62 15,7	0,90 22,9
3/4"	pol./Inch. mm	4 3/8 117	1 11/16 42,9	1 3/8 47,6	3/8 15,9	4	3/8 19,0	3 1/4 82,6	0,82 20,8	1,14 29,0	1,09 27,7	0,82 20,8	1,11 28,2
1"	pol./Inch. mm	4 1/2 124	2 50,8	2 1/8 54,0	1/2 17,5	4	3/8 19,0	3 3/2 88,9	1,05 26,7	1,41 35,8	1,36 34,5	1,05 26,7	1,38 35,1
1 1/4"	pol./Inch. mm	5 1/4 133	2 1/2 63,5	2 1/2 63,5	1/2 19,0	4	3/8 19,0	3 7/8 98,4	1,38 35,1	1,75 44,4	1,70 43,2	1,38 35,1	1,72 43,7
1 1/2"	pol./Inch. mm	6 1/8 156	2 3/8 73,0	2 3/8 69,8	1/2 20,6	4	3/8 22,2	4 1/2 114	1,61 40,9	1,99 50,5	1,95 49,5	1,61 40,9	1,97 50,0
2"	pol./Inch. mm	6 3/2 165	3 3/8 92,1	3 3/16 84,1	3/4 22,2	8	3/8 19,0	5 127	2,07 52,6	2,50 63,5	2,44 62,0	2,07 52,6	2,46 62,5
2 1/2"	pol./Inch. mm	7 1/2 190	4 1/8 105	3 13/16 100	1 25,4	8	3/8 22,2	5 7/8 149	2,47 62,7	3,00 76,2	2,94 74,7	2,47 62,7	2,97 75,4
3"	pol./Inch. mm	8 3/4 210	5 127	4 3/4 117	1 1/8 28,6	8	3/8 22,2	6 3/8 168	3,07 78,0	3,63 92,2	3,57 90,7	3,07 78,0	3,60 91,4
3 1/2"	pol./Inch. mm	9 229	5 1/2 140	5 1/4 133	1 3/16 30,2	8	3/8 22,2	7 1/4 184	3,55 90,2	4,13 105	4,07 103	3,55 90,2	4,10 104
4"	pol./Inch. mm	10 254	6 3/16 157	5 3/4 146	1 1/4 31,8	8	3/8 22,2	7 7/8 200	4,03 102	4,63 118	4,57 116	4,03 102,4	4,60 117
5"	pol./Inch. mm	11 279	7 1/16 186	7 178	1 3/8 34,9	8	3/8 22,2	9 1/4 235	5,05 128	5,69 145	5,66 144		5,69 145
6"	pol./Inch. mm	12 1/2 318	8 1/2 216	8 1/8 206	1 3/16 35,5	12	3/8 22,2	10 3/4 270	6,07 154	6,75 171	6,72 171		6,75 171
8"	pol./Inch. mm	15 381	10 3/8 270	10 1/4 260	1 3/8 41,3	12	1 25,4	13 330	7,98 203	8,75 222	8,72 221		8,75 222
10"	pol./Inch. mm	17 1/2 444	12 3/4 324	12 3/8 321	1 3/8 47,6	16	1 1/8 28,6	15 1/4 387	10,02 255	10,88 276	10,88 276		10,92 277
12"	pol./Inch. mm	20 1/2 521	15 381	14 3/4 375	2 50,8	16	1 1/4 31,8	17 3/4 451	12,00 305	12,94 329	12,88 327		12,92 328
14"	pol./Inch. mm	23 584	16 3/4 413	16 3/4 425	2 1/8 54	20	1 1/2 31,8	20 1/4 514	13,29 336,5	14,19 360	14,14 359		14,18 360
16"	pol./Inch. mm	25 1/2 648	18 1/2 470	19 483	2 1/4 57,2	20	1 3/4 34,9	22 1/2 572	15,25 387	16,19 411	16,16 410		16,19 411
18"	pol./Inch. mm	28 711	21 533	21 533	2 3/8 60,3	24	1 3/4 34,9	24 3/4 629	17,25 438	18,19 462	18,18 462		18,20 462

Fonte: Catálogo Conforja. Adaptado.

ANEXO F: CATÁLOGO HYDRAULIC & OFFSHORE SUPPLIES – FLANGE 150lb

LONG WELDING NECK FLANGES

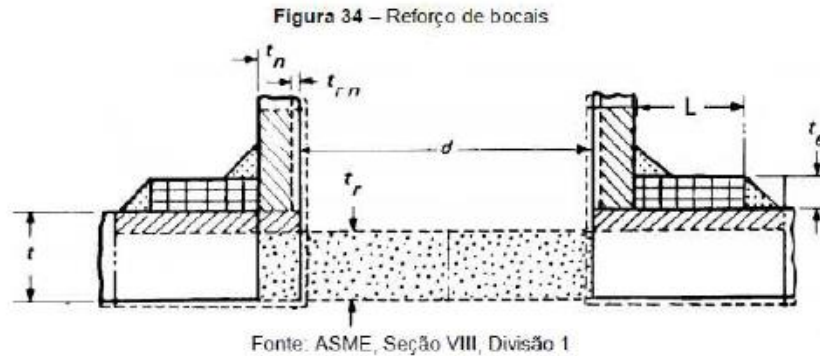
CLASS 150 FLANGES



Nominal Pipe Size	Outside Diam.	O.D of Raised Face	Hub Diameter of Bevel	Diameter of Bore	Thickness of Flange Min	Length Through Hub	DRILLING		Unit: mm
							Diameter of Bolt Circle	Number of Holes	
	D	G	E	B	t	L	C	d	
1/2	89	34.9	30.2	12.7	11.2	228.6	60.5	4	15.7
3/4	99	42.9	38.1	19.1	12.7	228.6	69.9	4	15.7
1	108	50.8	50.8	25.4	14.2	228.6	79.2	4	15.7
1 1/4	117	63.5	60.5	31.8	15.7	228.6	88.9	4	15.7
1 1/2	127	73.0	66.5	38.1	17.5	228.6	98.6	4	15.7
2	152	91.9	82.6	50.8	19.1	228.6	120.7	4	19.1
2 1/2	178	104.6	95.3	63.5	22.4	228.6	139.7	4	19.1
3	191	127.0	108.0	76.2	23.9	228.6	152.4	4	19.1
3 1/2	216	139.7	124.0	88.9	23.9	228.6	177.8	8	19.1
4	229	157.2	139.7	101.6	23.9	304.8	190.5	8	19.1
5	254	185.7	165.1	127.0	23.9	304.8	215.9	8	22.4
6	279	215.9	196.9	152.4	25.4	304.8	241.3	8	22.4
8	343	269.7	247.7	203.2	28.4	304.8	298.5	8	22.4
10	406	323.9	304.8	254.0	30.2	304.8	362.0	12	25.4
12	483	381.0	365.3	304.8	31.8	304.8	431.8	12	25.4
14	533	412.8	406.4	355.6	35.1	304.8	476.3	12	28.4
16	597	469.9	457.2	406.4	36.6	304.8	539.8	16	28.4
18	635	533.4	508.0	457.2	39.6	304.8	577.9	16	31.8
20	699	584.2	558.8	508.0	42.9	304.8	635.0	20	31.8
24	813	699.9	666.6	609.6	47.6	304.8	749.9	24	31.8

Fonte: Catálogo Hydraulic & Offshore Supplies. Adaptado.

ANEXO G: ANÉIS DE REFORÇO DO BOCAL



$$A_1 = d \cdot t_r + 2 \cdot t \cdot t_n$$

→ Área requerida

t_n : Espessura nominal da parede do tubo;

t_r : Espessura mínima do casco/tampo;

t_e : Espessura do anel de reforço;

t_{rn} : Espessura mínima da parede do tubo;

t : Espessura nominal do casco/tampo;

d : Diâmetro do bocal;

L : Largura do anel de reforço.

$$A_2 = d \cdot (t - t_r) - 2 \cdot t_n(t - t_r)$$

→ Área disponível no casco/tampo

$$A_3 = 5 \cdot t(t_n - t_{rn})$$

→ Área disponível da projeção externa do bocal

$$A_4 = 2 \cdot L \cdot t_e$$

→ Área disponível pelo anel de reforço

se $A_2 + A_3 > A_1$
é necessário no bocal:

a desigualdade $A_2 + A_3 > A_1$ não é satisfeita,
o bocal necessita de reforço.

$$L = \frac{d \cdot t_r + 2 \cdot t \cdot t_n - d \cdot (t - t_r) + 2 \cdot t_n(t - t_r) - 5 \cdot t(t_n - t_{rn})}{2 \cdot t_e}$$

Se a condição for atendida

$$A_2 + A_3 + A_4 > A_1$$

o anel de reforço atende de maneira satisfatória.

ANEXO H: DIÂMETRO EXTERNO E ESPESSURA DA PAREDE DO TUBO

TUBOS SEM COSTURA PARA CALDEIRAS E TROCADORES DE CALOR										
NORMAS ASTM A 179, A 192, A 209, A 210, A 213, A 423, DIN 1629, DIN 1630, DIN 17175										
Espessura mm/Peso Kg/mt										
Dex	Pol	Dex mm	1,24	1,47	1,65	1,83	2,11	2,41	2,77	3,05
			BWG 19	BWG 18	BWG 17	BWG 15	BWG 14	BWG 13	BWG 12	BWG 11
½"		12,70	0,42	0,49	0,54					
5/8"		15,88	0,54	0,63	0,69	0,76	0,86	0,96	1,07	
¾"		19,05	0,65	0,76	0,85	0,93	1,06	1,19	1,33	1,44
1"		25,40	0,89	1,04	1,16	1,28	1,45	1,64	1,85	2,02
1.1/4"		31,75			1,47	1,62	1,85	2,09	2,38	2,59
1.3/8"		34,92			1,79	2,05	2,32	2,64	2,88	
1.1/2"		38,10					2,25	2,55	2,90	3,16
1.3/4"		44,45						3,42	3,74	
2"		50,80								4,31
2.1/4"		57,15								
2.1/2"		63,50							4,98	5,46
2.3/4"		69,85								6,03
3"		76,20							6,02	6,6
3.1/4"		82,50								7,17
3.1/2"		88,90								
4"		101,60								
4.1/2"		114,30								
5"		127,00								

OUTROS DIÂMETROS E ESPESSURAS PODERÃO SER PRODUZIDOS MEDIANTE CONSULTA PRÉVIA

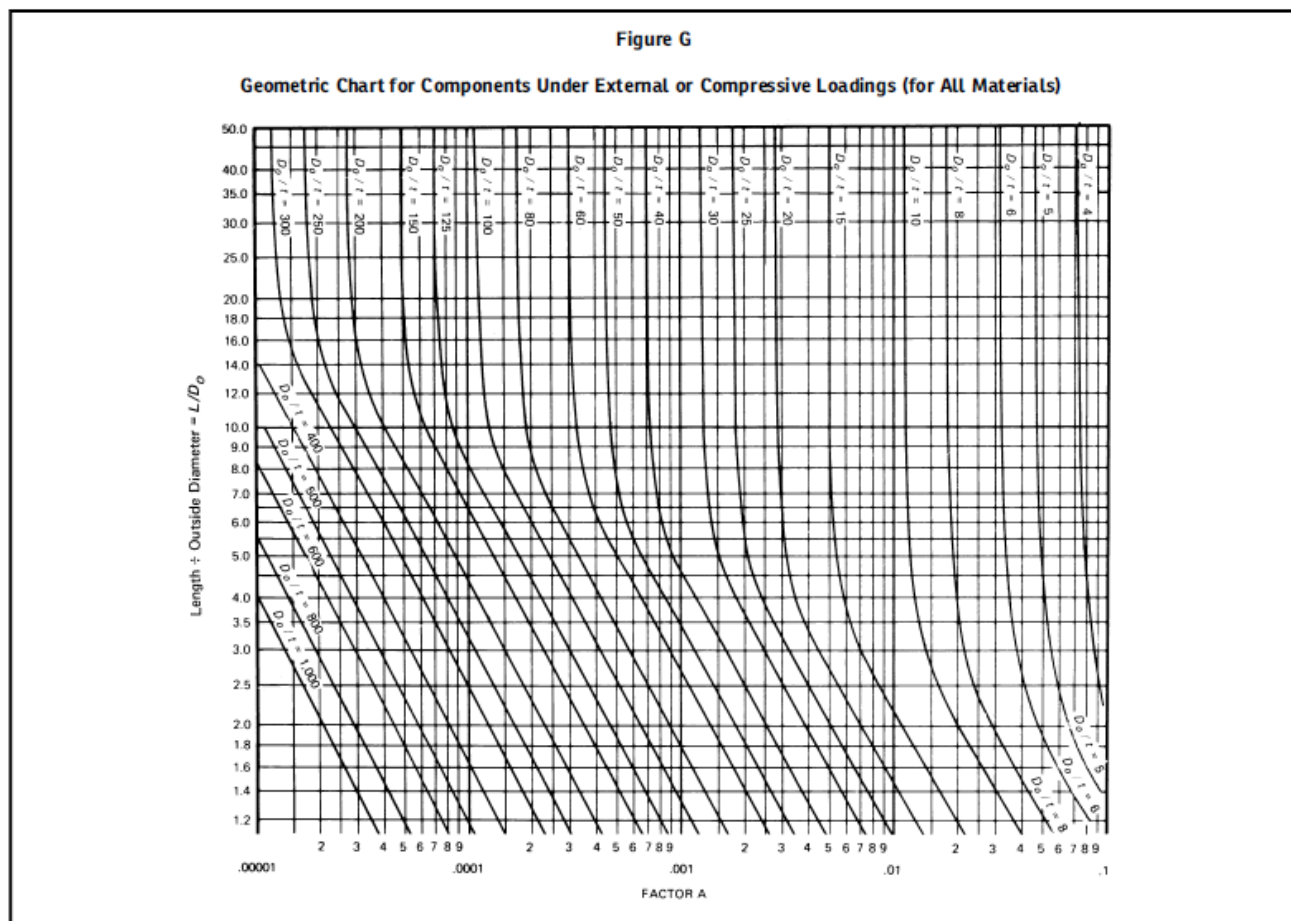
Fonte: Adaptado - <https://www.tubosverola.com.br/tubos-para-caldeiras-e-trocadores-de-calor>

ANEXO I: ESPESSURA PADRÕES DE CHAPAS COMERCIALIZADAS

ESPESSURAS PADRÃO (mm)	
6,30	28,50
8,00	32,50
9,50	35,00
12,50	37,50
16,00	44,50
19,00	50,00
22,40	57,00
25,40	70,00

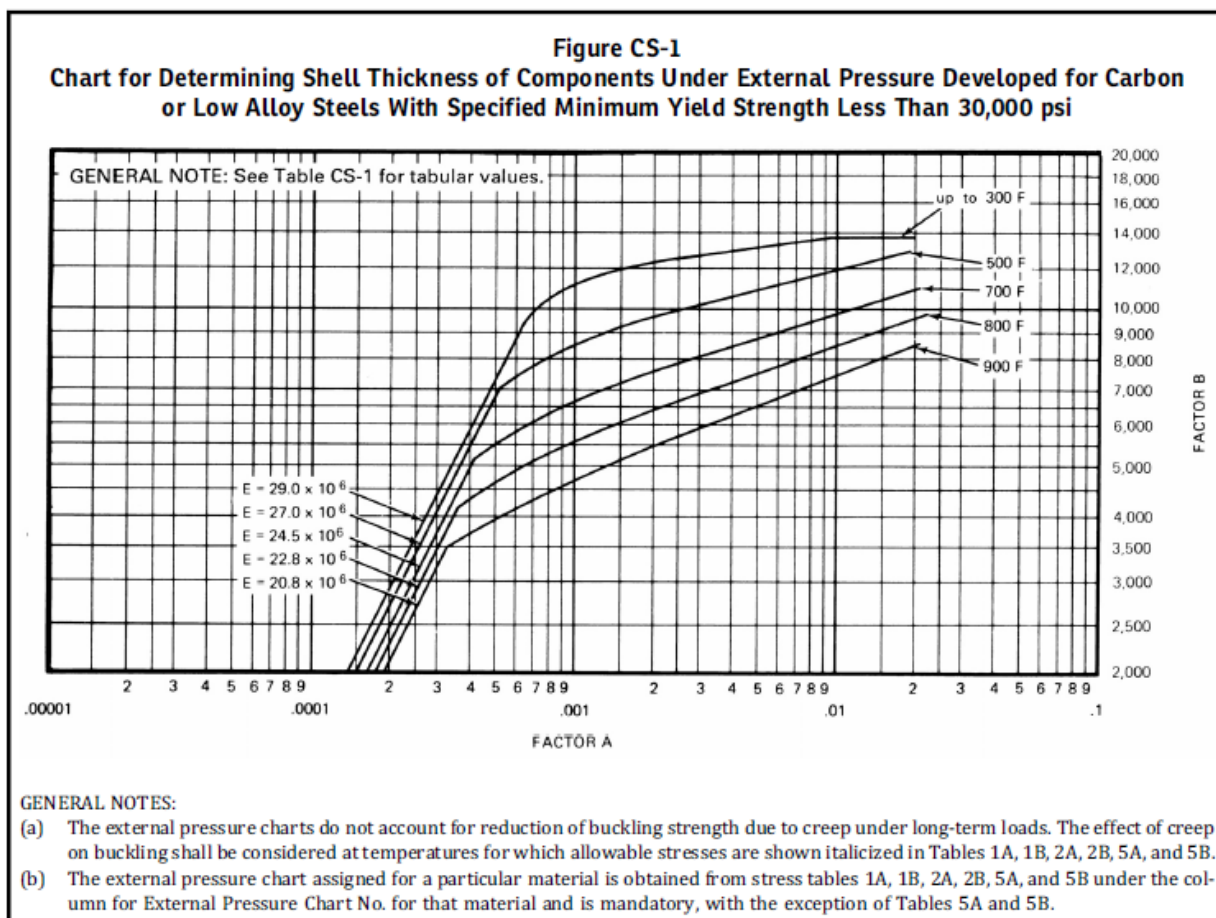
Fonte: Usiminas. Adaptado.

ANEXO J: TABELA GEOMÉTRICA (FATOR A) PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DOS TUBOS A PRESSÃO EXTERNA



Fonte: ASME – SEÇÃO II - 2015. Adaptado.

ANEXO K: TABELA GEOMÉTRICA (FATOR B) PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DOS TUBOS A PRESSÃO EXTERNA



Fonte: ASME – SEÇÃO II - 2015. Adaptado.

ANEXO L: FIGURA DO FATOR DE SUPORTE PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DO ESPELHO

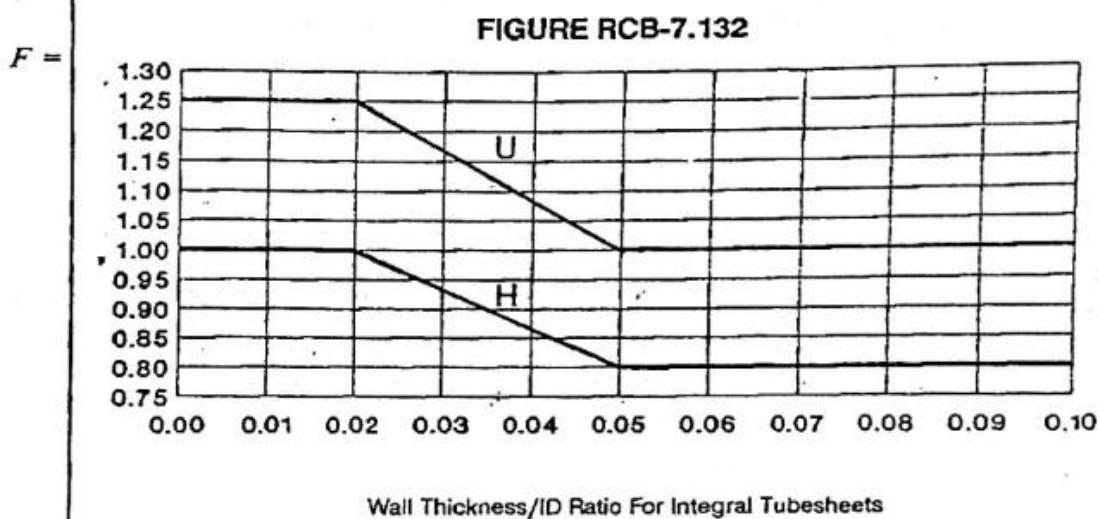
For unsupported tubesheets (e.g.: U-tube tubesheets) gasketed both sides, $F = 1.25$.

For supported tubesheets (e.g.: fixed tubesheets and floating type tubesheets) gasketed both sides, $F = 1.0$.

For unsupported tubesheets (e.g.: U-tube tubesheets) integral with either or both sides, F shall be the value determined by the curve U in

Figure RCB-7.132.

For supported tubesheets (e.g.: fixed tubesheets and floating type tubesheets) integral with either or both sides, F shall be the value determined by the curve H in Figure RCB-7.132.



Fonte: Figura RCB-7.132, TEMA 2007. Adaptado.