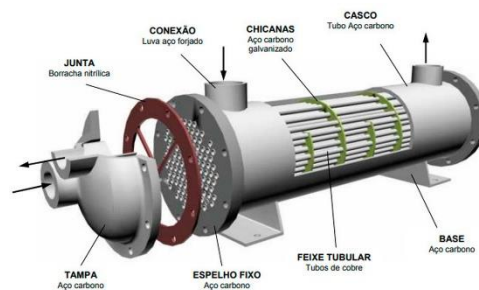
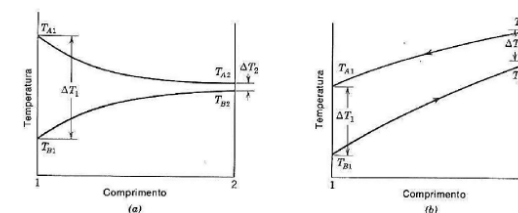




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



Operações Unitárias II



Prof^ª. Dr^ª. Simone Medeiros
Sampaio

simonemedeiros@usp.br

Perda de carga (queda de pressão) em trocadores de calor

Trocadores de calor de casco e tubos

Trocador de casco e tubos



Trocadores de calor de casco e tubos

A – Tubos

D – Cabeçote

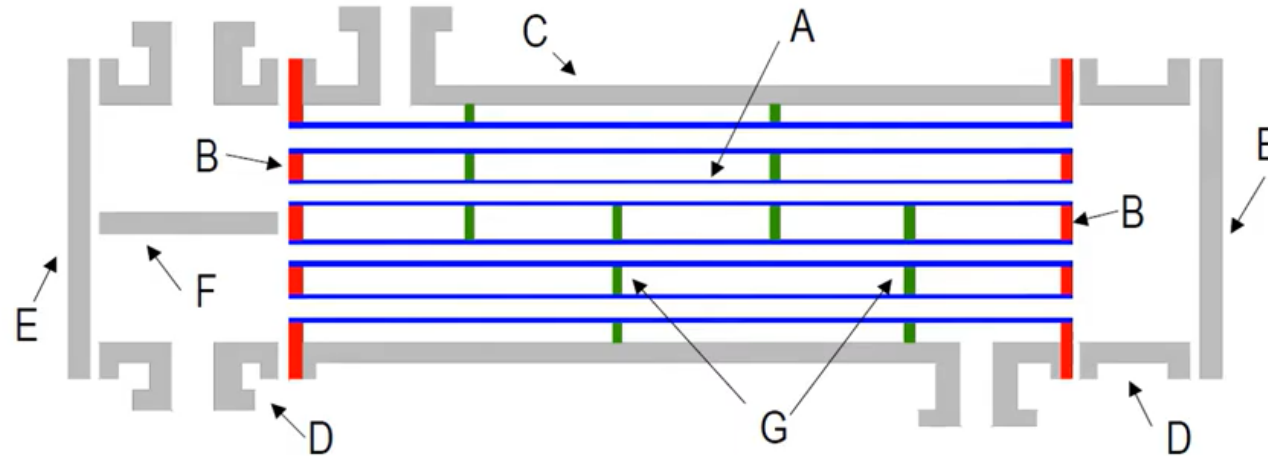
G – Chicanas

B – Espelhos

E – Tampas

C – Casco

F – Divisor



Fonte: Essel: critérios de seleção de um trocador de calor.

Trocador de casco e tubos – Normas e padrões

- Tubular Exchanger Manufacturer Association (www.tema.org).
- Heat Exchanger Design Handbook (www.begellhouse.com).
- VDI Heat Atlas (www.springer.com).

Trocador de casco e tubos – Normas e padrões

Normalmente são divididos por classes (classificação **TEMA**):

Classe R: trocadores para condições severas em indústria de petróleo, com ênfase na durabilidade e segurança.

Classe C: trocadores para condições moderadas em aplicações gerais, para processos com exigências moderadas de segurança, com ênfase em economia.

Classe B: trocadores para indústrias de processos químicos, equivalente à classe R nas exigências de projeto e construção, mas mais próxima a classe C com respeito à espessuras mínimas e limites para corrosão.

Trocador de caso e tubos:

- Para o fluido que circula no interior dos tubos:

$$D_2 \rangle D_1 \quad \text{ou} \quad D_{e,i} \rangle D_{i,i}$$

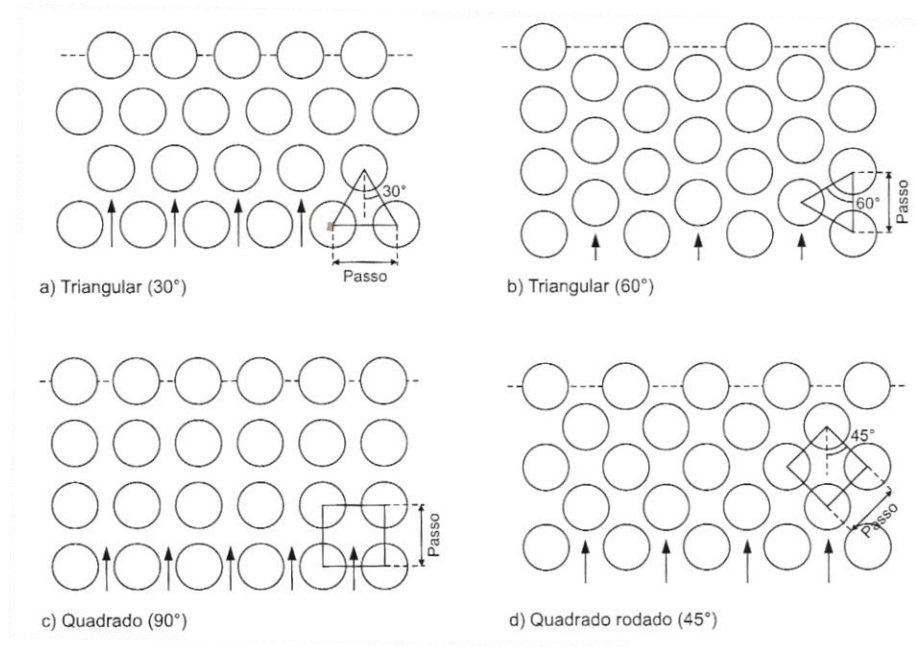
$$D_{e,i} = D_{i,i} + 2 * e$$

Área de escoamento:

$$A = \frac{\pi * D_{i,i}^2}{4}$$

N = número de tubos

Trocador de casco e tubos – Arranjo dos tubos



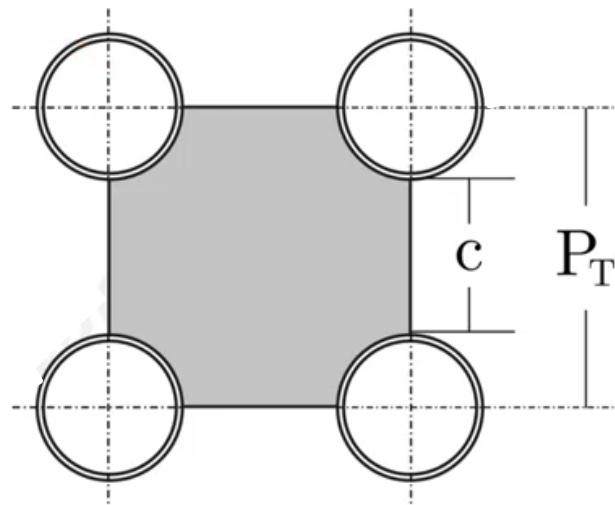
Fonte: Donald Quentin Kern, *Heat Transfer*
Editora Mc-Graw Hill 1950

Trocador de casco e tubos – Arranjo dos tubos

Para o Layout Quadrado

P_T = passo do tubo.

c = espaço entre tubos adjacentes.



$$D_{eq} = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro de transferência de calor}}$$

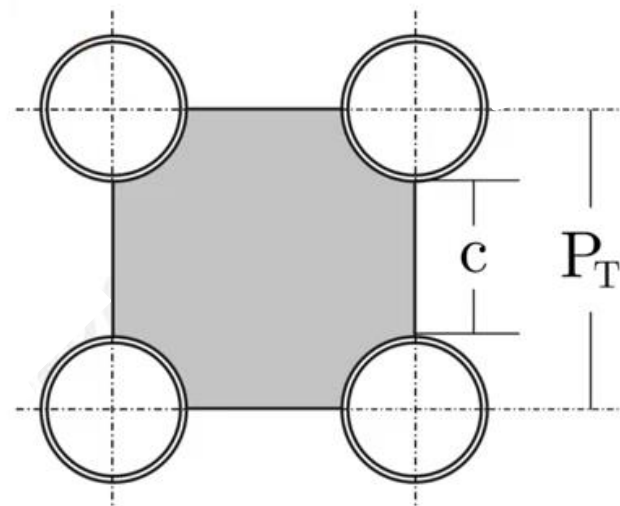
Trocador de casco e tubos – Arranjo dos tubos

Para arranjo quadrado:

Área = quadrado menos $\frac{1}{4}$ de cada círculo

Perímetro = $\frac{1}{4}$ de cada círculo

$$D_{eq} = \frac{4 * \left(P_T^2 - \frac{\pi * D_{e,i}^2}{4} \right)}{\pi * D_{e,i}} = \frac{4 * P_T^2}{\pi * D_{e,i}} - D_{e,i}$$



Trocador de casco e tubos – Arranjo dos tubos

Para arranjo triangular:

$$D_{eq} = \frac{3,46 * P_T^2}{\pi * D_{e,i}} - D_{e,i} \quad A_c = \frac{D_s * C * B}{P_T}$$

Onde:

D_s ... Diâmetro interno do casco;

C ... Espaço entre os tubos adjacentes

B ... Espaçamento entre as chicanas;

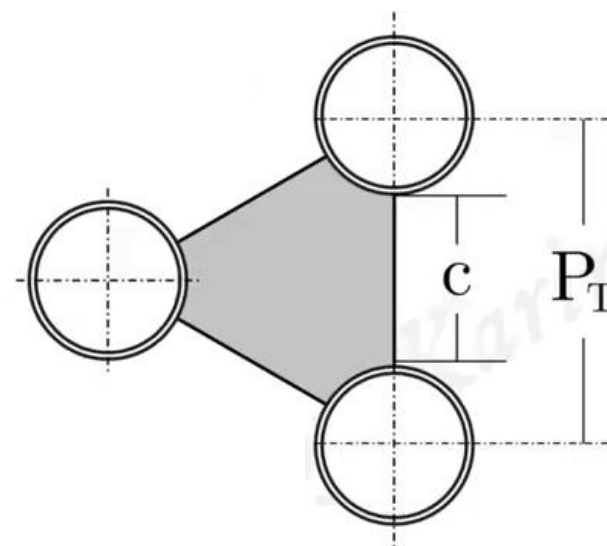
P_T ... Passo do tubo.

Velocidade característica:

$$V_c = \frac{\dot{m}}{\rho * A_c} = \frac{q}{A_c}$$

Velocidade mássica:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_c} = \rho * V_c$$



Trocador de casco e tubos – Cálculo de Nusselt, Reynolds e perda de carga:

$$Nu = \frac{h_e * D_{eq}}{k} = 0,36 * Re^{0,55} * Pr^{0,33}$$

Válido para Re entre $2*10^3$ e $1*10^6$

$$Re = \frac{D_{eq} * V * \rho}{\mu}$$

A queda de pressão do fluido escoando por meio de Np passagens no trocador de calor de casco e tubos pode ser determinada por:

Nos tubos:

$$\Delta P_{tubos} = Np * f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2} * \rho \quad \Delta P_{retorno} = 4 * Np * \frac{V^2}{2} * \rho \quad \Delta P_{Total} = \Delta P_{tubos} + \Delta P_{retorno} = 2 * \frac{\rho * V^2}{2} * \left(\frac{f * L}{D_i} + 4 \right)$$

Trocador de casco e tubos – Cálculo de Nusselt, Reynolds e perda de carga:

$$Nu = \frac{h_e * D_{eq}}{k} = 0,36 * Re^{0,55} * Pr^{0,33}$$

Válido para Re entre $2*10^3$ e $1*10^6$

$$Re = \frac{D_{eq} * V * \rho}{\mu}$$

A queda de pressão do fluido escoando por meio de Np passagens no trocador de calor de casco e tubos pode ser determinada por:

No casco:

$$\Delta P_{tubos} = f * (Nb + 1) \frac{D_{i,casco}}{D_{eq}} * \frac{V^2}{2} * \rho$$

Exemplo:

Em uma instalação de geração de energia elétrica, água destilada deve ser resfriada em um trocador de calor de casco e tubos. A água entra no trocador a 43,3 °C, com uma vazão de 21,4 kg/s e é desejável resfriá-la até 35 °C. O resfriamento será efetuado utilizando água não tratada proveniente de um lago com temperatura de 18,3 °C, a qual entrará com vazão de 18,88 kg/s. Utilizar um trocador de calor com diâmetro interno do casco de 17 ¼" (438,2 mm) e tubos ¾" (Di = 16,55 e De = 19,07 mm), com 2,50 m de comprimento. Os tubos estão dispostos em um passo triangular de 1" (25,4 mm) e o fluido fará duas passagens. O trocador contém 15 chicanas espaçadas com 304,8 mm uma das outras. Determine se o trocador atende as especificações passando a água destilada por 196 tubos lisos, verificando a comprimento necessário e a perda de carga dos dois lados do sistema. Considerar o fator de correção $F = 0,88$.

$$q = U * A * \Delta T$$

➤ Cálculo de q :

$$q = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

- Para a água destilada:

$$q = 21,4 * 4179 * (43,3 - 35)$$

$$q = 742274 \text{ W}$$

- Para a água não tratada:

$$742274 = 18,88 * 4181 * (T_{fs} - 18,3)$$

$$T_{sf} = 27,7^\circ\text{C}$$

- Temperatura média dos fluidos:

$$T_{qm} = \frac{43,3 + 35}{2} = 39,15^\circ\text{C} \quad T_{fm} = \frac{27,7 + 18,3}{2} = 15,33^\circ\text{C}$$

Água destilada a 37,7 °C	$\rho = 995 \text{ kg/m}^3$ $k = 0,625 \text{ W/mK}$ $\nu = 7,05 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $C_p = 4179 \text{ J/kgK}$ $Pr = 4,69$
Água não tratada a 24,8 °C	$\rho = 997,95 \text{ kg/m}^3$ $k = 0,606 \text{ W/mK}$ $\nu = 9,16 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $C_p = 4181 \text{ J/kgK}$ $Pr = 6,32$

➤ **Cálculo de ΔT_{ML} :**

$$\Delta T_1 = 43,3 - 27,7 = 15,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 35 - 18,3 = 16,7^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ML} = \frac{16,7 - 15,6}{\ln\left(\frac{16,7}{15,6}\right)} = 16,25^\circ\text{C}$$

$$F = 0,88$$

$$\Delta T_{corr} = 16,25 * 0,88 = 14,3^\circ\text{C}$$

➤ Cálculo de h_i , h_e e U :

- Nos tubos internos:

Área de escoamento:

$$A = \frac{\pi * (0,01655)^2}{4} * \left(\frac{196}{2} \right)$$

$$A = 0,02107 m^2$$

Usando a regra da vazão, água destilada circulará nos tubos internos.

Velocidade de escoamento:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho * A} = \frac{21,4}{995 * 0,02107}$$

$$V = 1,02 m/s$$

- Na seção anular :

Área de escoamento:

$$C = 0,0254 - 0,01655 - [2 * (0,01907 - 0,01655)] = 0,00633$$

$$A_c = \frac{D_{eq} * C * B}{P_T} = \frac{0,4382 * 0,00633 * 0,3048}{0,0254}$$

$$A = 0,0333 m^2$$

$$Re = \frac{D_{i,i} * V * \rho}{\mu} = \frac{0,01655 * 1,02}{7,05 \cdot 10^{-7}} = 23149$$

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k} = \frac{4179 * (7,05 \cdot 10^{-7} * 995)}{0,625} = 4,69$$

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,3}$$

$$Nu = 0,023 * (23149)^{0,8} * (4,69)^{0,3} = 113,42$$

$$Nu = \frac{h_i * D_{i,i}}{k}$$

$$h_i = \frac{Nu * k}{D_{i,i}}$$

$$h_i = \frac{113,42 * 0,625}{0,01655}$$

$$h_i = 4283,23 W / m^2 K$$

➤ Cálculo de h_i , h_e e U :

- Na seção anular:

Área de escoamento:

$$A_c = \frac{D_{eq} * C * B}{P_T} = \frac{0,4382 * 0,00633 * 0,3048}{0,0254}$$

$$A = 0,0333m^2$$

$$D_{eq} = \frac{3,46 * P_T^2}{\pi * D_{e,i}} - D_{e,i} = \frac{3,46 * 0,0254^2}{\pi * 0,01907} - 0,01907$$

$$D_{eq} = 0,01821m$$

Usando a regra da vazão, água não tratada circulará no casco.

Velocidade de escoamento:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho * A} = \frac{18,88}{997,5 * 0,0333}$$

$$V = 0,5681m / s$$

$$Re = \frac{D_{i,i} * V * \rho}{\mu} = \frac{0,01821 * 0,5681}{9,16.10^{-7}} = 11293,78$$

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{k} = \frac{4181 * (9,16.10^{-7} * 997,95)}{0,606} = 6,31$$

$$Nu = 0,36 * Re^{0,55} * Pr^{0,33}$$

$$Nu = 0,023 * (11293,78)^{0,8} * (6,31)^{0,3} = 112,04$$

$$Nu = \frac{h_i * D_{i,i}}{k}$$

$$h_i = \frac{Nu * k}{D_{i,i}}$$

$$h_i = \frac{112,04 * 0,606}{0,01821}$$

$$h_i = 3728,51W / m^2 K$$

➤ Cálculo de h_i , h_e e U :

- Coeficiente global de troca de calor:

$$\frac{1}{U_e * A_e} = \frac{1}{h_i * A_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{k * 2 * \pi * L} + \frac{1}{h_e * A_e} + \frac{R_{d,i}}{A_i} + \frac{R_{d,e}}{A_e}$$

$$\frac{1}{U_e} = \frac{D_e}{h_i * D_i} + \frac{\ln(r_e / r_i) * D_e}{k * 2} + \frac{1}{h_e} + \frac{R_{d,i} * D_e}{D_i} + R_{d,e}$$

$$\frac{1}{U_e} = \frac{0,01907}{4283,23 * 0,01655} + \frac{1}{3728,51}$$

$$U_e = 1861,50 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$$

➤ **Cálculo da área de superfície de troca térmica, A :**

$$q = U * A * \Delta T$$

$$742274 = 1861,50 * A * 14,3$$

$$A = 27,88 m^2$$

$$A_e = \pi * D_e * L$$

$$27,88 = \pi * 0,01907 * L$$

$$L = 466m \longrightarrow L = 2,38m / tubo$$

$$L_{real} = 2,50m / tubo$$

$$A_{real} = 196 * \pi * 0,01907 * 2,50 = 29,34 m^2$$

$$Erro = \frac{29,34 - 27,88}{27,88} * 100 = 5,2\%$$

O trocador é favorável em termos de troca de calor

➤ *Cálculo da perda de carga:*

- Nos tubos internos lisos:

$$f = 0,0014 + \frac{0,125}{\text{Re}^{0,32}} = 0,006415$$

$$\Delta P_{\text{Total}} = \Delta P_{\text{tubos}} + \Delta P_{\text{retorno}} = 2 * \frac{\rho * V^2}{2} * \left(\frac{f * L}{D_i} + 4 \right)$$

$$\Delta P_{\text{Total}} = 2 * \frac{995 * 1,02^2}{2} * \left(\frac{0,006415 * 2,5}{0,01655} + 4 \right)$$

$$\Delta P_{\text{Total}} = 2 * \frac{995 * 1,02^2}{2} * \left(\frac{0,006415 * 2,5}{0,01655} + 4 \right)$$

$$\Delta P_{\text{Total}} = 5166,79 \text{ kPa}$$

- No casco:

$$f = \exp(0,576 - 0,19 * \ln(\text{Re})) = (0,576 - 0,19 * \ln(11293,78)) = 0,302$$

$$\Delta P_{\text{casco}} = 0, f * (Nb + 1) \frac{D_{i,\text{casco}}}{D_{eq}} * \frac{V^2}{2} * \rho$$

$$\Delta P_{\text{casco}} = 0,302 * (15 + 1) \frac{0,4382}{0,01821} * \frac{0,5681^2}{2} * 997,95$$

$$\Delta P_{\text{casco}} = 18724,75 \text{ kPa}$$