



ROTEIRO DE CÁLCULO

Este roteiro de cálculo se aplica ao projeto de trocadores de calor casco e tubos, sem mudança de fase

1. Determinar qual fluido passa pelo tubo e qual passa pelo casco
2. Diferença de temperaturas
 - a. Explicitar as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos quente e frio
 - b. Calcular MLDT
 - c. Calcular F
 - d. Verificar se há necessidade de cascos em série
 - e. Determinar ΔT_m

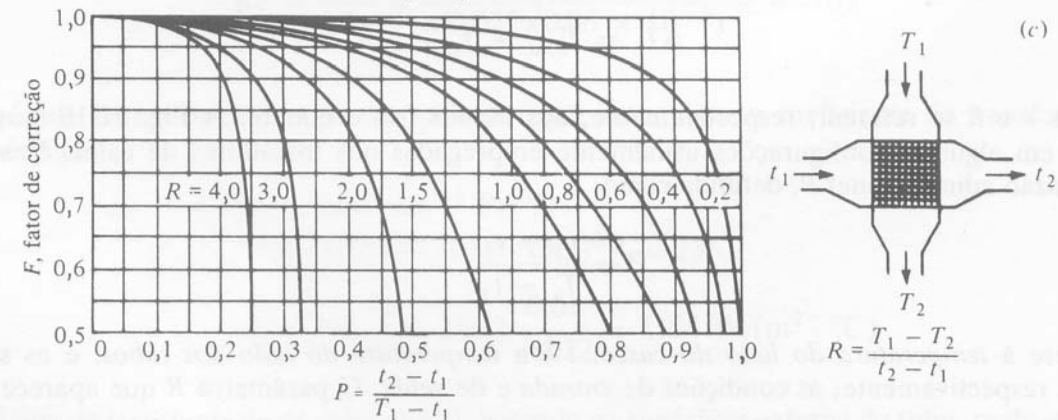
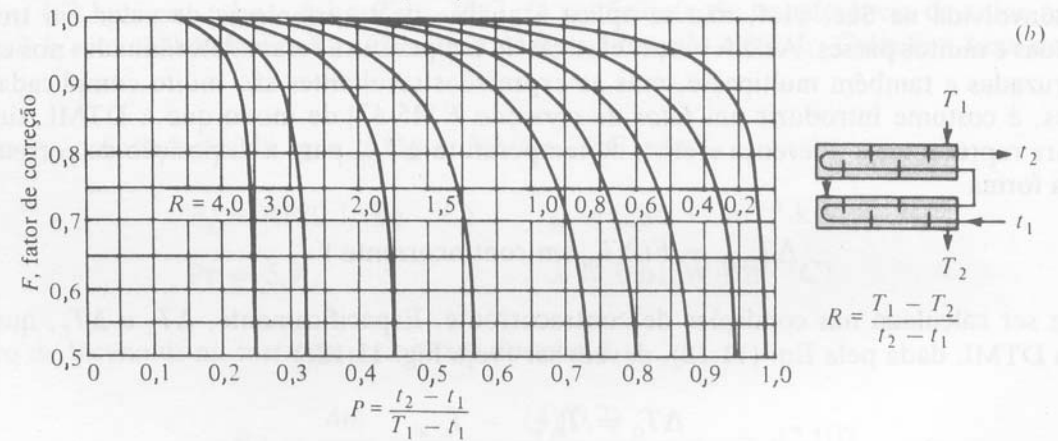
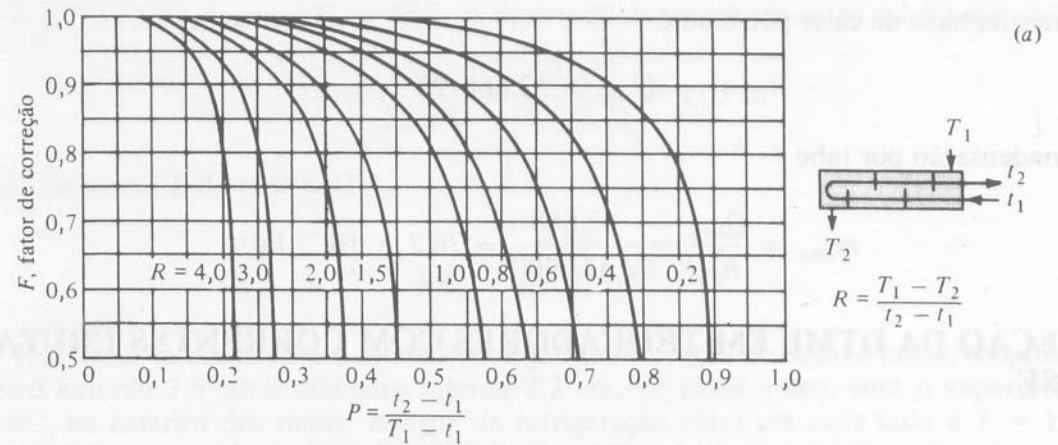
$$MLDT = \frac{(T_{q2} - T_{f2}) - (T_{q1} - T_{f1})}{\ln \left(\frac{T_{q2} - T_{f2}}{T_{q1} - T_{f1}} \right)}$$

$$\Delta T_m = F MLDT$$

$$q = UA \Delta T_m$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(\dot{m}C_p)_{\text{lado do tubo}}}{(\dot{m}C_p)_{\text{lado do casco}}}$$



3. Temperatura média dos fluidos

a. Para os tubos $T_t = \frac{T_{t1} + T_{t2}}{2}$

b. Para o casco

$$T_c = \frac{T_{c1} + T_{c2}}{2}$$

4. Propriedades médias dos fluidos

a. Calcular a massa específica ρ_t , a viscosidade μ_t , o calor específico Cp_t e a condutividade térmica k_t do fluido dos tubos na temperatura T_t

b. Calcular a massa específica ρ_c , a viscosidade μ_c , o calor específico Cp_c e a condutividade térmica k_c do fluido do casco na temperatura T_c

5. Descargas através dos tubos e do casco (vazão em massa)
6. Fatores de incrustação
 - a. Determinar o fator de incrustação dentro dos tubos R_{di}
 - b. Determinar o fator de incrustação fora dos tubos R_{de}
7. Características do projeto mecânico
 - a. Determinar os bocais de entrada e saída do lado dos tubos e do casco
 - b. Determinar a temperatura e pressão de operação para os tubos e para o casco

8. Cálculo do número de tubos no trocador
- Admitir um valor estimado para U
 - Calcular a área de troca de calor
 - Calcular a área de troca por casco
 - Escolher o comprimento dos tubos L' , os diâmetros (d_i e d_e), a disposição e a distância entre centros

$$A = \frac{Q}{U \times \Delta T_m} \quad (b)$$

$$A_{tc} = \frac{A}{N_c} \quad (c)$$

$$n = \frac{A_{tc}}{\pi d_e (L' - 2e)} \quad (d)$$

9. Coeficientes de película dentro dos tubos

a. Admitir o número de trajetos nos tubos N_t

b. Calcular o número de tubos por trajeto $n_t = \frac{n}{N_t}$

c. Calcular a velocidade média do fluido escoando dentro dos tubos $V_t = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t n_t S_{ti}}$

d. Calcular o número de Reynolds para o escoamento nos tubos $Re_t = \frac{\rho_t V_t d_i}{\mu_t}$

e. Determinar o regime de escoamento: laminar, transitório ou turbulento

f. Escolher a expressão apropriada para o coeficiente de transferência de calor



A expressão para hi é geralmente função do número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu_t C_{p_t}}{k_t}$$

OBS: Admitir se necessário, e conforme a expressão utilizada, que a correção para o escoamento não isotérmico é igual a 1 na primeira iteração, até que a temperatura da parede do tubo seja estimada

10. Perda de carga do escoamento através dos tubos

a. Perda de carga nos bocais

- Calcular V_{bt}
- Calcular Δp nos bocais

b. Perda de carga na contração, expansão e retorno no cabeçote

- Determinar τ_c , K_c e calcular $\Delta p_{\text{contrações}}$
- Determinar τ_e , K_e e calcular $\Delta p_{\text{expansão}}$

Ou alternativamente calcular Δp para contração, expansão e retorno para tubos retos ou tubos em U

c. Perda de carga por atrito nos tubos

c. Perda de carga por atrito nos tubos

- Calcular o coeficiente de atrito isotérmico
- Estimar a temperatura na superfície interna dos tubos

$$T_{ti} = T_t + U \left(R_{di} + \frac{1}{h_i} \right) \frac{d_e}{d_i} (T_c - T_t)$$

- Calcular o fator de correção para escoamento não isotérmico

$$\alpha = \left(\frac{\mu_{ti}}{\mu_t} \right)^{0,14}$$

- Calcular o coeficiente de atrito não isotérmico

$$f' = \alpha \times f$$

- Calcular a perda de carga por atrito nos tubos

$$\Delta p_t = f \frac{L}{d_i} \frac{\rho_t V_t^2}{2} N_t$$

- d. Calcular a perda de carga total para o fluido escoando nos tubos, de bocal a bocal

$$\Delta p_t = N_c \left(\Delta p_{bocais} + \Delta p_{contr,exp,retor} + \Delta p_f \right)$$

- e. Para levar em conta o efeito dos depósitos na perda de carga a tabela a seguir fornece valores de correção

Se a perda de carga for muito alta ou muito baixa mudar o número de trajetos nos tubos e repetir os cálculos até que Δp seja satisfatória

| De (pol) | BWG | Material | |
|-------------|-----|----------|------------------|
| | | aço | Liga não ferrosa |
| 3/4 | 18 | 1,28 | 1,14 |
| | 16 | 1,34 | 1,17 |
| | 14 | 1,41 | 1,20 |
| | 12 | 1,53 | 1,26 |
| 1 | 16 | 1,24 | 1,10 |
| | 14 | 1,28 | 1,12 |
| | 12 | 1,35 | 1,15 |
| | 10 | 1,43 | 1,19 |
| 1 1/4 | 14 | 1,18 | |
| | 12 | 1,21 | |
| | 10 | 1,25 | |
| | 8 | 1,31 | |

11. Diâmetro interno do casco

a. Número de tubos na fileira central do feixe

- Disposição triangular dos tubos

$$n_c = 1,10(n)^{1/2}$$

- Disposição quadrangular dos tubos

$$n_c = 1,19(n)^{1/2}$$

b. Diâmetro do feixe de tubos

$$D_f = (n_c - 1)s + de$$

c. Diâmetro interno do casco (conforme tabela)

Observar que, segundo as relações geométricas admitidas por Tinker:

$$D_i = 1,075 \cdot D_f$$

| Di (pol) | Df (pol) | | | |
|-------------|------------------------|---------------------------------|--|----------------|
| | Espelho fixo/tubo U | Espelho flutuante com gaxeta | Espelho flutuante removível pelo carretel | Anel bipartido |
| 10,02 | 9,62 | 8,52 | 6,42 | 8,02 |
| 12,09 | 11,67 | 10,59 | 8,49 | 10,04 |
| 13,38 | 12,95 | 11,88 | 9,78 | 11,30 |
| 15,23 | 14,81 | 13,75 | 11,65 | 13,11 |
| 17,25 | 16,79 | 15,75 | 13,65 | 15,06 |
| 19,25 | 18,78 | 17,75 | 15,65 | 17,00 |
| 21,25 | 20,75 | 19,75 | 17,65 | 18,96 |
| 23,00 | 22,50 | 21,50 | 19,40 | 20,66 |
| 27,00 | 26,46 | 25,50 | 23,40 | 24,56 |
| 31,00 | 30,43 | 29,50 | 27,40 | 28,45 |
| 35,00 | 34,40 | 33,50 | 31,30 | 32,33 |
| 39,00 | 38,37 | 37,50 | 35,30 | 36,25 |
| 42,00 | 41,34 | 40,50 | 38,25 | 39,14 |
| 48,00 | 47,30 | 46,50 | 44,20 | 45,04 |
| 51,00 | 50,27 | 49,50 | 47,20 | 47,93 |
| 54,00 | 53,24 | 52,50 | 50,10 | 50,83 |
| 60,00 | 59,21 | 58,50 | 56,00 | 56,72 |

12. Admitir um valor para a distância entre chicanas adjacentes
13. Corte da chicana H/D_i
 - Em função de D_i/l obter o corte da chicana H/D
14. Número de chicanas N_B
 - a. Calcular o comprimento mínimo de tubo entre o espelho e a chicana de entrada
 - Calcular o fator l_{1f}
 - Calcular o comprimento mínimo de tubo $l_{1mín}$
 - b. Calcular o comprimento mínimo de tubo entre o espelho e a chicana de saída
 - Calcular o fator l_{2f}
 - Calcular o comprimento mínimo de tubo $l_{2mín}$

$$l_1 \geq l_{1mín}$$

$$l_2 \geq l_{2mín}$$

c. Calcular o número de chicanas

- Se N_B não for inteiro deve-se ajustar os valores de l , l_1 e/ou l_2 para que isto aconteça. Observar a limitação relativa ao comprimento máximo não suportado de tubo

$$N_B = \frac{L - l_1 - l_2}{l} + 1$$

- Para dois trajetos no casco

$$N_B = 2 \left(\frac{L - l_1}{l} \right)$$

15. Perda de carga no casco

- a. Fluxo de massa G_{cf}
 - Determinar N_p nas tabelas de Tinker
 - Calcular F_p
 - Calcular Sc
 - Calcular Sc_f e G_{cf}
- b. Número de Reynolds para o cálculo da perda de carga no casco
- c. Coeficiente de atrito para o escoamento no casco f_c
- d. Determinar C_x
- e. Determinar Y

- f. Determinar Tte
- g. Calcular ΔP_c
- h. Perda de carga nos bocais do casco
 - a. Calcular V_{bc}
 - b. Obter Z do gráfico
 - c. Calcular ΔP_{bocal}
 - d. O procedimento deve ser aplicado aos bocais de entrada e saída ΔP_{b1} e ΔP_{b2}
- i. Perda de carga total no escoamento através do casco

$$\Delta p_{c(total)} = (\Delta p_c + \Delta p_{b1} + \Delta p_{b2}) N_c$$

Não é necessário correção devido a formação de depósito.
Se Δp for razoável prossegue o cálculo, se for muito alto ou baixo, retorna ao passo 12

16. Coeficiente de película para o escoamento no casco

- a. Calcular fluxo de massa Gch
- Determinar Nh nas tabelas de Tinker
 - Calcular Fh
 - Determinar M nas tabelas de Tinker
 - Calcular Sch e Gch
- b. Calcular número de Reynolds para o cálculo do coeficiente de película para o escoamento no casco Re_h
- c. Calcular coeficiente de película he_B

d. Correção do coeficiente de película Ec

- Determinar l_B $l_B = l \times (N_B - 1)$
- Calcular Ec

e. Coeficiente de película corrigido he

17. Coeficiente global de transferência de calor
 U

18. Área de troca de calor necessária

$$A' = \frac{Q}{U' \times \Delta T_m}$$

Se A' não coincidir com A calculado no passo 8.b dentro de um intervalo de 5%, retornar ao item 8.a e arbitrar outro valor de U



Exemplo numérico

Próxima aula