



## **ROTEIRO DO PROJETO: DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR**

### **1. OBJETIVOS DO PROJETO**

- Comparar a área de troca térmica obtida a partir do dimensionamento usando a equação de projeto ( $q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \cdot F_{MLDT}$ ) com a área real (exemplo para trocador a placas:  $A_{ftotal} = n^{\circ}_{placas} \cdot A_{fplaca}$ ) da empresa. A partir da comparação entre as áreas totais de troca de calor, pode-se discutir possíveis diferenças relacionadas à dissipação de calor e às incrustações do trocador de calor.
- Visualizar um trocador de calor em funcionamento dentro de empresas para que o contato entre a graduação e a indústria seja estreitado, além de colocar em prática o aprendizado vivenciado em sala de aula.

### **2. DADOS E QUESTÕES RELEVANTES**

- a. Propriedades do alimento escolhido
- b. Fluxograma do processamento
- c. Quais as temperaturas de entrada e saída dos fluidos?
- d. Quais as vazões dos fluidos?
- e. Qual a área efetiva de cada placa térmica/tubo? (Pode ser obtida no catálogo do trocador de calor)
- f. Qual a quantidade de placas térmicas/tubos?
- g. Quais os números de passes dos fluidos?
- h. Qual a condutividade da placa térmica/tubo?
- i. De onde o produto é bombeado e por quantas placas ele passa?
- j. De quanto em quanto tempo realiza-se a limpeza do trocador de calor? Como é esse processo? A limpeza realizada é suficiente para retirar as incrustações?
- k. Tirar uma foto do trocador de calor

#### **Se trocador a placas:**

- l. Qual o fator de alargamento da área da placa ( $f_{AP}$ )?
- m. Qual a largura entre as gaxetas da placa ( $w_g$ )?



- n. Qual a espessura da placa ( $e_p$ )?
- o. Quais os números de canais?
- p. Qual a espessura do canal ( $e_c$ )? (Necessário para calcular velocidade)

**Se trocador casco e tubo:**

- q. Qual o diâmetro do casco?
- r. Qual o diâmetro do tubo (interno e externo)?
- s. Quais os passos entre as chicanas (se aplicável) e os passos entre os centros do tubo?
- t. Qual a área de escoamento na janela (se aplicável)?

### 3. CÁLCULO DA ÁREA EFETIVA DE TROCA TÉRMICA TEÓRICA

#### I) Trocador de calor a placas

##### a. Cálculo da velocidade

Primeiramente, é necessário realizar o cálculo do diâmetro hidráulico, conforme Equação 1.

$$D_h = \frac{2e_c}{f_{AP}} \quad \text{Equação 1.}$$

Em seguida, deve ser realizado o cálculo da área de seção transversal, conforme Equação 2.

$$A_s = e_c \cdot w_g \quad \text{Equação 2.}$$

Para calcular a velocidade de cada fluido deve ser utilizada a Equação 3, na qual  $Q$  é a vazão volumétrica de cada fluido,  $n_c$  é o número de canais totais e  $n_p$  é o número de passes.

$$v = \frac{Q}{\frac{n_c}{n_p} A_s} \quad \text{Equação 3.}$$

##### b. Cálculo dos números adimensionais

Para o cálculo do número de Reynolds utiliza-se a Equação 4 e para o cálculo do número de Prandtl utiliza-se a Equação 5.

Equação 4.



$$N_{Re} = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Equação 5.}$$

Para o cálculo de Nusselt utiliza-se a **Equação 6 (para trocador de placas)** e para encontrar o valor do coeficiente convectivo de troca térmica utiliza-se a Equação 7. Os valores  $b_1$  e  $b_2$  podem ser encontrados na tabela 10.3. sendo que esses são valores dependentes do número de Reynolds e do ângulo da placa térmica.

$$Nu = b_1 Re^{b_2} Pr^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_p}\right)^{0,14} \quad \text{Equação 6.}$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad \text{Equação 7.}$$

**Tabela 10.3** Parâmetros de troca térmica para um trocador de calor de placas com padrão espinha de peixe

$\phi$	$N_{Re}$	$b_1$	$b_2$
$\leq 30^\circ$	$\leq 10$	0,718	0,349
	$> 10$	0,348	0,663
$45^\circ$	$< 10$	0,718	0,349
	10 – 100	0,400	0,598
$50^\circ$	$> 100$	0,300	0,663
	$< 20$	0,630	0,333
$60^\circ$	20 – 300	0,291	0,591
	$> 300$	0,130	0,732
$\geq 65^\circ$	$< 20$	0,562	0,326
	20 – 400	0,306	0,529
$\geq 65^\circ$	$> 400$	0,108	0,703
	$< 20$	0,562	0,326
$\geq 65^\circ$	20 – 500	0,331	0,503
	$> 500$	0,087	0,718

Fonte: Saunders (1988).



### c. Cálculo do coeficiente global de troca térmica

Após o cálculo dos coeficientes convectivos de troca térmica frio e quente, deve ser realizado o cálculo do coeficiente global de troca térmica limpo conforme a Equação 8. Para realizar o cálculo do coeficiente global de troca térmica sujo deve-se pesquisar na teoria (tabelas ou exercícios fornecidos em sala de aula) os valores das resistências para os fluidos utilizados na indústria em questão. Prosseguir com o cálculo do  $U_{\text{sujo}}$  conforme a Equação 9.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{e}{k \cdot A} + \frac{1}{h_q \cdot A_q} \quad \text{Equação 8.}$$

$$\frac{1}{U_{\text{sujo}} \cdot A} = \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{e}{k \cdot A} + \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{R_{\text{incf}}}{A_f} + \frac{R_{\text{incq}}}{A_q} \quad \text{Equação 9.}$$

### d. Cálculo da temperatura média logarítmica

A partir da Equação 10 o cálculo de  $\Delta T_m$  deverá ser realizado, levando em conta a conformação do trocador de calor: contracorrente ou concorrente.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Equação 10.}$$

### e. Cálculo da área efetiva de troca térmica

Para o cálculo da área efetiva de troca térmica, deverá ser calculado a carga térmica ( $q$ ), conforme a Equação 11. Lembrando que a Equação 11 vale tanto para os dados do fluido quente quanto para o fluido frio, já que teoricamente eles são iguais:  $q_q = q_f$ .

$$q_q = m_q C_{Pq} \Delta T_q \quad \text{Equação 11.}$$

Para proceder com o cálculo da área efetiva de troca térmica da placa deverá ser utilizada a Equação 12 (equação de projeto) tanto para  $U_{\text{limpo}}$  quanto para  $U_{\text{sujo}}$ .  $F_{\text{MLDT}}$  deverá ser obtido a partir dos gráficos disponibilizados nos arquivos dados em aula.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m F_{\text{MLDT}} \quad \text{Equação 12.}$$



## II) Trocador de calor casco e tubo

### a. Cálculo da velocidade

Para o cálculo da velocidade é necessário primeiramente calcular as áreas de seção transversal do escoamento do tubo e do escoamento do casco, sendo que a área da seção transversal do casco deve ser calculada conforme a Equação 13.

$$A_S = \sqrt{A_{c1} \cdot A_{c2}} \quad \text{Equação 13.}$$

Sendo que  $A_{c1}$  deve ser calculada conforme a Equação 14 e  $A_{c2}$  conforme a Equação 15, em que  $D_c$  é o diâmetro do casco,  $D_{ext}$  é o diâmetro externo do tubo,  $S_c$  é o passo entre as chicanas,  $S_t$  é o passo entre o centro dos tubos e  $A_{janela}$  é a área da janela do casco (sem as chicanas).

$$A_{c1} = A_{janela} - n^{\circ}_{tubos} \cdot \pi \cdot \frac{D_{ext}^2}{4} \quad \text{Equação 14.}$$

$$A_{c2} = S_c \cdot D_c \cdot (1 - D_{ext}/S_t) \quad \text{Equação 15.}$$

A área da seção transversal do tubo deve ser calculada conforme a Equação 16, em que  $D_{int}$  é o diâmetro interno do tubo.

$$A_S = \pi \cdot \frac{D_{int}^2}{4} \cdot n^{\circ}_{tubos} \quad \text{Equação 16.}$$

Para calcular a velocidade deve ser utilizada a Equação 17, em que  $Q$  é a vazão volumétrica do fluido.

$$v = \frac{Q}{A_S} \quad \text{Equação 17.}$$

### b. Cálculo dos números adimensionais

Para o cálculo do número de Reynolds utiliza-se a Equação 4 e para o cálculo do número de Prandtl utiliza-se a Equação 5, exibidas anteriormente.

Para o cálculo de Nusselt existem diversas correlações que podem ser visualizadas na Tabela 8.4. A sua utilização vai depender dos valores dos números adimensionais Reynolds e Prandtl. Para o cálculo do coeficiente convectivo de troca

térmica, utiliza-se a Equação 7 exibida anteriormente. Para o lado do casco, existe uma correlação simplificada que foi usada em aula/exercício.

**TABELA 8.4** Resumo das correlações de convecção para escoamento em um tubo circular<sup>a,b,c</sup>

CORRELAÇÃO		CONDIÇÕES
$f = 64/Re_D$	(8.19)	Laminar, plenamente desenvolvido
$Nu_D = 4,36$	(8.53)	Laminar, plenamente desenvolvido, $q_w^*$ uniforme, $Pr \geq 0,6$
$Nu_D = 3,66$	(8.55)	Laminar, plenamente desenvolvido, $T_w$ uniforme, $Pr \geq 0,6$
$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{1/4}}$	(8.56)	Laminar, comprimento térmico de entrada ( $Pr \geq 1$ ou um comprimento inicial não-aquecido), $T_w$ uniforme
ou		
$\overline{Nu}_D = 1,86 \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.57)	Laminar, comprimento de entrada combinado ( $[Re_D Pr(L/D)^{1/3}(\mu/\mu_s)^{0,14}] \geq 2$ , $T_w$ uniforme, $0,48 < Pr < 16.700$ , $0,0044 < (\mu/\mu_s) < 9,75$ )
$f = 0,316 Re_D^{-1/4}$	(8.20a) <sup>c</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \leq 2 \times 10^4$
$f = 0,184 Re_D^{-1/5}$	(8.20b) <sup>c</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \geq 2 \times 10^4$
ou		
$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$	(8.21) <sup>c</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$
$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n$	(8.60) <sup>d</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,6 \leq Pr \leq 160$ , $Re_D \geq 10.000$ , $(L/D) \geq 10$ , $n = 0,4$ para $T_w > T_m$ e $n = 0,3$ para $T_w < T_m$
ou		
$Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.61) <sup>d</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,7 \leq Pr \leq 16.700$ , $Re_D \geq 10.000$ , $(L/D) \geq 10$
ou		
$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	(8.63) <sup>d</sup>	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,5 < Pr < 2000$ , $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ , $(L/D) \geq 10$
$Nu_D = 4,82 + 0,0185(Re_D Pr)^{0,827}$	(8.65)	Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, $q_w^*$ uniforme, $3,6 \times 10^3 < Re_D < 9,05 \times 10^5$ , $10^2 < Pr < 10^4$
$Nu_D = 5,0 + 0,025(Re_D Pr)^{0,8}$	(8.66)	Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, $T_w$ uniforme, $Pr \geq 100$

### c. Cálculo do coeficiente global de troca térmica

Após o cálculo dos coeficientes convectivos de troca térmica frio e quente, deve ser realizado o cálculo do coeficiente global de troca térmica conforme a Equação 18. Para realizar o cálculo do coeficiente global de troca térmica sujo deve-se pesquisar na teoria (tabelas ou exercícios fornecidos em sala de aula) os valores das resistências para os fluidos utilizados na indústria em questão. Prosseguir com o cálculo do  $U_{\text{sujo}}$  conforme a Equação 19, na qual  $A_{\ln}$  é a área média logarítmica.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{e}{k \cdot A_{\ln}} + \frac{1}{h_f \cdot A_f} \quad \text{Equação 18.}$$

Equação 19.



$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{e}{k \cdot A_{ln}} + \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{R_{inc_f}}{A_f} + \frac{R_{inc_q}}{A_q}$$

**d. Cálculo da temperatura média logarítmica**

A partir da Equação 10 o cálculo de  $\Delta T_m$  deverá ser realizado, levando em conta a conformação do trocador de calor.

**e. Cálculo da área efetiva de troca térmica**

Para o cálculo da área efetiva de troca térmica, deverá ser calculado a carga térmica ( $q$ ), conforme a Equação 11. Lembrando que a Equação 11 vale tanto para os dados do fluido quente quanto para o fluido frio, já que teoricamente eles são iguais:  $q_q = q_f$ . Para proceder com o cálculo da área efetiva de troca térmica da placa deverá ser utilizada a Equação 12, tanto para  $U_{sujo}$  quanto para o  $U_{limpo}$ . Lembrando que  $F_{MLDT}$  deverá ser obtido a partir dos gráficos disponibilizados nos arquivos dados em aula.