



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Faculdade de Ciências Farmacêuticas FBT0530 - Física Industrial

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A maioria dos processos que acontecem nas indústrias farmacêutica e de alimentos envolve o aquecimento e o resfriamento de materiais durante operações e processos unitários, como refrigeração, congelamento, esterilização, secagem, evaporação e cristalização, entre outros. Estes processos envolvem a transferência de calor entre um produto e um meio de aquecimento ou resfriamento. Estas mudanças de temperatura são necessárias, por exemplo, para prevenir degradação enzimática ou microbiana, além de conferir propriedades sensoriais desejáveis, como cor, sabor e textura.

O estudo da transferência de calor é indispensável para o entendimento da operação de vários processos industriais. Nesta aula, serão apresentados os fundamentos da transferência de calor e será discutido como estes fundamentos estão relacionados aos processos industriais e à operação de equipamentos de troca de calor.

1. PROPRIEDADES TÉRMICAS

1.1. Calor específico

- ▶ Quantidade de calor trocada por unidade de massa para modificar a temperatura do material em 1 °C, sem que ocorra mudança de estado

$$c_p = Q/m \cdot \Delta T, \text{ (da equação } Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T)$$

Q = quantidade de calor (J)

m = massa (kg)

ΔT = mudança de temperatura no material (°C)

c_p = calor específico (J/kg.°C)

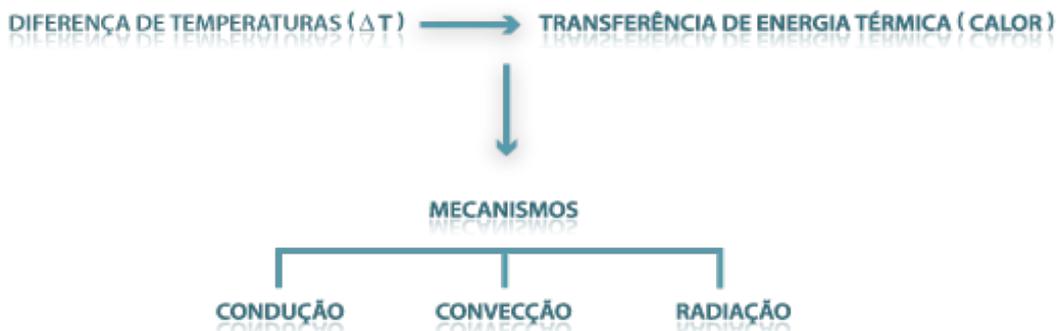
- ▶ Função da composição química do material
- ▶ Pode ser calculado ou consultado em tabelas

1.2. Condutividade térmica

- ▶ Constante de proporcionalidade

- ▶ Depende da natureza do material
- ▶ Quantidade de calor conduzida por unidade de tempo por uma material de determinada espessura sujeito a um gradiente de temperatura
- ▶ $k = [J/s.m.^{\circ}C] = [W/m.^{\circ}C]$
 - ▶ $^{\circ}C$ ou K

2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR



2.1. CONDUÇÃO

- ▶ Postulado de Fourier
 - ▶ Lei Fundamental da Condução de Calor

$$q_K = -kA \frac{dT}{dx}$$

- ▶ Onde:
 - ▶ q_K = fluxo de calor (J/s) = Q/t
 - ▶ k = condutividade térmica do material (J/s.m. $^{\circ}C$)
 - ▶ A = área da secção transversal (m²)
 - ▶ dT/dx = gradiente de temperatura na secção ou variação de temperatura na direção x ($^{\circ}C/m$)

2.1.1. SISTEMAS PLANOS

EXEMPLO 1. Uma das faces de uma placa de aço inox com 1 cm de espessura é mantida a 110 °C, enquanto a outra está a 90 °C. Calcule a quantidade de calor transferida através da placa, por unidade de área. A condutividade térmica do aço inox é 17 W/m.°C. (Resp.: $q = 34.000 \text{ W ou J/s}$)

2.1.1.1. CONCEITO DE RESISTÊNCIA TÉRMICA

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

$$q_x = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$q_x \frac{(x_2 - x_1)}{kA} = -(T_2 - T_1)$$

$$q_x \frac{(x_2 - x_1)}{kA} = (T_1 - T_2)$$

$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{\left[\frac{(x_2 - x_1)}{kA} \right]}$$

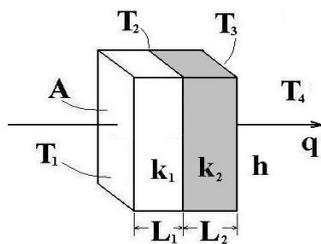
$$q_x = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}$$

$$R_t = \frac{(x_2 - x_1)}{kA}$$

Refazer o Exemplo 1 utilizando o conceito de resistência térmica.

2.1.1.2. SISTEMAS MULTICAMADAS

Paredes planas em série

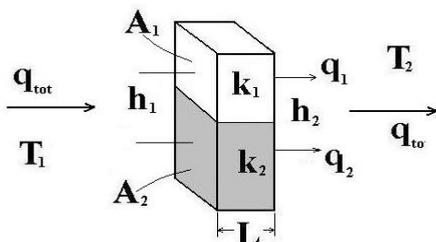


$$q = \frac{(T_1 - T_3)}{\frac{\Delta x_1}{K_1 A} + \frac{\Delta x_2}{K_2 A}}$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{(T_1 - T_3)}{R_1 + R_2}$$

$$R = \frac{\Delta x}{KA}$$

Paredes planas em paralelo



$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\Delta x_1}{K_1 A_1} + \frac{\Delta x_2}{K_2 A_2}}$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_1 + R_2}$$

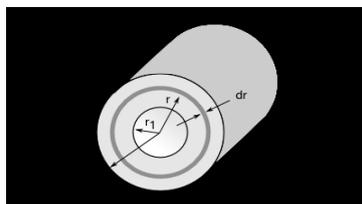
$$R = \frac{\Delta x}{KA}$$

$R =$ resistência térmica

EXEMPLO 2. A parede de uma câmara frigorífica (3 m x 6 m) é construída em concreto ($k = 1,37 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) e possui espessura de 15 cm. Faz-se necessário aplicar uma camada de isolamento de forma que o fluxo de calor transferido através da parede seja de no máximo 500 W. Considerando $k = 0,04 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, calcule a espessura mínima da camada de isolamento térmico. A temperatura na parede externa da câmara frigorífica é de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ e a interna é de $5 \text{ }^\circ\text{C}$. (Resp.: $L = 4,3 \text{ cm}$, no mínimo)

2.1.2. SISTEMAS TUBULARES

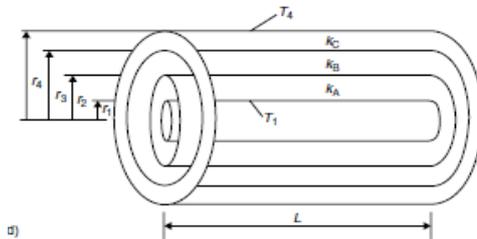
Paredes cilíndricas simples



$$q = \frac{2\pi Lk(T_2 - T_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$R_l = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi Lk}$$

Paredes cilíndricas compostas



$$q = \frac{(T_4 - T_1)}{\frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi LK_1} + \frac{\ln r_3 / r_2}{2\pi LK_2} + \frac{\ln r_4 / r_3}{2\pi LK_3}}$$

$$q = \frac{(T_4 - T_1)}{R_1 + R_2 + R_3}$$

EXEMPLO 3. Um tubo de aço com espessura de 2 cm ($k = 43 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$), com 6 cm de diâmetro interno está sendo usado para transportar vapor gerado em uma caldeira para um equipamento da linha de produção distantes em 40 m. A temperatura da superfície interna do tubo é de $115 \text{ }^\circ\text{C}$ e da superfície externa é de $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcule o fluxo de calor perdido para o ambiente. (Resp.: $q = 528.903 \text{ W}$ ou J/s)

EXEMPLO 4. Um tubo de aço inox ($k = 17 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$) está sendo usado para transportar óleo quente. A temperatura da superfície interna do tubo é de $130 \text{ }^\circ\text{C}$. O tubo tem 2 cm de espessura com diâmetro interno de 8 cm. O tubo possui isolamento com 0,04 m de espessura ($k = 0,035 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$). A temperatura na superfície externa do isolamento é de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcule a temperatura da interface entre o aço e o isolamento. (Resp.: $T = 129,8 \text{ }^\circ\text{C}$)

2.2. CONVECÇÃO

- ▶ Equação da convecção de Isaac Newton

$$q = hA(T_s - T)$$
$$q = \frac{\Delta T}{1/hA} = \frac{\Delta T}{R}$$

- ▶ Onde:

- ▶ q_0 = fluxo de calor (J/s)
- ▶ h = coeficiente de convecção de calor (película) (J/s.m².°C)
- ▶ A = área de contato (m²)
- ▶ T_s = temperatura da superfície quente (°C)
- ▶ T_∞ = temperatura do fluido (°C)

EXEMPLO 5. A taxa de transferência de calor por unidade de área de uma placa de metal é de 1.000 W/m². A temperatura da superfície da placa é de 120 °C e a temperatura ambiente é de 20 °C. Estime o coeficiente de convecção (h). (Resp.: $h = 10 \text{ W/m}^2\text{°C}$)

2.2.1. RESISTÊNCIA TÉRMICA NA CONVECÇÃO

$$q = hA(T_s - T)$$
$$q = \frac{\Delta T}{1/hA} = \frac{\Delta T}{R}$$
$$R_t = \frac{1}{hA}$$

2.3. MECANISMOS COMBINADOS: CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

$$q = \Delta T/R_t$$

$$R_t = R_{\text{convecção interna}} + R_{\text{condução}} + R_{\text{convecção externa}}$$

EXEMPLO 6. A parede plana de um tanque para armazenagem de produtos químicos é constituída de uma camada interna à base de carbono ($k = 10 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) de 40 mm de espessura, uma camada intermediária de refratário ($k = 0,14 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) e um invólucro de aço ($k = 45 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) com 10 mm de espessura. Com a superfície interna da camada de carbono a 190°C e o ar ambiente a 30°C , a temperatura da superfície externa do aço não deve ser maior que 60°C por motivos de segurança dos trabalhadores. Considerando que o coeficiente de película no ar externo é $12 \text{ kcal/h.m}^2\text{.}^\circ\text{C}$, determine:

a) a espessura mínima do refratário; (Resp.: $L = 50 \text{ mm}$, no mínimo)

b) a temperatura da superfície externa do aço se a camada de refratário for trocada por uma de isolante ($k = 0,03 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) de mesma espessura. ($T = 38,4^\circ\text{C}$)

2.3.1. COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Considerando a área interna de TC:

$$q = U_i A_i (T_i - T_o)$$

ou

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_o A_o}$$

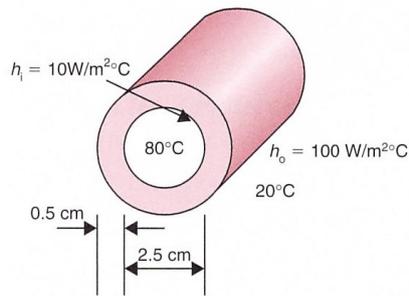
Considerando a área externa de TC:

$$q = U_o A_o (T_i - T_o)$$

ou

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_o A_o}$$

EXEMPLO 7. Uma tubulação de 2,5 cm de diâmetro interno está sendo usada para transportar uma alimento líquido a 80°C . O coeficiente de convecção interno é de $10 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$. O tubo, com espessura de 0,5 cm, é feito de aço ($k = 43 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). A temperatura ambiente é de 20°C . O coeficiente de convecção externa é de $100 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$. Calcule o coeficiente global de transferência de calor e a perda de calor através de 1 m de tubo.



2.3.2. MÉDIA LOGARÍTMICA DE DIFERENÇA DE TEMPERATURA (LMTD)

A partir das equações apresentadas anteriormente de Q , q (condução) e q (convecção), tem-se:

$$LMTD = \frac{dT_2 - dT_1}{\ln(dT_2 / dT_1)}$$

que pode ser usada em:

$$q = UA(LMTD)$$

EXEMPLO 8. Um fluido newtoniano ($C_p = 4 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) escoia no tubo interno de um trocador de calor de tubo duplo. O produto entra no trocador a 20°C e sai a 60°C . A vazão mássica do produto é de $0,5 \text{ kg/s}$. Na seção anelar, água quente a 90°C entra no trocador de calor e flui contracorrente a uma vazão mássica de 1 kg/s . O calor específico médio da água quente é de $4,18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

- Calcule a temperatura de saída da água. (Resp.: $T = 70,9^\circ\text{C}$)
- Calcule a LMTD. (Resp.: $LMTD = 39,5^\circ\text{C}$)
- Considerando o coeficiente médio de convecção de $2000 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ e o diâmetro do tubo interno de 5 cm , calcule o comprimento do trocador de calor. (Resp.: $L = 6,5 \text{ m}$)
- Repita os cálculos para o mesmo trocador em configuração co-corrente. (Resp.: $T = 70,9^\circ\text{C}$; $LMTD = 31,8^\circ\text{C}$; $L = 8 \text{ m}$)

3. SISTEMAS DE UNIDADES

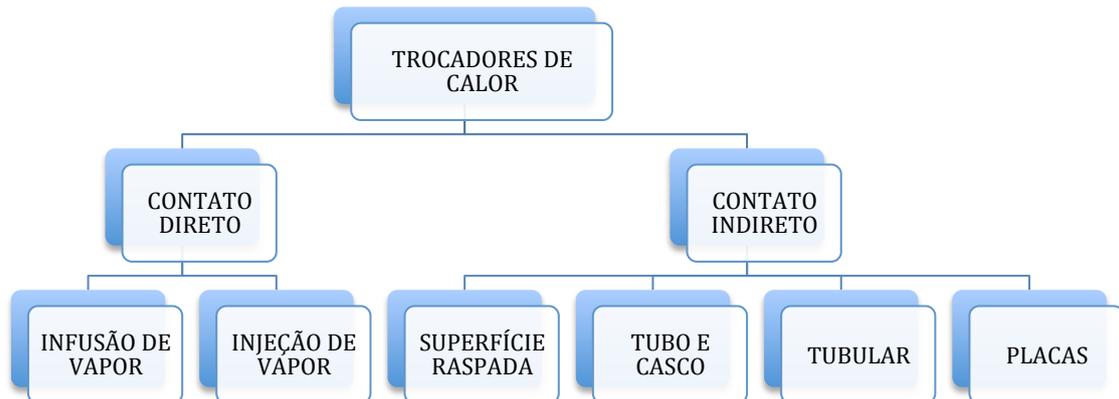
$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ kcal} = 4,184 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 14,34 \text{ cal/min}$$

4. TROCADORES DE CALOR

- ▶ Equipamentos usados para implementar a troca térmica entre materiais
- ▶ Aplicações: aquecimento e condicionamento de ambiente, recuperação de calor, processos químicos
- ▶ Tipos de equipamentos mais comuns: aquecedores, resfriadores, condensadores, evaporadores, torres de refrigeração, caldeiras
- ▶ Classificação



EXERCÍCIOS PARA ENTREGAR

1. Uma parede de um forno é constituída de duas camadas: 0,20 m de tijolo refratário ($k = 1,2$ kcal/h.m.°C) e 0,13 m de tijolo isolante ($k = 0,15$ kcal/h.m.°C). A temperatura da superfície interna do refratário é 1675 °C e a temperatura da superfície externa do isolante é 145 °C. Desprezando a resistência térmica das juntas de argamassa, calcule:
 - a) o calor perdido por unidade de tempo e por m^2 de parede; (Resp.: $q = 1471,2$ kcal/h)
 - b) a temperatura da interface refratário/isolante. (Resp.: $T = 1429$ °C)
2. Um tubo de aço inox ($k = 15$ W/mK) está sendo usado para conduzir óleo aquecido a 125 °C. A temperatura da superfície interna do tubo é de 120 °C. O tubo tem diâmetro interno de 5 cm e espessura de 1 cm. Para manter a perda de calor abaixo de 25 W/m de comprimento do tubo, é necessária a colocação de um isolamento térmico. Devido a limitações e espaço, a espessura da camada de isolamentos deve ser de no máximo 5 cm e sua temperatura externa deve ser mantida acima de 20 °C, de modo a evitar condensação de umidade em sua superfície. Calcule a condutividade térmica do isolante que resultará na mínima perda de calor sem que haja condensação de água na superfície. (Resp.: $k = 0,0357$ W/m°C)
3. A parede externa de uma câmara frigorífica é construída com blocos de concreto ($k = 0,935$ W/m°C) de 100 mm de espessura, tem 10 m de comprimento e 3 m de altura e possui isolamento ($k = 0,048$ W/m°C) de 10 cm de espessura. A câmara é mantida a -10 °C e o coeficiente de convecção em seu interior é de 40 W/m²°C. A temperatura fora da câmara é de 30 °C, com coeficiente de convecção de 10 W/m²°C. Calcule o coeficiente global de transferência de calor e a quantidade de calor perdida para o ambiente. (Resp.: $U = 0,43$ W/m²°C)
4. Em uma planta de processamento de alimentos, uma tubulação de aço ($k = 17$ W/m°C, diâmetro interno = 5 cm, espessura = 3 mm) está sendo usado para transportar uma bebida. A temperatura da superfície interna do tubo é 95 °C. Uma camada isolante com 4 cm de espessura ($k = 0,03$ W/m°C) encontra-se envolvendo o tubo. A temperatura da superfície do isolante é de 30 °C. Calcule o fluxo de calor por unidade de comprimento do tubo. (Resp.: $q = 13,8$ W)