TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Condução, Convecção e Radiação

Regime permanente e regime variável

Jorge Alberto Almeida

CONDUÇÃO

$$Q_x = -kA\frac{dT}{dx}$$ W

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$ W/m^2

Qx = taxa de transferência de calor na direção x (W)

qx = fluxo de calor na direção x (W/m2)

k = condutividade térmica do material (W/m2 °C)

A = área perpendicular ao fluxo (m2)

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura (variação da temperatura na direção normal a superfície de área A) (°C/m)

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

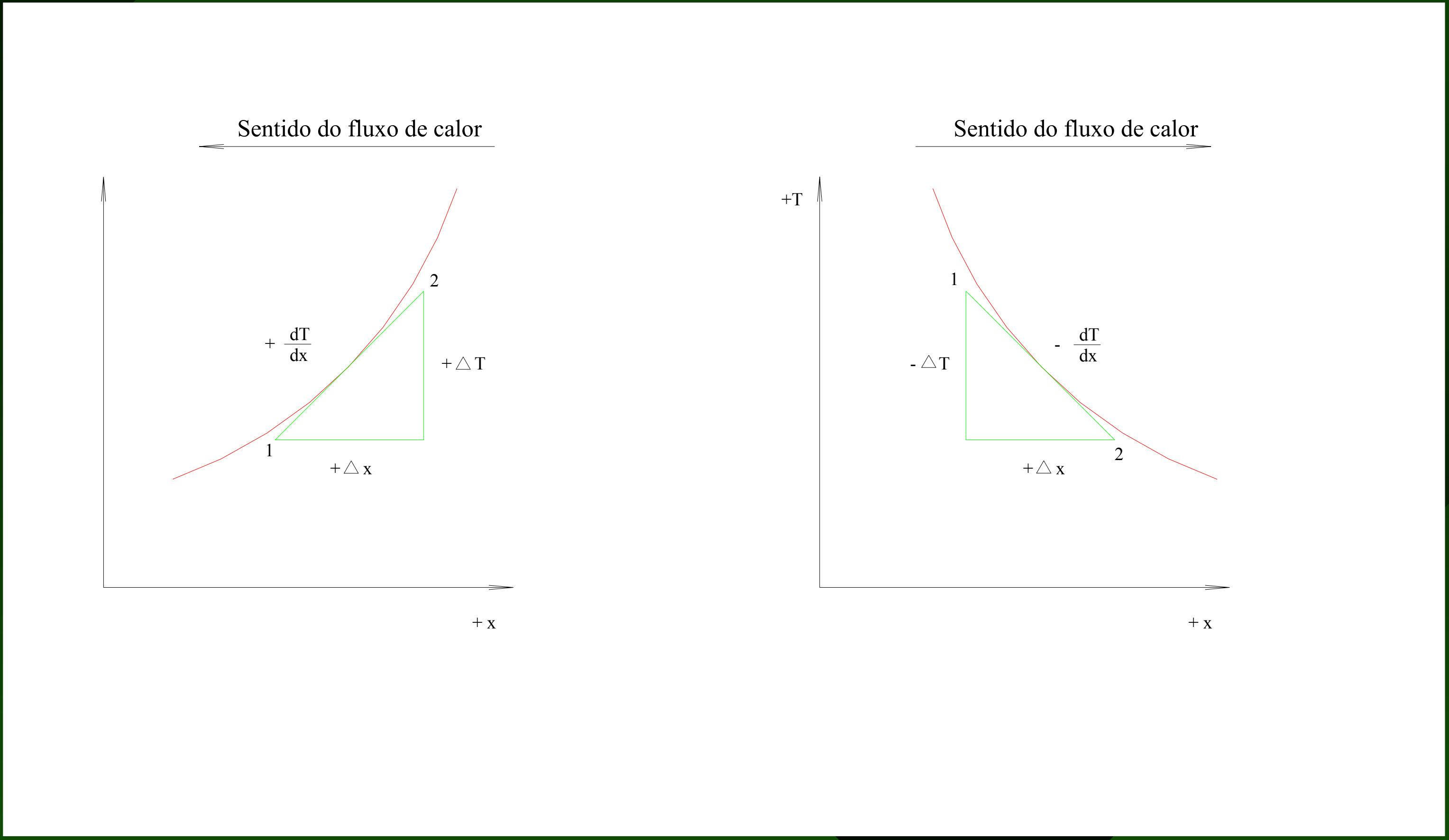
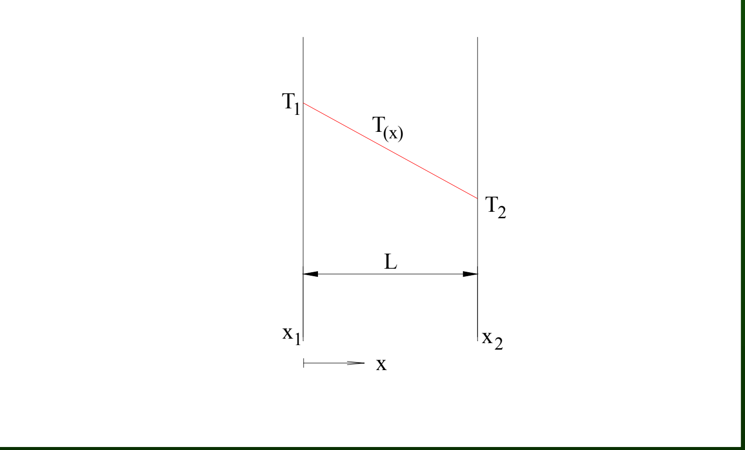


Tabela 1.1 - Ordem de grandeza da condutividade térmica.

Material	W/m K	Kcal/h m °C
Gases à pressão atmosférica	0,0069-0,17	0,006-0,15
Materiais isolantes	0,034-0,21	0,03-0,18
Líquidos não-metálicos	0,086-0,69	0,07-0,60
Sólidos não-metálicos (tijolo, pedra, cimento)	0,034-2,6	0,03-2,20
Metais líquidos	8,6-76,0	7,5-65,0
Ligas	14,0-120,0	12,0-100,0
Metais puros	52,0-410,0	45,0-360,0

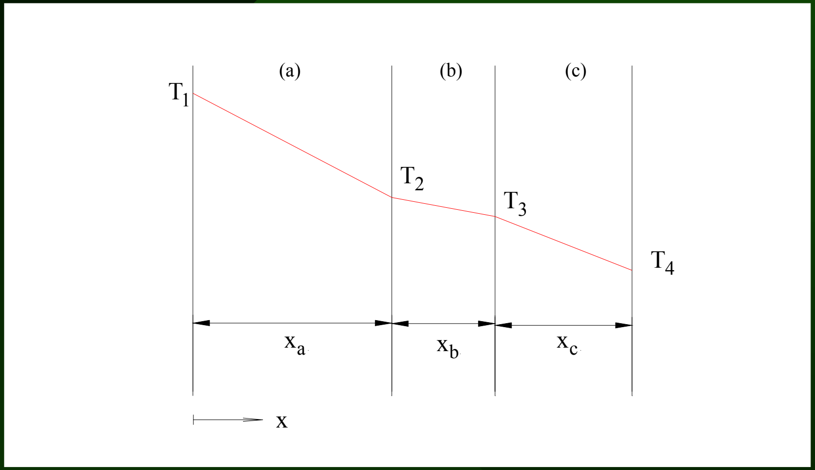
Placa Plana



$$\frac{Q}{A}\int_{x_1}^{x_2} dx = -\int_{T_1}^{T_2} k\, dT$$

$$Q = \frac{Ak}{L}\left(T_1 - T_2\right)$$

Placa Plana Composta



$$T_1 - T_2 = Q\frac{x_a}{k_a A}$$

$$T_2 - T_3 = Q\frac{x_b}{k_b A}$$

$$T_3 - T_4 = Q\frac{x_c}{k_c A}$$

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{x_a}{k_a A} + \frac{x_b}{k_b A} + \frac{x_c}{k_c A}}$$

Exemplo 1.1 – As paredes de uma câmara frigorífica são construídas de uma placa de cortiça de 10 cm de espessura comprimida entre duas placas de pinho com 1,3 cm de espessura. Calcular o fluxo de calor por unidade de área (kcal/h.m2) se a face interna está a –12 °C e a externa a +27 °C. Calcular a temperatura da interface entre a placa externa e a cortiça.

k=0,036 kcal/h.m.°C (cortiça)

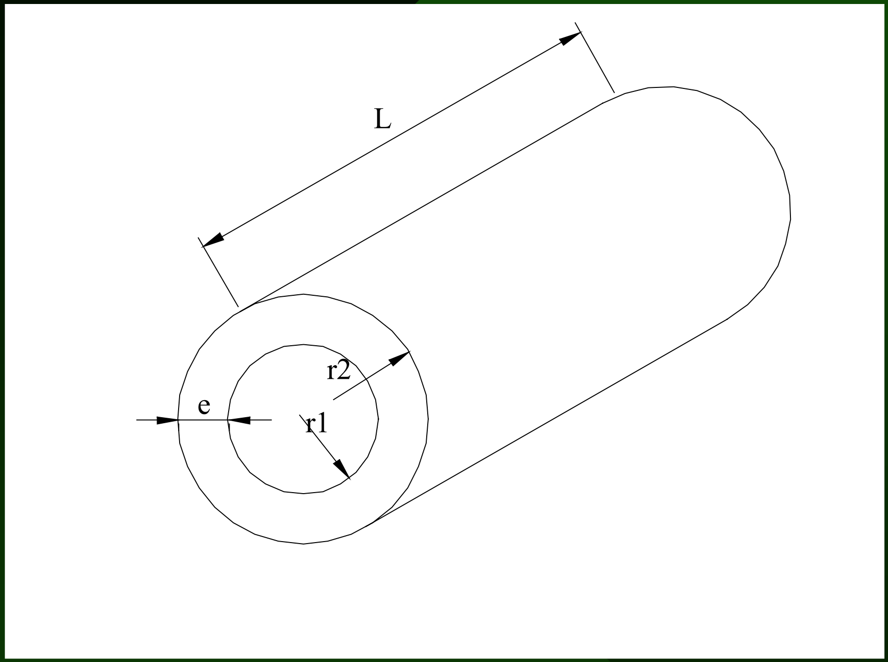
k=0,092 kcal/h.m.°C (pinho)

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{x_a}{k_a A} + \frac{x_b}{k_b A} + \frac{x_c}{k_c A}}$$

com: $x_a = x_c = 0{,}013$ m; $x_b = 0{,}10$ m; $k_a = k_c = 0{,}092$ kcal/h.m.°C; $k_b = 0{,}036$ kcal/h.m.°C; $T_1 = 27$ °C e $T_4 = -12$ °C, resulta:

$$\frac{Q}{A} = q = \frac{27 - (-12)}{\frac{0{,}013}{0{,}092} + \frac{0{,}10}{0{,}036} + \frac{0{,}013}{0{,}092}} = 12{,}7\ {kcal}/{h.m^2}$$

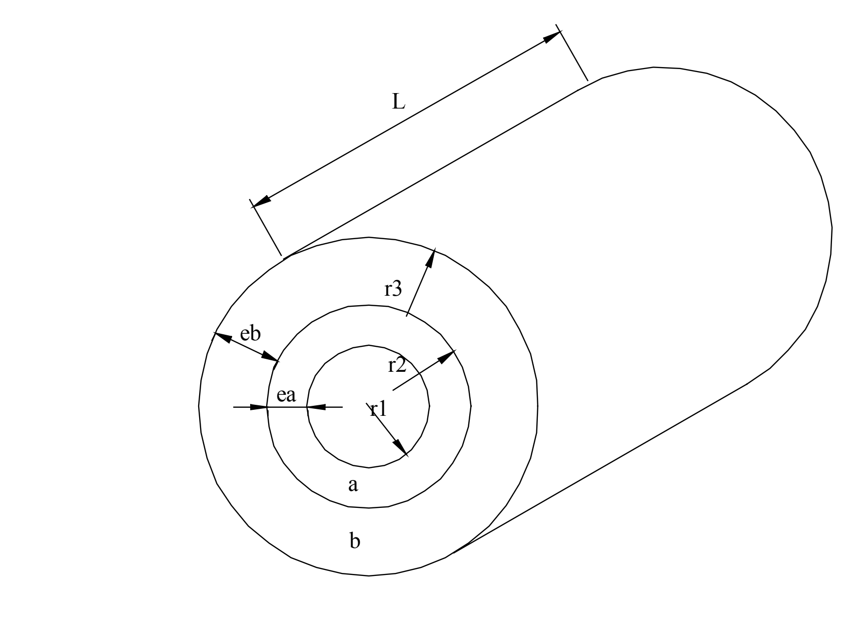
Cilindro Oco



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

$$Q = \frac{2\pi Lk\left(r_2 - r_1\right)}{\ln\frac{r_2}{r_1}\left(r_2 - r_1\right)}\left(T_1 - T_2\right) = \frac{\left(A_2 - A_1\right)k\left(T_1 - T_2\right)}{\ln\frac{A_2}{A_1}\left(r_2 - r_1\right)} = k.A_{ml}\frac{\left(T_1 - T_2\right)}{e}$$

Cilindro Oco Composto



$$Q = \frac{(T_1 - T_3)}{\left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L k_a}\right)_a + \left(\frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L k_b}\right)_b}$$

Exemplo 1.2 – Um tubo de aço de 6” número 80 está isolado por uma camada de 10 cm de magnésia. A face interna do tubo está a 250 °C e a face externa do isolante a 38 °C. Calcular a perda de calor por metro linear de tubo e a temperatura da interface aço-isolante.

Dados: $k_{aço}$ = 38,6 kcal/h m °C
$k_{magnésia}$ = 0,0566 kcal/h m °C
diâmetro interno do tubo = 14,65 cm
diâmetro externo do tubo = 16,83 cm

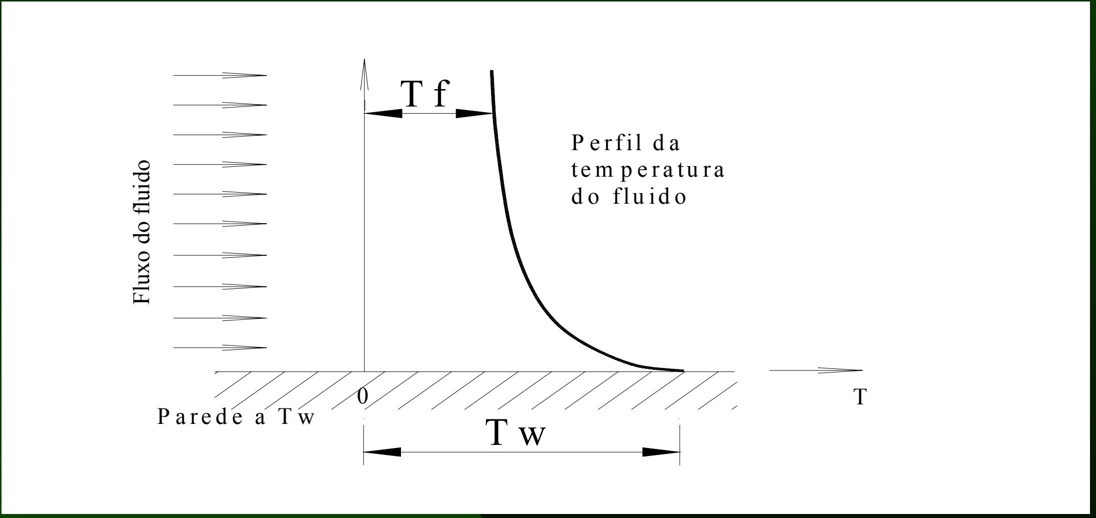
Solução: Trata-se de condução em cilindro composto e aplica-se a equação 1.8

$$Q = \frac{(250-38)}{\left(\dfrac{\ln {}^{0,1683}\!/_{0,1465}}{2\pi L\,38,6}\right)_{aço} + \left(\dfrac{\ln {}^{0,3683}\!/_{0,1683}}{2\pi L\,0,0566}\right)_{isolamento}}$$

$$\frac{Q}{L} = \frac{212}{0,00057 + 2,1} \quad \therefore \quad \frac{Q}{L} = 97\,{}^{kcal}\!/_{h.m}$$

CONVECÇÃO

$$Q = hA\left(T_w - T_f\right)$$



$$Q = hA\left(T_f - T_w\right)$$

Ordem de grandeza dos coeficientes de transmissão de calor por convecção.

Material	$W/m^2\ K$	$Kcal/h\ m^2\ °C$
Ar, convecção natural	6-30	5-25
Vapor ou ar, superaquecido, convecção forçada	30-300	25-250
Óleo, convecção forçada	60-1800	50-1500
Água, convecção forçada	300-6000	250-10000
Água, em ebulição	3000-60000	2500-50000
Vapor, em condensação	6000-120000	5000-100000

Coeficiente de transferência de calor por convecção *médio* e *local*

$$dQ_c = h_c\, dA\left(T_w - T_f\right)$$

$$\overline{h}_c = \frac{1}{A}\iint_A h_c dA$$

Exemplo 1.3 – Uma placa aquecida eletricamente dissipa calor, por convecção a uma taxa de q=8000 W/m^2, para o ar ambiente a T_f= 25°C. Se a temperatura na superfície da chapa quente for T_w = 125°C, calcule o coeficiente de transferência de calor na convecção entre a placa e o ar.

Solução: O calor está sendo transferido da placa para o fluido, de modo que deve ser aplicada a equação 1.10a;

$$q = h\left(T_w - T_f\right)$$

$$8000 \, {}^{W}\!/_{m^2} = h(125 - 25)^\circ C$$

$$h = 80 \, {}^{W}\!/_{m^2 . ^\circ C}$$

Exemplo 1.4 – Ar aquecido a T_f= 150°C escoa sobre uma placa lisa mantida a T_w = 50°C. O coeficiente de transferência de calor por convecção forçada é h = 75 W/m².°C. Calcule a taxa de transferência de calor para a placa através de uma área de A = 2 m².

Solução: Na transferência de calor do fluido quente para a placa, deve-se aplicar a equação 1.10b

$$Q = hA\left(T_f - T_w\right)$$

$$Q = 75\, W/_{m^2.^\circ C} .2m^2\left(150 - 50\right)^\circ C = 15\,kW$$

Exemplo 1.5 – Em um tubo de um trocador de calor tipo casco-tubo, tem-se os seguintes dados: tubo BWG 16, 7/8" (D_i = 19 mm); fluido escoando por dentro do tubo: benzeno; temperatura local média: 43 °C; velocidade média: 1,5 m/s; temperatura da parede interna do tubo: 29 °C. Calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Comentários: Na prática não se conhece a temperatura da parede. O que se conhece são as temperaturas médias dos fluidos numa dada secção, por exemplo, a do benzeno igual a 43 °C. O exemplo tem apenas finalidade didática. O cálculo da temperatura da parede T_w é necessário para o calculo de h, e sua obtenção usualmente é feita por tentativa e erro.

No exemplo proposto temos o caso de convecção forçada dentro de um tubo, sem mudança de fase.

Solução: Propriedades físicas do benzeno a 43 °C, obtidas de Donald Kern (1980), são:

Condutividade térmica k = 0,134 *kcal/h.m. °C*

Massa específica ρ = 850 *kg/m³*

Viscosidade dinâmica μ = 1,76 *kg/h.m*

Calor específico Cp = 0,43 *kcal/kg. °C*

Viscosidade dinâmica do benzeno na temperatura da parede (T_w = 29 °C) μ_w = 2,16 *kg/h.m*

O número de Reynolds é:

$$Re = \frac{\rho.V.D_i}{\mu} = \frac{850\, {}^{kg}\!/_{m^3} . 1{,}5\, {}^{m}\!/_{s} . 0{,}019m}{1{,}76\, {}^{kg}\!/_{m.h} . \dfrac{1h}{3600s}} = 49438$$

logo o escoamento ocorre em regime turbulento.

Para obter h empregaremos a equação de Sieder-Tatte:

$$Nu = 0{,}027.Re^{0,8}.Pr^{1/3}.\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$$

onde o número de Prandtl é dado por:

$$Pr = \frac{Cp.\mu}{k} = \frac{0{,}43\, {}^{kcal}\!/_{kg.^\circ C} . 1{,}76\, {}^{kg}\!/_{m.h}}{0{,}134\, {}^{kcal}\!/_{h.m.^\circ C}} = 5{,}65$$

Com esses valores a equação de Sieder-Tatte fornece

$$Nu = \frac{h_i.D_i}{k}$$

$$h_i = 1588\, {}^{kcal}\!/_{h.m^2.^\circ C}$$

RADIAÇÃO

- Emissão de radiação

Corpo negro

lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \qquad W/m^2$$

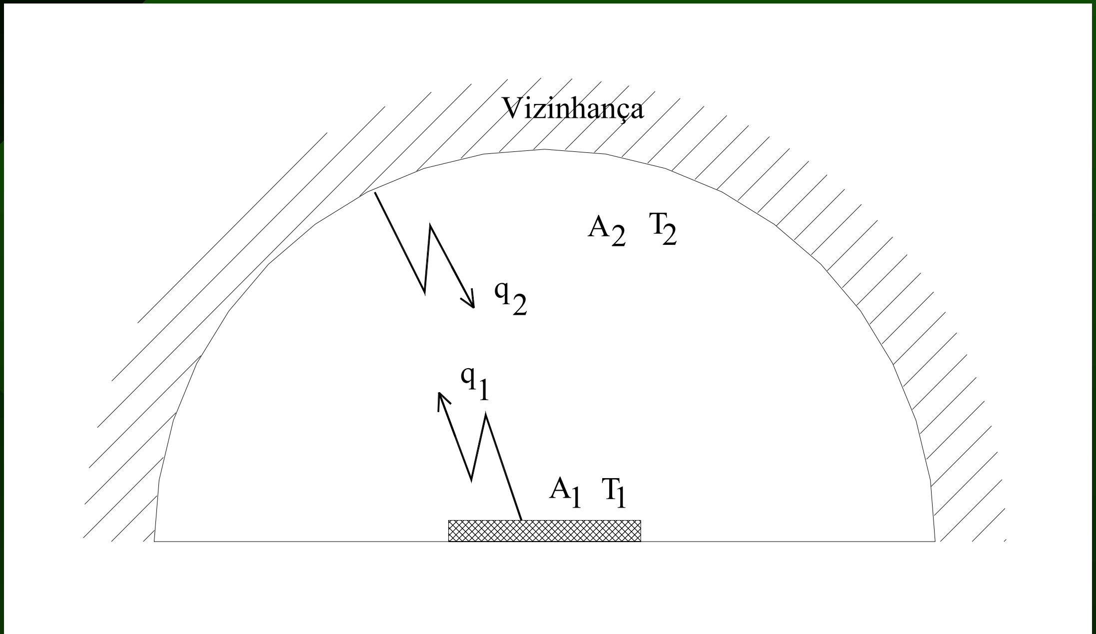
corpo real

$$q = \varepsilon . E_b = \varepsilon \sigma T^4$$

Absorção de radiação

$$q_{abs} = \alpha . q_{inc}$$

Troca de radiação

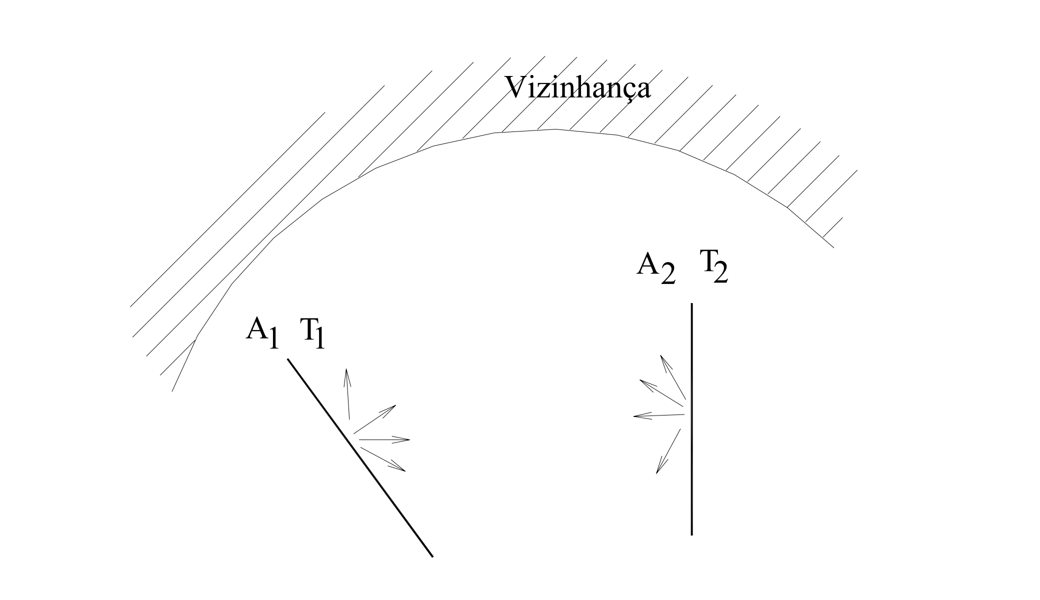


$$Q_{1emitido} = A_1.\varepsilon_1.\sigma.T_1^4 \qquad Q_{1absorvido} = A_1.\alpha_1.\sigma.T_2^4$$

$$Q_1 = A_1.\varepsilon_1.\sigma.T_1^4 - A_1.\alpha_1.\sigma.T_2^4$$

$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \qquad Q_1 = A_1.\varepsilon_1.\sigma.(T_1^4 - T_2^4)$$

Fator de forma



$$Q_1 = F_1.A_1.\varepsilon_1.\sigma.(T_1^4 - T_2^4)$$

Coeficiente de transferência de calor radiante

$$q_1 = h_r (T_1 - T_2)$$

$$Q_1 = F_1.A_1.\varepsilon_1.\sigma.(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2)$$

Se $[T_1 - T_2] << T_1$

$$q_1 \equiv \frac{Q_1}{A_1} \cong (F_1.\varepsilon_1.\sigma.4T_1^3)(T_1 - T_2)$$

$$h_r = F_1.\varepsilon_1.\sigma.4T_1^3$$

Exemplo 1.6 – Uma placa aquecida, com *D*=0,2 *m* de diâmetro tem uma de suas superfícies isolada e a outra mantida a T_w=550 K. Se a superfície quente tem emissividade ε_w=0,9 e está exposta a uma superfície envolvente a T_s=300 K, e se o ar atmosférico é o meio interveniente, calcule a perda de calor por radiação da placa quente para suas vizinhanças.

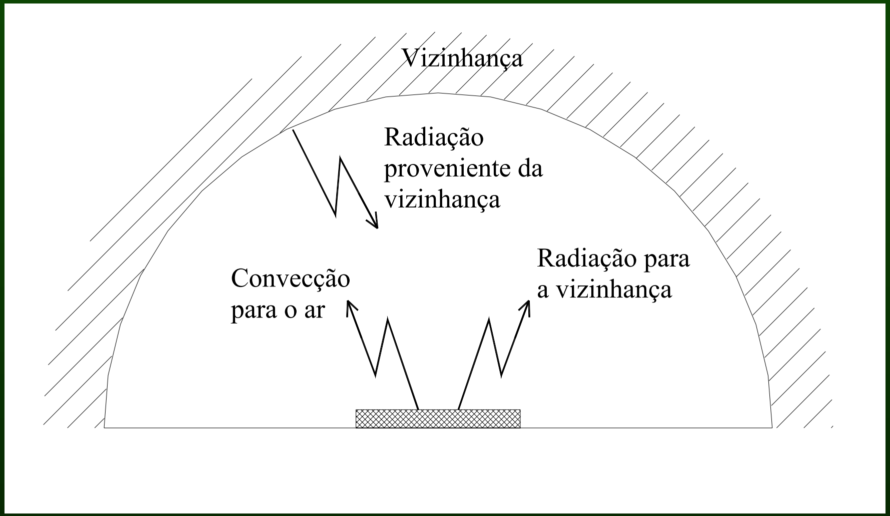
Solução: Admitindo $\varepsilon_1 = \alpha_1$

$$Q_w = A_w.\varepsilon_w.\sigma.(T_w^4 - T_s^4)$$

$$Q_w = \left[\frac{\pi}{4}(0,2)^2\right](0,9)\left(5,67\times10^{-8}\right)\left[(5,5)^4 - 3^4\right]\times10^8$$

$$Q_w = 134,5\,W$$

MECANISMO COMBINADO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR



$$q_w = h_c\left(T_w - T_\infty\right) + \varepsilon\sigma\left(T_w^4 - T_s^4\right)$$

Se $\left[T_w - T_\infty\right] << T_w$

$$q_w = h_c\left(T_w - T_\infty\right) + h_r\left(T_w - T_\infty\right)$$

Onde:

$$h_r = 4.\varepsilon.\sigma.T_w^3$$

Exemplo 1.7 – Uma placa metálica pequena, delgada, de área *A* m^2, está isolada de um lado e exposta ao sol do outro lado. A placa absorve energia solar a uma taxa de 500 W/m^2 e dissipa calor por convecção para o ar ambiente a T_∞=300 *K*, com um coeficiente de transferência de calor convectiva h_c=20 $W/m^2\,^oC$, e por radiação para a superfície envolvente, que se pode admitir um corpo negro a T_s= 280 *K*. A emissividade da superfície é ε=0,9. Determine a temperatura de equilíbrio da placa.

Solução: O balanço de energia por unidade de área da superfície exposta escreve-se como

$$T_w = 340{,}68 - 0{,}255\left(\frac{T_w}{100}\right)^4$$

$$500 = 20(T_w - 300) + 0{,}9 \times 5{,}67 \times 10^{-8}\left[\left(\frac{T_w}{100}\right)^4 - (2{,}8)^4\right]10^8$$

ou

$$25 = T_w - 300 + 0{,}255\left(\frac{T_w}{100}\right)^4 - 15{,}68$$

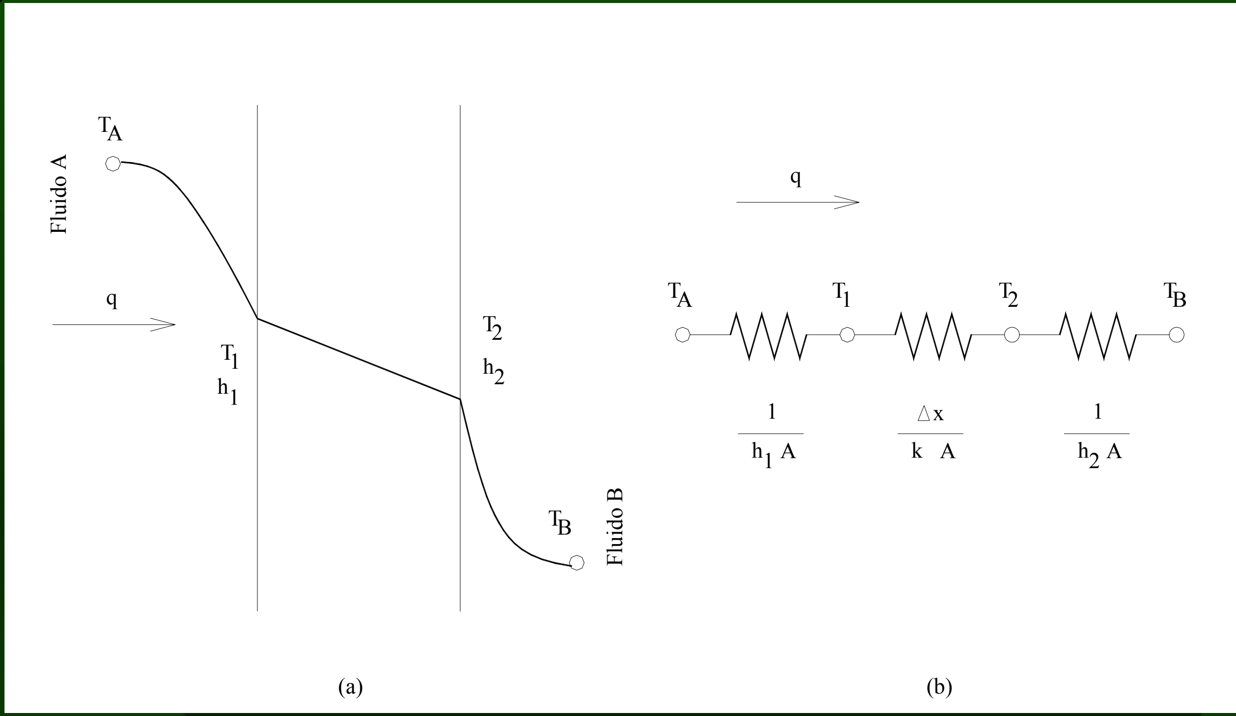
ou

$$T_w = 340{,}68 - 0{,}255\left(\frac{T_w}{100}\right)^4$$

A solução desta equação por tentativa e erro dá a temperatura da placa

$$T_w = 315{,}5\ K$$

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR



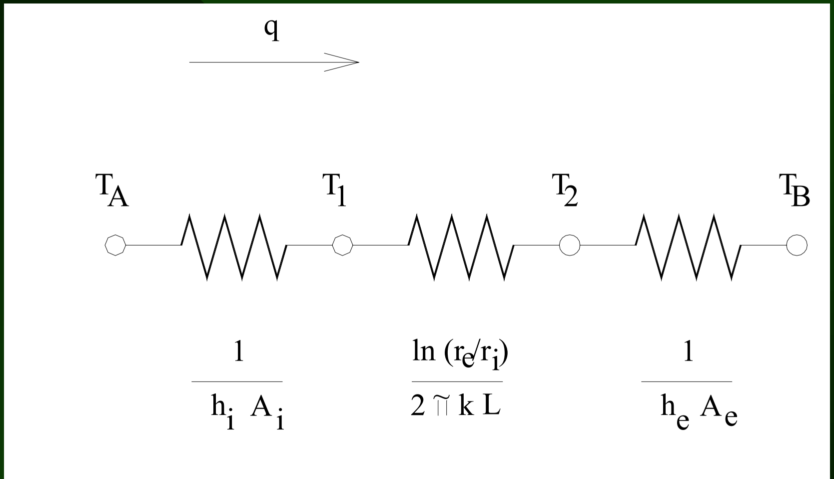
$$q = h_1 A(T_A - T_1) = \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2) = h_2 A(T_2 - T_B)$$

$$q = \frac{T_A - T_B}{\dfrac{1}{h_1 A} + \dfrac{\Delta x}{kA} + \dfrac{1}{h_2 A}}$$

$$q = UA\Delta T_{total}$$

$$U = \frac{1}{\dfrac{1}{h_1} + \dfrac{\Delta x}{k} + \dfrac{1}{h_2}}$$

Analogia elétrica para um cilindro oco



$$q = \frac{T_A - T_B}{\dfrac{1}{h_i A_i} + \dfrac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi kL} + \dfrac{1}{h_e A_e}}$$

$$U_i = \frac{1}{\dfrac{1}{h_i} + \dfrac{A_i \ln(r_e/r_i)}{2\pi kL} + \dfrac{A_i}{A_e}\dfrac{1}{h_e}}$$

$$U_e = \frac{1}{\dfrac{A_e}{A_i}\dfrac{1}{h_i} + \dfrac{A_e \ln(r_e/r_i)}{2\pi kL} + \dfrac{1}{h_e}}$$

Valores aproximados dos coeficientes globais de transferência de calor.

Situação física	W/m^2 K	Btu/h pé^2 °F
Parede com superfície externa de tijolo aparente, revestida internamente de gesso, não isolada	2,55	0,45
Parede estrutural, revestida internamente de gesso: Não isolada	1,42	0,25
Janela de vidro simples	6,2	1,1
Janela de vidro duplo	2,3	0,4
Condensador de vapor	1100-5600	200-1000
Aquecedor de água de alimentação	1100-8500	200-1500
Condensador de Freon-12 resfriado com água	280-850	50-150
Trocador de calor água-água	850-1700	150-300
Trocador de calor de tubo aletado com água no interior dos tubos e ar sobre os tubos	25-55	5-10
Trocador de calor água-óleo	110-350	20-60
Vapor-óleo combustível leve	170-340	30-60
Vapor-óleo combustível pesado	56-170	10-30
Vapor-querosene ou gasolina	280-1140	50-200
Trocador de calor de tubo aletado, vapor no interior dos tubos e ar sobre os tubos	28-280	5-50
Condensador de amônia, água nos tubos	850-1400	150-250
Condensador de álcool, água nos tubos	255-680	45-120
Trocador de calor gás-gás	10-40	2-8