Noções básicas de Transferência de Calor
aula Condução de Calor

PEN 5004 – Fundamentos Físicos de Processos Energéticos

Prof. José R. Simões Moreira

2022

Prof. José R. Simões Moreira

Biografia

Graduado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da USP (1983), Mestrado em Engenharia Mecânica pela mesma instituição (1989), Doutorado em Engenharia Mecânica - Rensselaer Polytechnic Institute (1994) e Pós-Doutorado em Engenharia Mecânica na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (1999). Atualmente é Professor Titular da Escola Politécnica da USP. Foi secretário de comitê de Refrigeração e Ar Condicionado da ABCM - Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Térmica e Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: mudança de fase líquido-vapor, uso e processamento de gás natural, refrigeração por absorção, separação supersônica de misturas gasosas, tubos de vórtices, energia solar concentrada e sistemas alternativos e renováveis de energia. Coordenou vários cursos de extensão e atualmente coordenada o curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da USP. Tem sido professor de cursos de extensão universitária para profissionais da área de termelétricas, energia, válvulas e tubulações industriais. Tem participado de projetos de pesquisa de agências governamentais e empresas, destacando: Fapesp, Finep, Cnpq, Eletropaulo, Ultragaz, Ipiranga, Comgas, Shell e Petrobras. Foi professor visitante no INSA - *Institut National des Sciences Appliquées* em Lyon (França) em junho e julho de 2009. É autor de mais de 100 artigos técnico-científicos, além de ser autor de três livros: *Fundamentos e Aplicações da Psicrometria* – 2ª ed., *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética* - 2ª ed. e *Transferência de Calor na Engenharia* (no prelo). Finalmente, coordena o laboratório e grupo de pesquisa da EPUSP de nome SISEA - Lab. de Sistemas Energéticos Alternativos e Renováveis (www.usp.br/sisea).

Modos de transferência de calor

Existem três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Todos os processos de transferência de calor ocorrem através de um ou mais desses modos.

- **Condução**: Processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Ex. Parede de um forno.

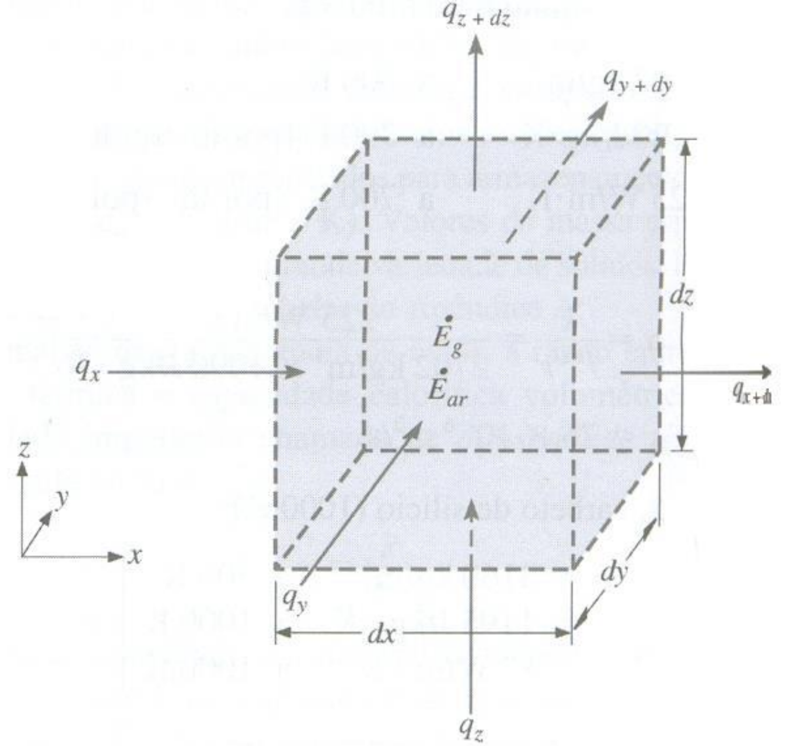
- **Convecção**: Processo pelo qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. Ex. Ar Condicionado e Ventiladores

- **Radiação:** Processo pelo qual o calor é transferido de uma superfície de alta temperatura para uma superfície de temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas que viajam na velocidade da luz. Ex. Sol

Condução de Calor

- **Equação geral da condução de calor**

"A variação da energia interna (E_{ar}), por unidade de tempo, de um volume de material, é igual à troca líquida de calor pelas faces deste volume (q_x, q_y, q_z)mais a energia térmica gerada (E_g)em seu interior."



$$\boxed{\frac{\partial}{\partial x}\left[k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial Y}\left[k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial Z}\left[k_Z\frac{\partial T}{\partial Z}\right]+\ q_G'''=\ \rho C\frac{\partial T}{\partial t}}$$

Considerações

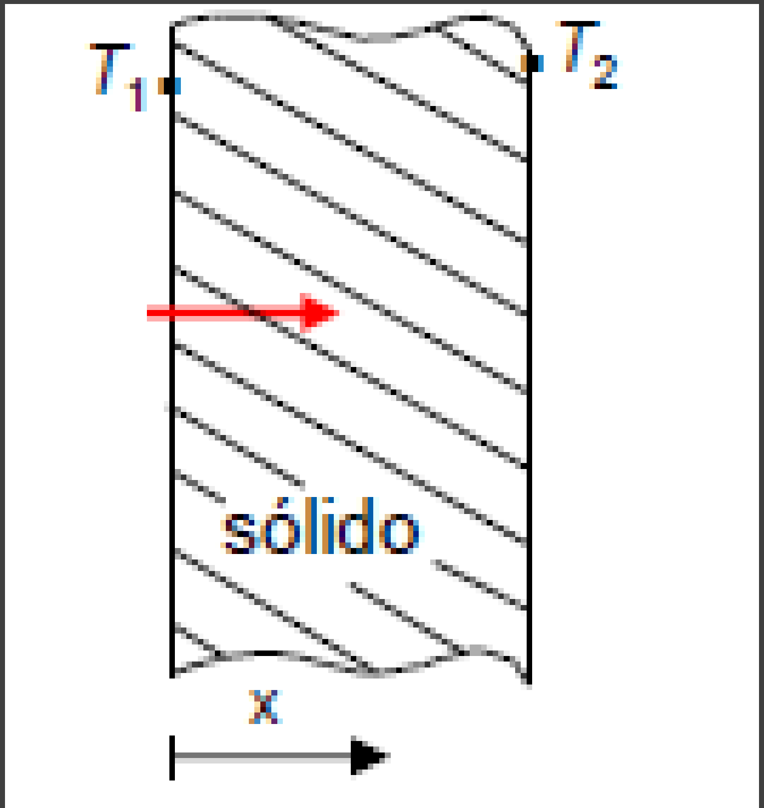
- Não há Geração de Calor
- Regime Permanente
- Unidimensional
- k uniforme e Constante
- Regime permanente (ou estacionário)

Condução Unidirecional

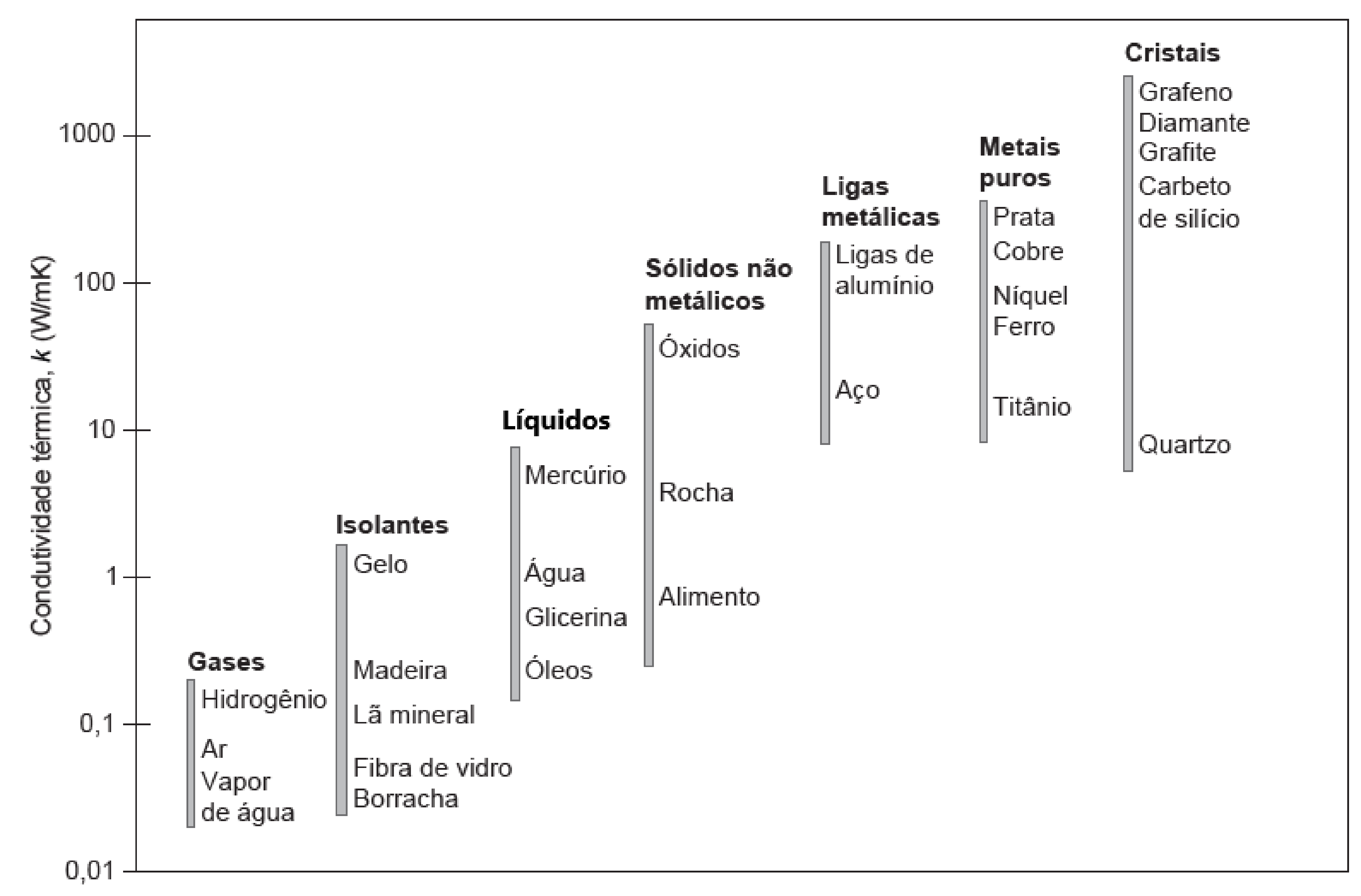
- Fluxo de Calor conduzido através de um material em uma direção. Fourier (1822)

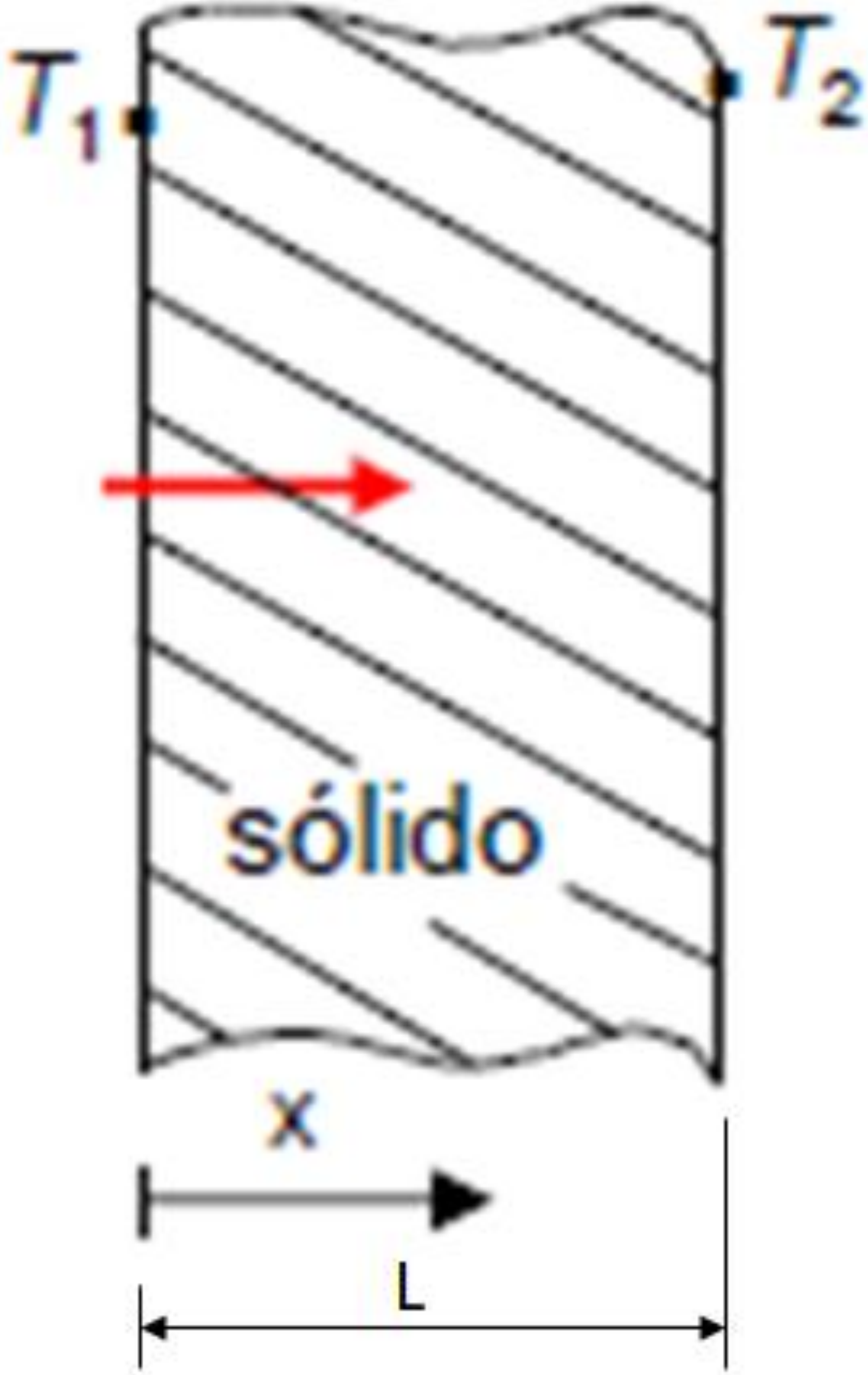
$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

- **q:** fluxo de calor por condução que atravessa o corpo na direção x (W);
- **k:** condutividade térmica do material (W/m.°C), propriedade que caracteriza o comportamento dos materiais;
- **A:** secção transversal do corpo, perpendicular ao fluxo de calor (m²).
- ***d*T/dx:** gradiente de temperatura na direção em que ocorre o fluxo de calor



Condutividade térmica





Parede Plana

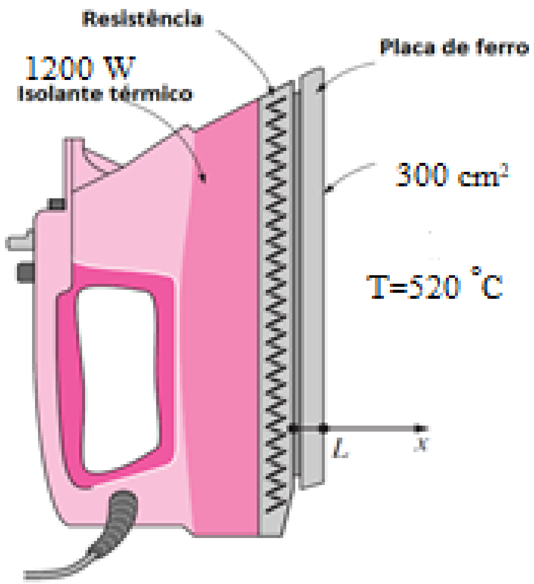
$$T\,(x) = (T_2\ -\ T_1)\frac{x}{L} + \ T_1$$

$$q^{"} = -k\ \frac{\Delta T}{\mathrm{L}}$$

- $q^{"}$ **:** fluxo de calor por condução que atravessa o corpo por unidade de área na direção *x* (W/m²);
- *k***:** condutividade térmica do material (W/m.°C), propriedade que caracteriza o comportamento dos materiais;
- *T***:** Temperaturas (°C).
- *L***:** espessura do corpo na direção x (m).

Exercícios Resolvidos: Exercícios adaptados do livro transferência de calor e massa, Çengel.

3.1. Considere que a base do ferro de passar roupa doméstico possui uma espessura de $L = 0{,}5\ cm$, e uma área de $A = 300\ cm^2$, o material de ferro com condutividade térmica, $k = 15\ W/m\,°C$. A superfície interna da placa é aquecida por uma resistência de $1200\ W$ e a superfície externa possui uma temperatura $T(L) = 520°C$ como apresentado na figura abaixo, determine a distribuição de temperatura ao longo da placa e a temperatura da superfície interna



Hipóteses:

Estado estacionário

A condução e calor é unidimensional

As propriedades físicas constantes

Sem geração interna de energia

A isolação térmica na superfície interna é perfeitamente adiabática

Dados do problema:

$L = 0{,}5\ cm;\ A = 300\ cm^2;\ T(L) = 520°C;\ k = 15\ W/m\,°C$

Solução: O fluxo de calor na superfície interna é dado por:

$$\dot{q}_0 = \frac{\dot{Q}_0}{A_{base}} = \frac{1200\ W}{0{,}03\ m^2} = 40000\ \frac{W}{m^2}$$

A partir da equação da condução de calor e as hipóteses admitida obtemos a equação diferencial abaixo:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

Integrando a equação acima duas vezes obtemos o perfil de temperatura:

$\frac{dT}{dx} = C_1$. Integrando mais uma vez obtemos, $T(x) = C_1 x + C_2$. C1 e C2 são as constantes de integração e são obtidas aplicando as condições de contorno.

Condição de contorno 1: Na superfície interna,

$x = 0,$ $\quad -k\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \dot{q}_0$, o que indica que $-kC_1 = \dot{q}_0$ e $C_1 = -\frac{\dot{q}_0}{k}$

Condição de contorno 2: Na superfície externa,

$x = L,$ $\quad T(L) = 520°C$

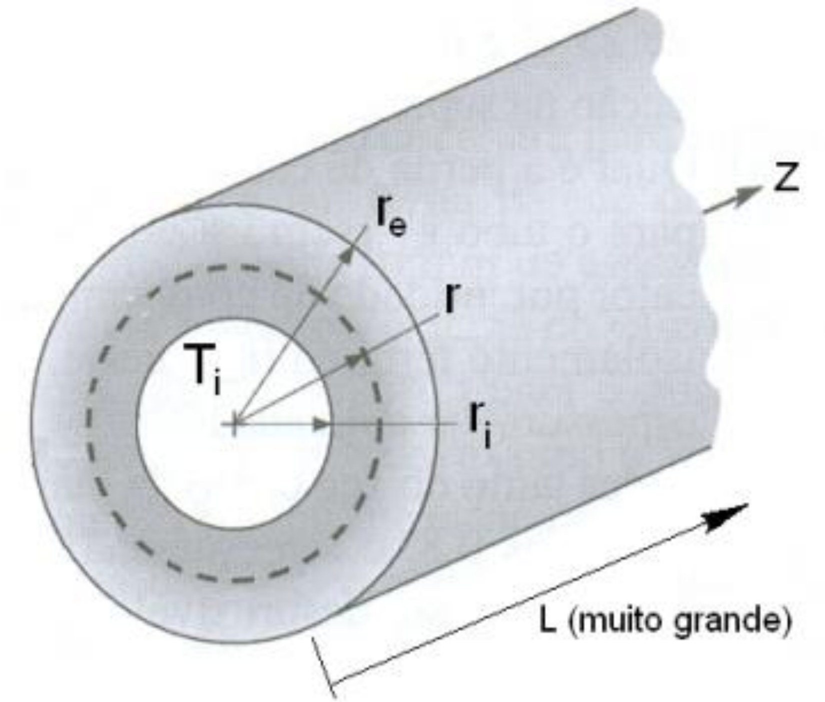
Substituindo $C_1 = -\frac{\dot{q}_0}{k}$ e resolvendo para obter C_2, temos: $C_2 = \frac{\dot{q}_0}{k}L + T(L)$. Substituindo as constantes no perfil de temperatura obtemos:

$$T(x) = -\frac{\dot{q}_0}{k}(x - L) + T(L)$$

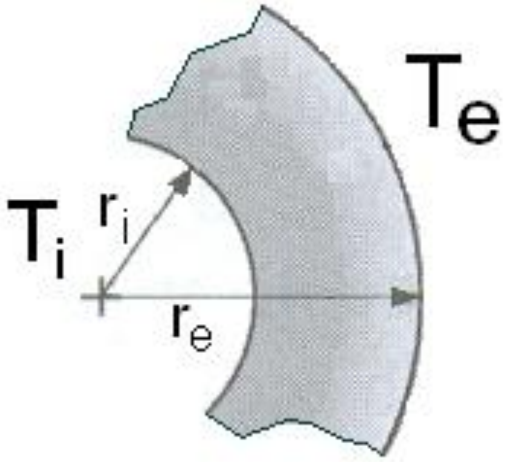
Aplicando os valores na equação acima para $x = 0$ e $x = 0{,}5\,cm$ encontramos a temperatura da superfície interna.

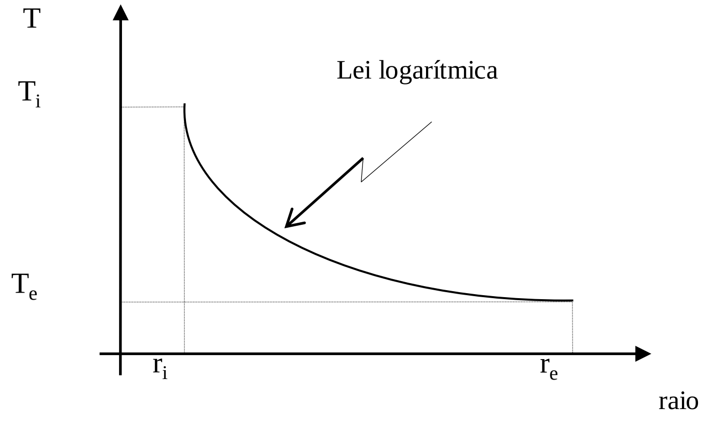
$$T(0) = -\frac{40000}{15}(0 - 0.005)\left[\frac{°C}{m}.m\right] + 520\,[°C] = 533°C$$

Tubo cilíndrico – distribuição de temperatura

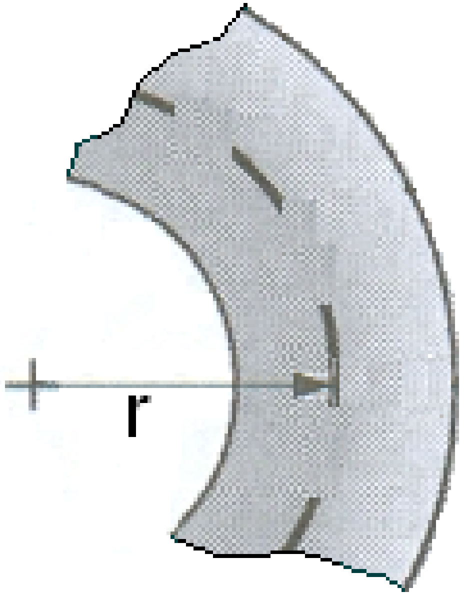


$$T(r) = \frac{T_i - T_e}{\ln \frac{r_i}{r_e}} \ln \frac{r}{r_e} + T_e$$



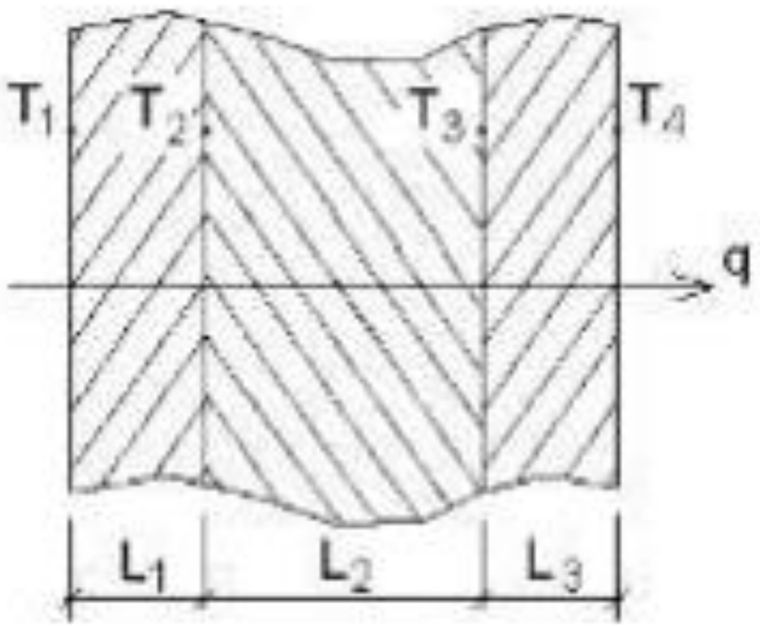


Tubo cilíndrico – fluxo de calor



Taxa de calor (*W*): $$q = 2\pi k L \frac{(T_e - T_i)}{\ln\left(\frac{\mathrm{r_i}}{\mathrm{r_e}}\right)}$$

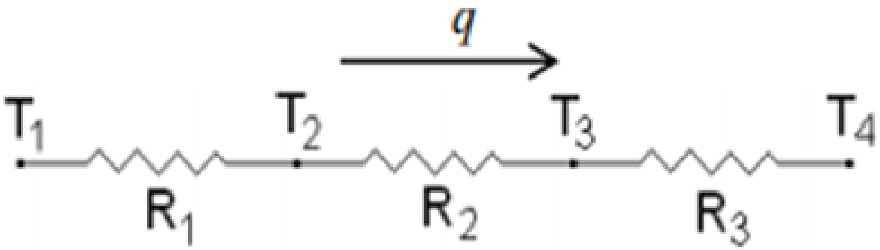
Fluxode calor (*W/m²*): $$q'' = \frac{k}{r}\frac{(T_e - T_i)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)}$$



I – q

U - Δ T

R $_{\text{ôhmico}}$ – R $_{\text{Térmico}}$



MESMO FLUXO DE CALOR *q* PARA TODAS AS PAREDES

Parede 1: $q = k_1 A \frac{(T_1 - T_2)}{L_1}$

Parede 2: $q = k_2 A \frac{(T_2 - T_3)}{L_2}$

Parede 3: $q = k_3 A \frac{(T_3 - T_4)}{L_3}$

$$T_1 - T_4 = q \sum \frac{L_i}{k_i A}$$

$$\boxed{q = \frac{\Delta T}{R_{eq}}}$$

$$R_{eq} = \sum \frac{L_i}{k_i A}$$

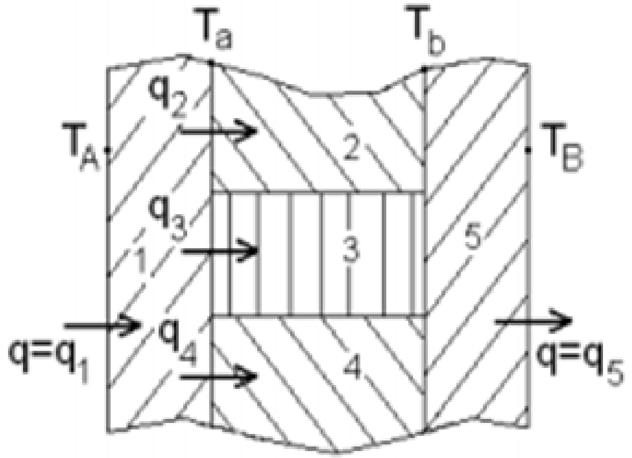
Com

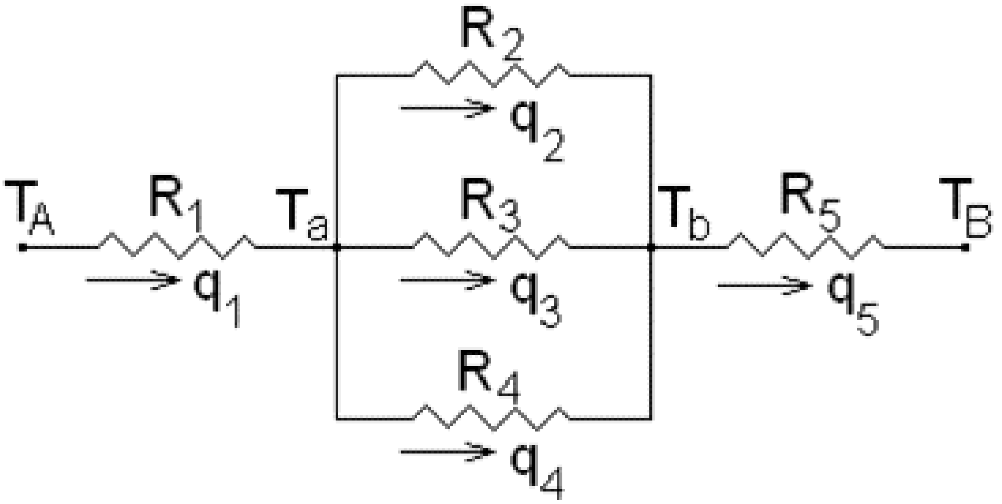
Analogia Elétrica

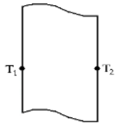
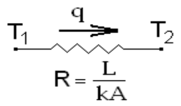
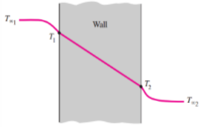
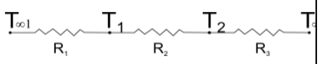
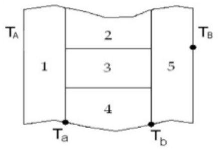
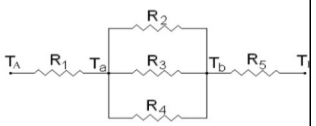
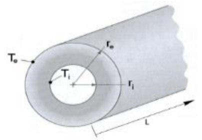
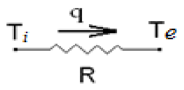
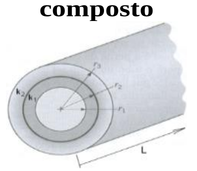
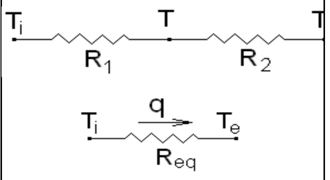
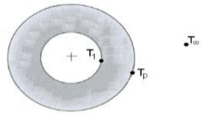
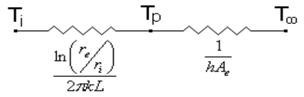
$$q = \frac{\Delta T_{total}}{R_T}$$

$$R_T = R_1 + R_{II} + R_5$$

$$\frac{1}{R_{II}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$





	Circuito Elétrico	*Fluxo de Transferência de calor*	*Resistências Térmicas*
Parede plana 		$q = \dfrac{T_1 - T_2}{R}$	$R = \dfrac{L}{kA}$
Parede plana com convecção 		$q = \dfrac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R}$	$R = R_1 + R_2 + R_3$ $R = \dfrac{1}{h_1 A} + \dfrac{L}{kA} + \dfrac{1}{h_2 A}$
Paredes compostas 		$q = \dfrac{T_1 - T_2}{R_{EQ}}$	$R_{EQ} = R_1 + R_{//} + R_5$ $\dfrac{1}{R_{//}} = \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \dfrac{1}{R_4}$
Tubo cilíndrico 		$q = \dfrac{T_i - T_e}{R}$	$R = \dfrac{\ln\left(r_e/r_i\right)}{2\pi kL}$
Tubo cilíndrico composto 		$q = \dfrac{T_i - T_e}{R_{eq}}$	$R_{eq} = \Sigma \dfrac{\ln\left(\dfrac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\pi k_i L}$
Convecção externa em tubo cilíndrico 		$q = \dfrac{T_i - T_e}{R_{eq}}$	$R_{eq} = \dfrac{\ln\left(r_e/r_i\right)}{2\pi kL} + \dfrac{1}{hA}$

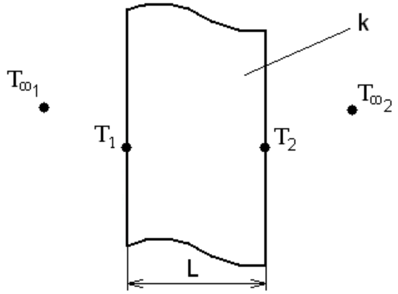
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR U

O coeficiente global de transferência de calor é definido por:

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

Claramente, *U* está associado com a resistência térmica,

- parede plana



$$R = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T$$

$$UA = \frac{1}{R} \qquad \text{ou} \qquad U = \frac{1}{RA}$$

Logo,

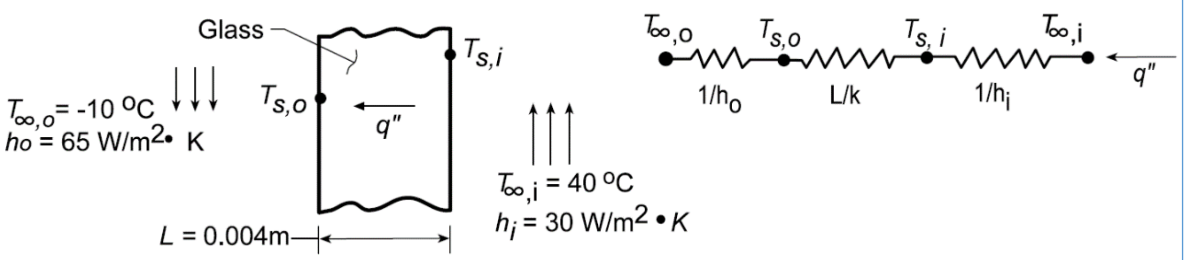
$$U = \frac{1}{\dfrac{1}{h_1} + \dfrac{L}{k} + \dfrac{1}{h_2}}$$

Exercícios Resolvidos: Exercícios adaptados do livro Fundamentos de transferência de calor e massa, Incropera

O vidro traseiro de um automóvel é desembaçado pela passagem de ar quente sobre sua superfície interna.

(a) Se o ar quente está a $T_{\infty,i}$ = *40°C* e o coeficiente de convecção correspondente é a h_i = *30 W/(m² K)*, quais as temperaturas das superfícies interna e externa de uma janela de vidro de 4 mm de espessura se a temperatura do ar ambiente é $T_{\infty,o}$ = *-10°C* e o coeficiente de convecção associado é h_e = *65 W/(m² K)?*

Diagrama esquemático do problema:



Solução:

O fluxo pode ser obtido por:

$$q'' = \frac{T_{\infty,i} - T_{\infty,o}}{R_{tot}} = \frac{T_{\infty,i} - T_{\infty,0}}{\frac{1}{h_0} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_i}}$$

$$= \frac{40°C - (-10°C)}{\frac{1}{65\frac{W}{m^2K}} + \frac{0{,}004\, m}{1{,}4\frac{W}{m\,K}} + \frac{1}{30\frac{W}{m^2\,K}}}$$

$$= \frac{50°C}{(0{,}0154 + 0{,}0029 + 0{,}0333)m^2\,K/W} = 968\frac{W}{m^2}$$

Se o fluxo de calor $q'' = h_i\left(T_{\infty,i} - T_{s,i}\right)$, a temperatura da superfície é:

$$T_{s,i} = T_{\infty,i} - \frac{q''}{h_i} = 40°C - \frac{968\frac{W}{m^2}}{30\frac{W}{m^2K}} = 7{,}7°C$$

Da mesma forma obtemos para a temperatura da superfície externa:

$$T_{s,0} = T_{\infty,0} - \frac{q''}{h_o} = -10°C - \frac{968\frac{W}{m^2}}{65\frac{W}{m^2K}} = 4{,}9°\mathrm{C}$$

Lei de Resfriamento de Newton

$$q = h \cdot A \cdot (T_S - T_\infty)$$

q = fluxo de calor por convecção (W)

h = coeficiente de convecção (W/m²°C)

A = área as superfície (m²)

Ts = Tempereatura da Superfícies (°C)

T_∞ = Temperatura do fluído ao longe (°C)

Coeficiente de Convecção (h) :

- Geometria
- Velocidade relativa do fluído
- Propriedades dos fluído: (pressão temperatura, viscosidade, massa específica)