



# Termodinâmica e Estrutura da Matéria

## Aula 17 – Transmissão de Calor: Condução

**Carlos A. Santos Silva**

Professor Associado Convidado

Cátedra WS – Energia

Departamento de Física

[carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt](mailto:carlos.santos.silva@tecnico.ulisboa.pt)



# Sumário

- Revisão do conceito de calor (Aula 3)
- Transferência de calor
- Relação com a termodinâmica
- Condução
- Condução unidimensional estacionária
- Aplicações à engenharia civil

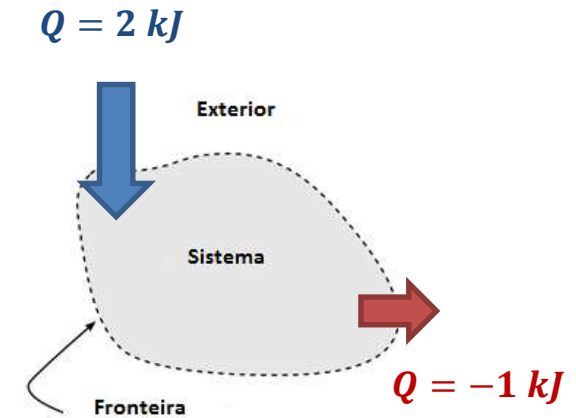
# REVISÃO DE CONCEITOS (CALOR)

# Definição

- Calor é a forma de energia que é transferida entre **duas regiões**/sistemas (ou o sistema e o exterior) quando existe uma diferença de temperatura
  - Não há transferência de calor entre dois sistemas à mesma temperatura (equilíbrio térmico)
  - Existem muitas utilizações no dia a dia da palavra calor que não correspondem à definição termodinâmica estrita (e.g. “está calor”, “armazenamento de calor”)

# Notação e Convenção

- Calor:  $Q$
- Convenção:
  - Calor transferido **para** o sistema:  $Q > 0$
  - Calor transferido **para** o exterior:  $Q < 0$



- Transferência de calor por unidade de massa  $q = \frac{Q}{m} \left( \frac{J}{kg} \right)$
- Taxa de transferência de calor:  $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \left( \frac{J}{s} = W \right)$        $Q = \int_{t1}^{t2} \dot{Q} dt (J)$
- Fluxo de calor:  $\ddot{Q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \left( \frac{W}{m^2} \right)$

# Modos de transferência de calor

- Condução

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L}$$

- Convecção

$$\dot{Q} = hA(T_1 - T_2)$$

- Radiação

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$



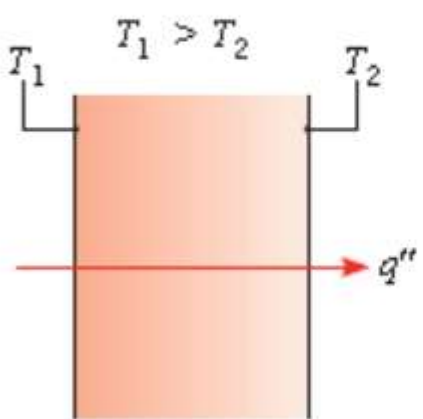
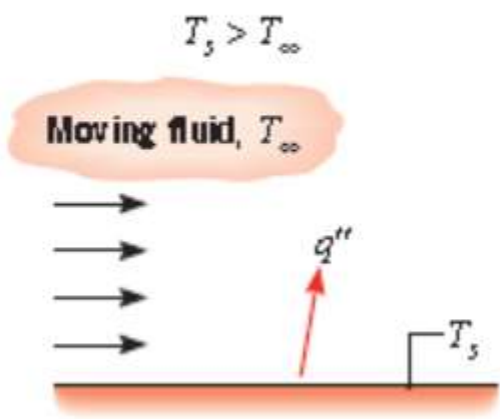
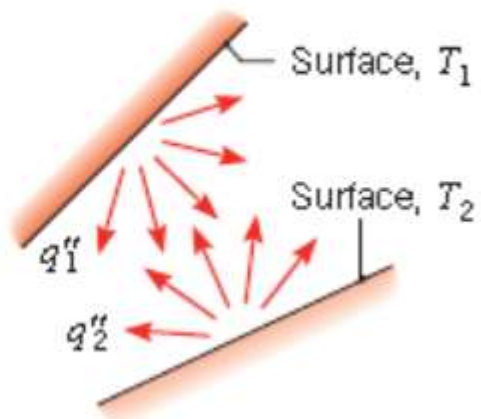
# TRANSFERÊNCIA DE CALOR

# Modos de transferência de calor

Condução

Convecção

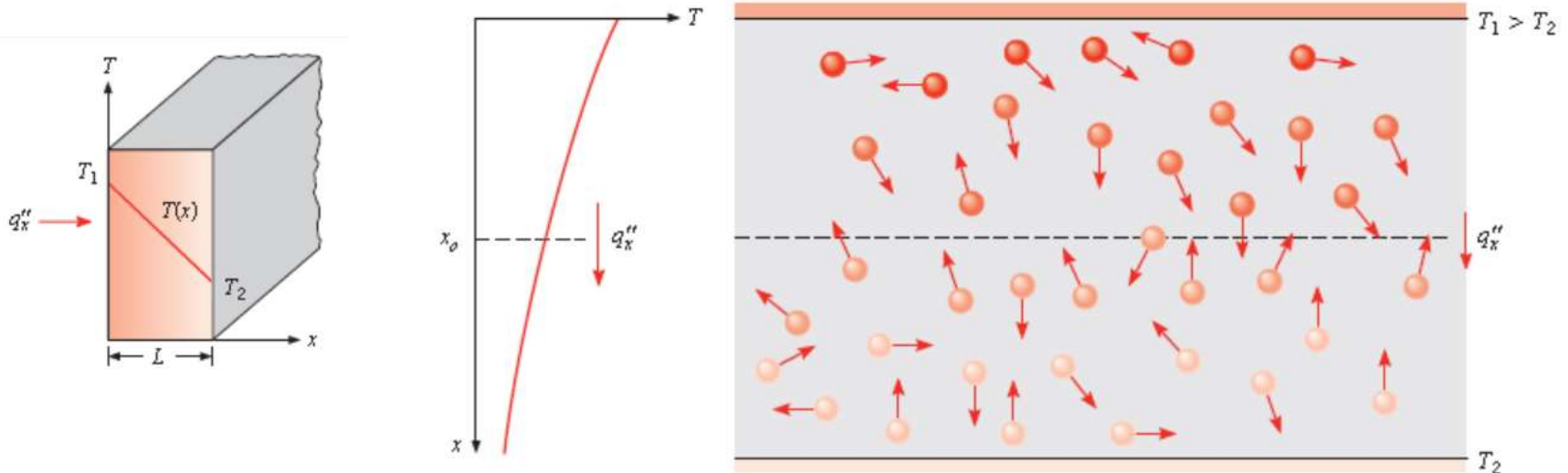
Radiação

Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces
 <p>Diagram illustrating conduction through a solid or a stationary fluid. A rectangular block is shown with temperature <math>T_1</math> on the left face and <math>T_2</math> on the right face, where <math>T_1 &gt; T_2</math>. A red arrow labeled <math>q''</math> indicates the direction of heat transfer through the block.</p>	 <p>Diagram illustrating convection from a surface to a moving fluid. A horizontal surface is shown at temperature <math>T_s</math>. A moving fluid at temperature <math>T_\infty</math> is shown above the surface. A red arrow labeled <math>q''</math> indicates the direction of heat transfer from the surface to the fluid.</p>	 <p>Diagram illustrating net radiation heat exchange between two surfaces. Two surfaces are shown at temperatures <math>T_1</math> and <math>T_2</math>. Red arrows represent radiation heat exchange between the surfaces. The net heat fluxes are labeled <math>q_1''</math> and <math>q_2''</math>.</p>



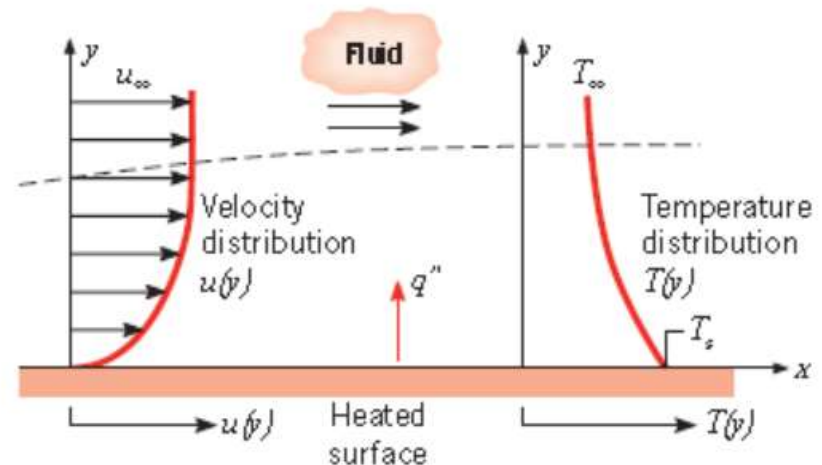
# Condução

- Transferência de calor associado à atividade molecular
  - A temperatura é uma medida da energia cinética das moléculas
  - Quando as moléculas com mais energia cinética colidem com outras com menor energia cinética, vai haver uma transferência de energia



# Convecção

- O calor é transferido não só através das moléculas, mas também através da deslocação do fluido (Advecção)
  - Convecção forçada
    - Forças externas
  - Convecção natural
    - Forças de impulsão

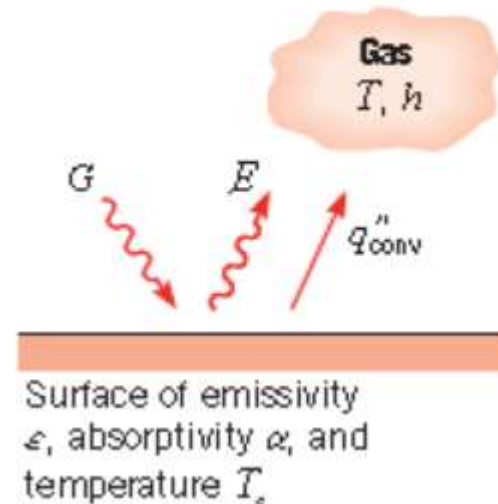


*Em geral, o calor trocado corresponde a uma variação da energia interna*

*Em alguns casos, pode ocorrer trocas de calor latente (mudança de fase)*

# Radiação

- É a energia transmitida por corpos que não estão a zero graus (0 K)
  - Corresponde a alterações na configuração dos eletrões
  - A energia é transportada por radiação eletromagnética



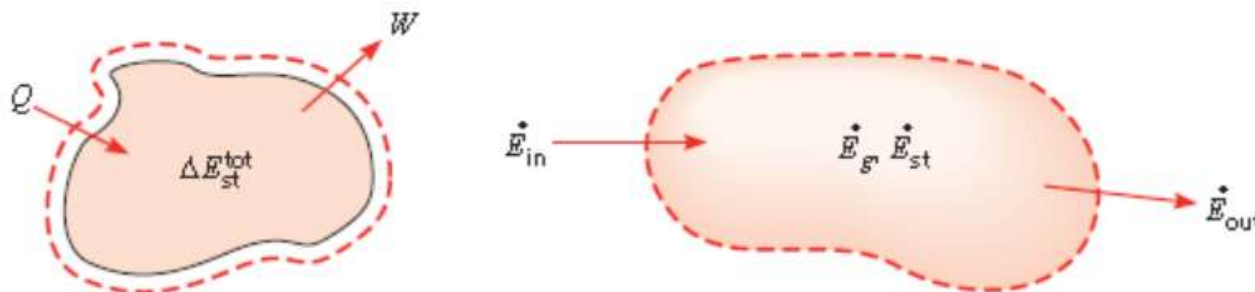
# RELAÇÃO COM A TERMODINÂMICA

# Termodinâmica vs Transferência de Calor

- A termodinâmica quantifica as trocas de calor entre o sistema e o exterior
- A transferência de calor descreve os mecanismos através das quais as trocas ocorrem por unidade de tempo e de superfície
  - Conceção de permutadores, caldeiras

# 1ª Lei da termodinâmica

- A 1ª lei da termodinâmica enuncia que  $\Delta E = Q - W$  [J]
  - Isto corresponde a variação de energia armazenada no sistema /volume de controlo
- A energia consiste em energia mecânica (cinética e potencial) e energia interna (térmica, nuclear, química)  $\Delta E = \Delta PE + \Delta KE + \Delta U$ 
  - Não há conservação de energia térmica e energia mecânica (podem-se transformar uma na outra), logo pode haver *geração* de energia térmica e/ou mecânica no sistema aberto



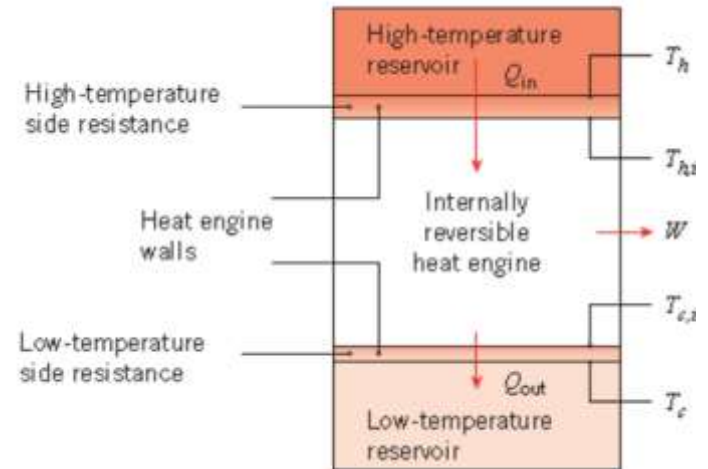
# 2ª lei da termodinâmica

- A eficiência de uma máquina térmica é dada pela eficiência de Carnot

$$\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

- A luz da transferência de calor, podemos definir que

$$\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{q_C}{q_H} = 1 - \frac{T_{C,i}}{T_{H,i}}$$



# CONDUÇÃO

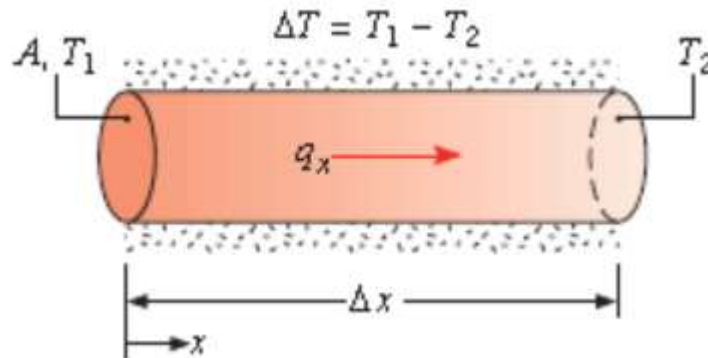


# A equação de condução (Lei de Fourier)

- Lei determinada empiricamente por observação

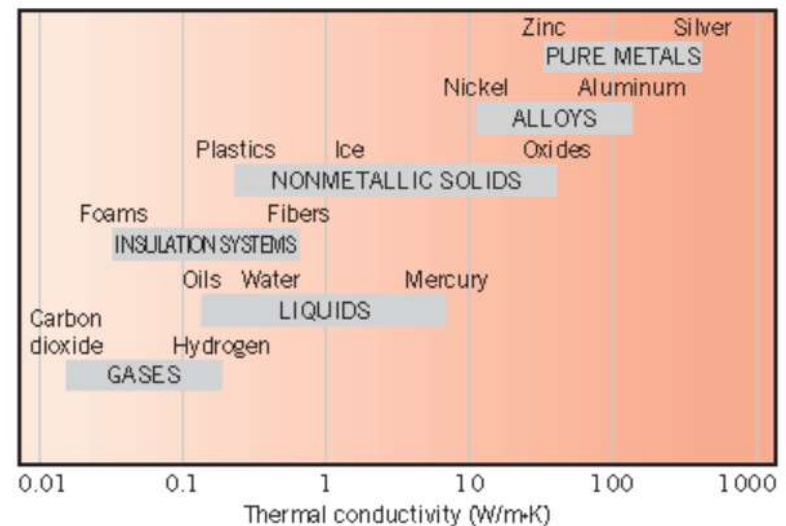
$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad \ddot{Q} = \frac{\dot{Q}}{A} = k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

- **k** é a condutividade térmica do material (W/m K)



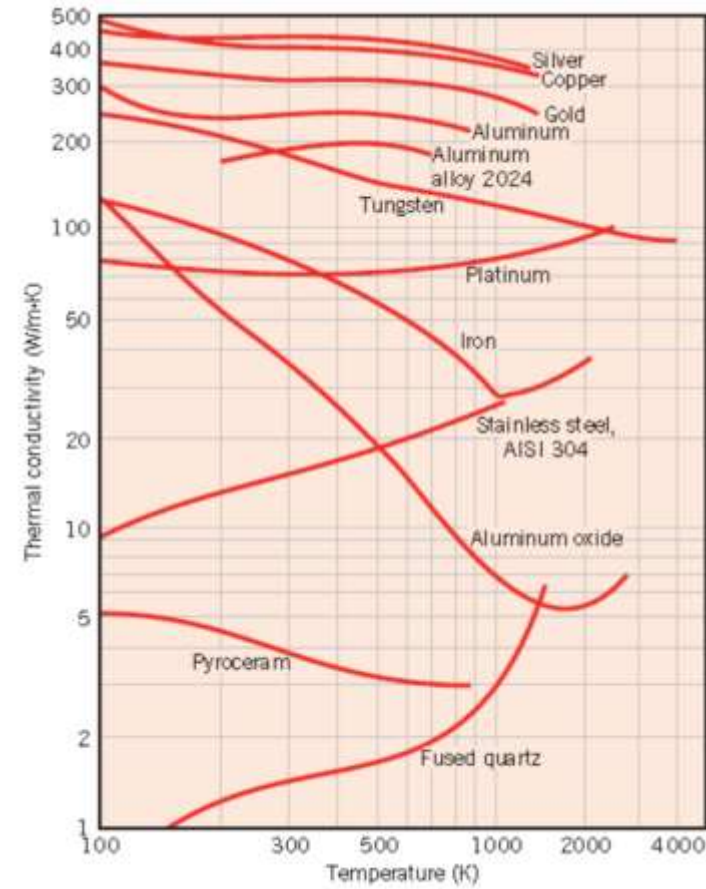
# Propriedades térmicas da matéria

- A condutividade térmica depende da liberdade de deslocamento dos átomos:
  - Poucos elétrons na última camada (elétrons livres)
  - Vibração de latência (deslocamentos da posição de equilíbrio)



# Condutividade térmica

- A condutividade é em geral muito superior nos sólidos
  - O maior espaço entre as moléculas diminui o potencial de “choque”, logo de transferência de energia
- A condutividade é em geral inversa à resistência elétrica
- Em geral, o aumento de temperatura nos metais implica a diminuição da condutividade



# Sistemas de isolamento

- Sistemas que resultam da combinação de materiais de baixa condutividade térmica
  - Materiais muito porosos, com ar
  - Em geral, quanto maior densidade, melhor
    - Lã de rocha: 0,030 a 0,041 W/(m.K.)
    - Cortiça: 0,039 W/(m.K)
    - Poliestireno expandido (EPS): 0,045 a 0,034 W/m·K
    - Poliuretano: 0,023 W/m·K



# CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL ESTACIONÁRIA

# Hipóteses simplificativas

- Neste caso, só há condução de calor numa direção
- Considera-se estacionária se as temperaturas em cada extremidade se mantiverem constantes
- Considera-se que não há geração de energia no processo

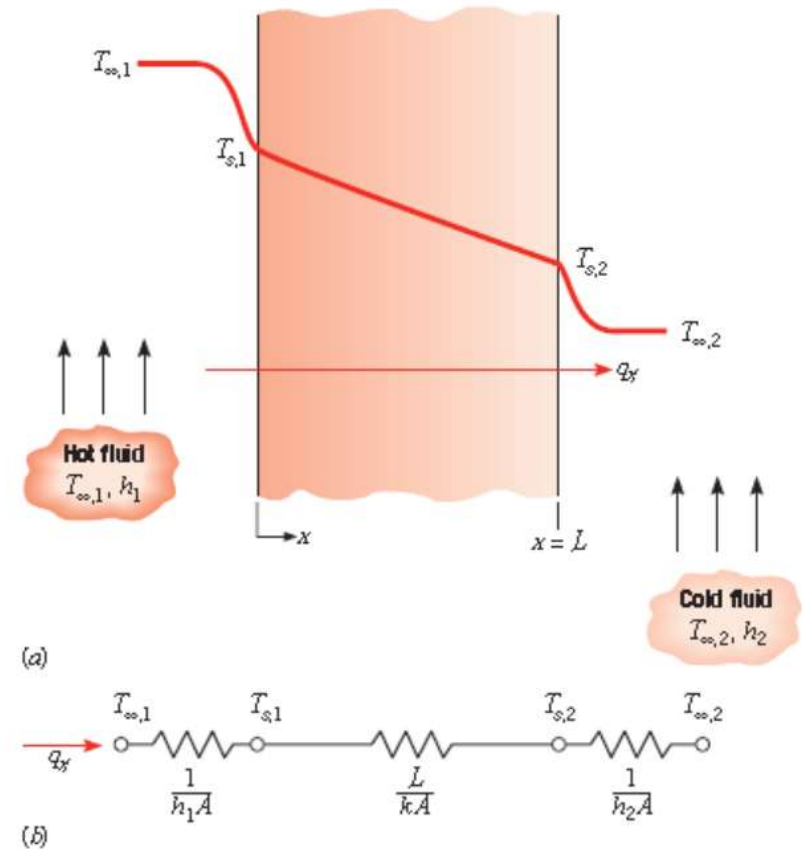
# Modelo da parede plana

- Transferência de calor

$$\dot{Q} = kA \frac{T_{s1} - T_{s2}}{L} \quad \ddot{Q} = \frac{\dot{Q}}{A} = k \frac{T_{s1} - T_{s2}}{L}$$

- Resistividade térmica

$$R = \frac{L}{kA}$$



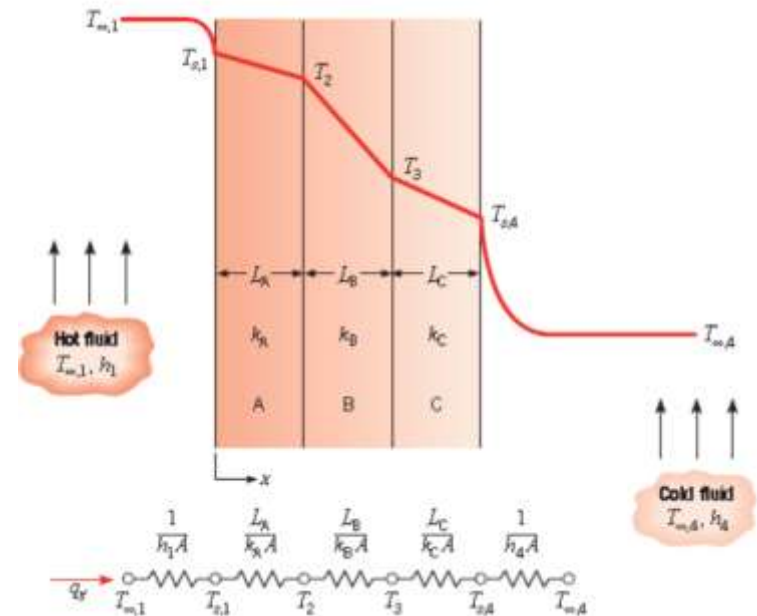
# Modelo da parede composta (1)

- Transferência de calor

$$\dot{Q} = k_A \frac{T_{s1} - T_2}{L_A} = k_B \frac{T_2 - T_3}{L_B} = k_C \frac{T_3 - T_{s4}}{L_C}$$

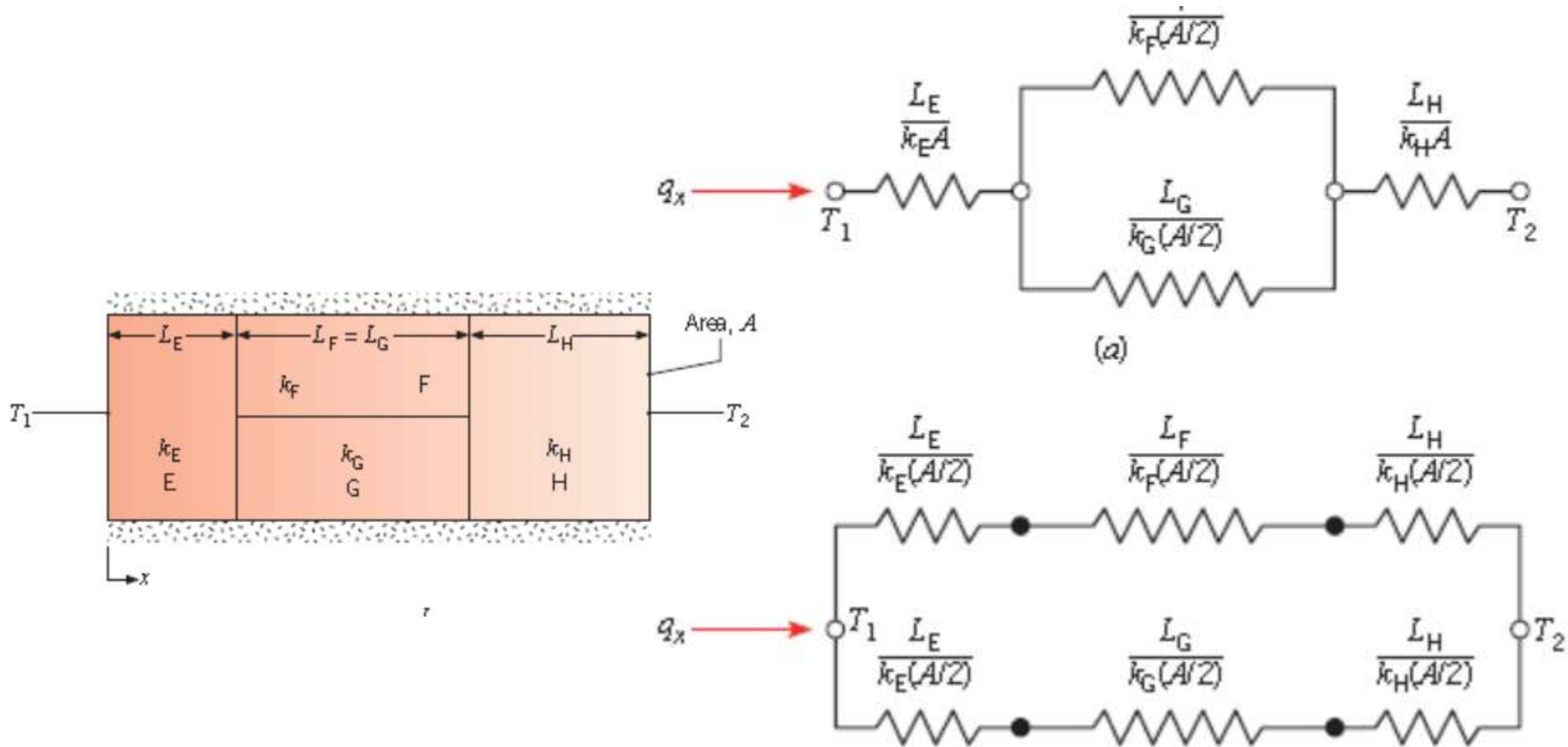
- Resistividade térmica

$$R = \frac{1}{L_A/k_A + L_B/k_B + L_C/k_C}$$



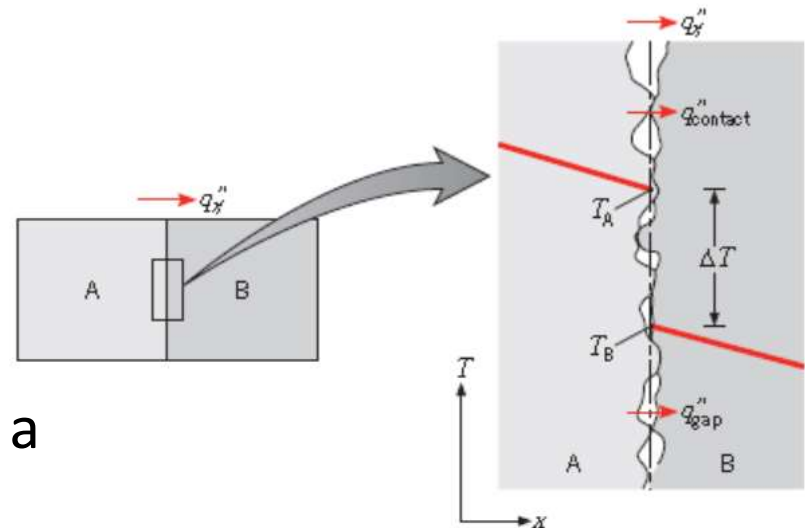


# Modelo de parede composta (2)



# Resistência de contacto

- Em sistemas compósitos, a resistência da superfície de contacto é muito importante
  - Pode baixar significativamente a temperatura
    - Rugosidade, existência de ar



$$R = \frac{T_A - T_B}{\dot{Q}}$$

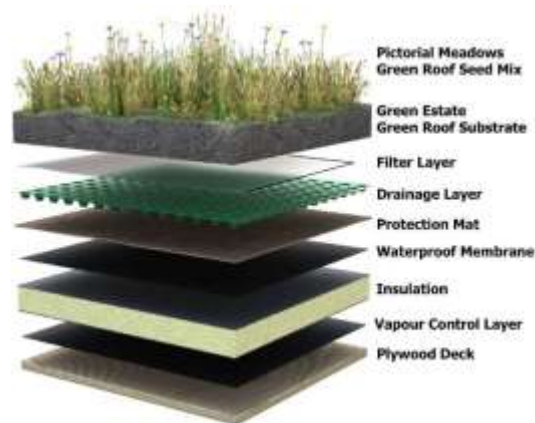
# APLICAÇÕES À ENGENHARIA CIVIL

# Isolamento térmico



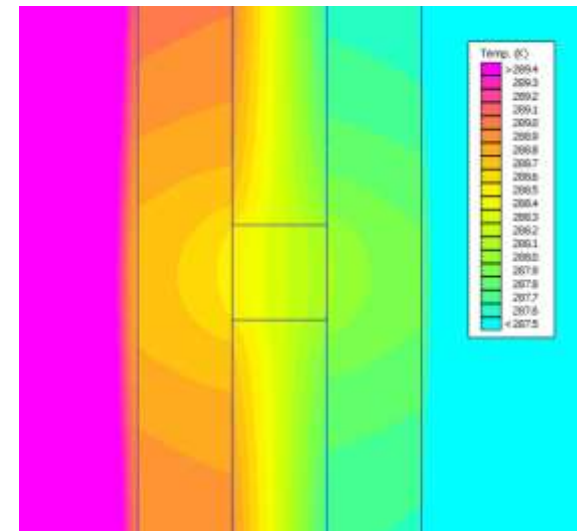
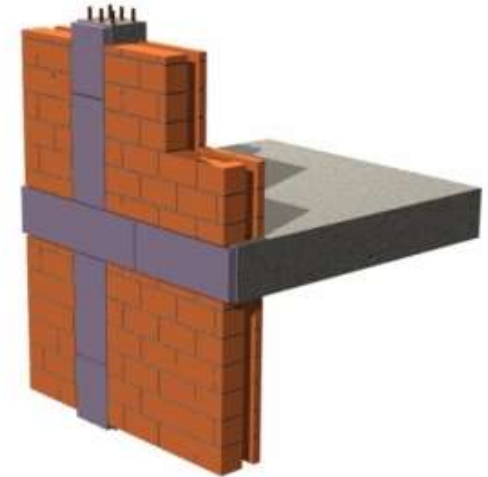
# Telhados e fachadas verdes

- Adiciona espessura (L) com um material relativamente isolante
- $k$ : 0.18 a 0.41 W/mK
  - Telhado de betão  $k=1.4$  W/mK

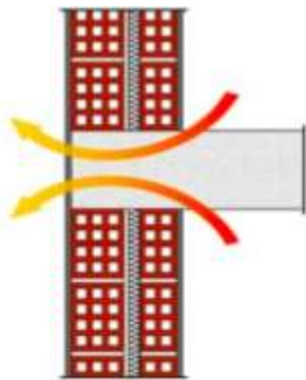


# Pontes térmicas

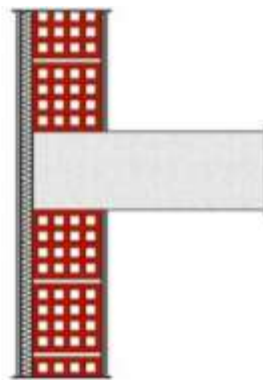
- Situação que descreve a interrupção do isolamento térmico por existência de um material com alta condutividade térmica
- Podem representar até 20% das perdas, comparado com as perdas nas paredes, janelas, telhadas



# Solucionando pontes térmicas



Isolamento térmico aplicado na caixa-de-ar



Isolamento térmico aplicado pelo exterior

