



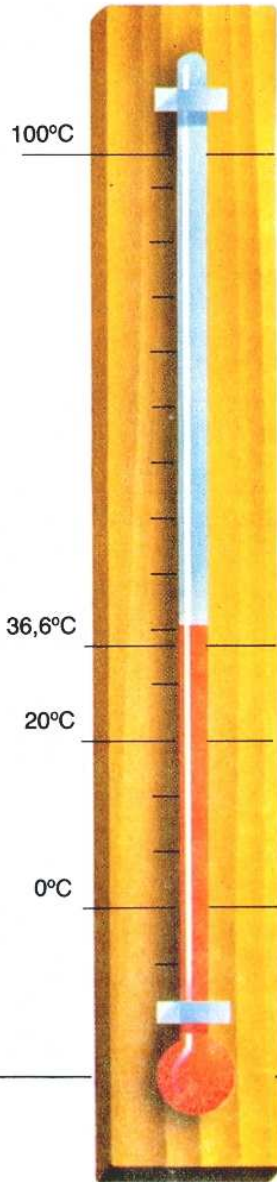
**Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos - IFSC**

FCM 208 Física (Arquitetura)

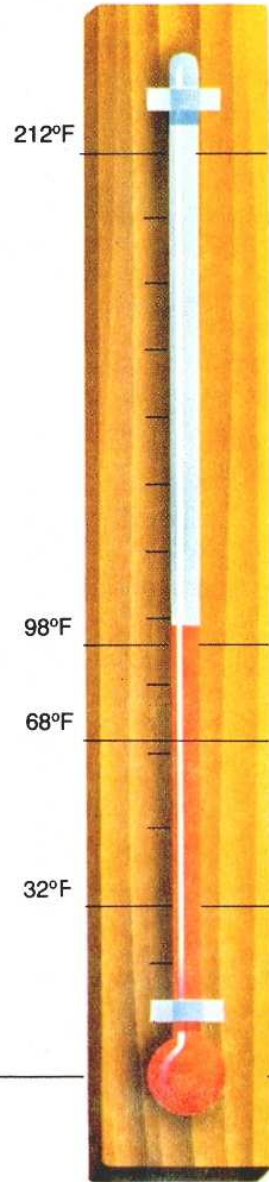
Calor, energia e transferência de calor

Prof. Dr. José Pedro Donoso

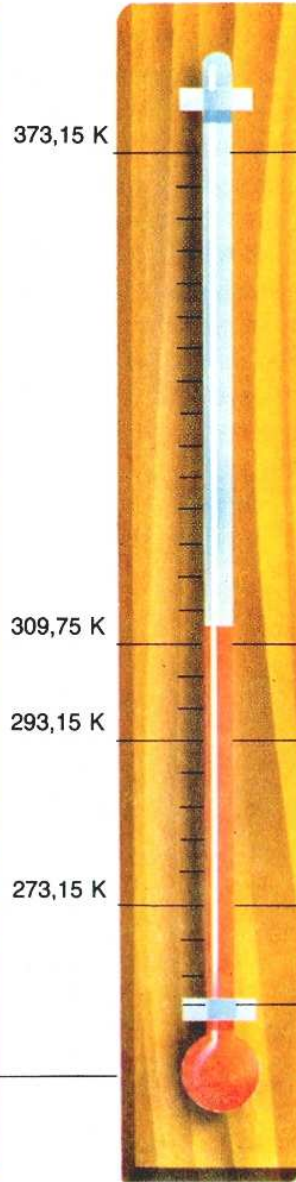
Escala Celsius
ou centigrada



Escala
Fahrenheit



Escala Kelvin
ou absoluta



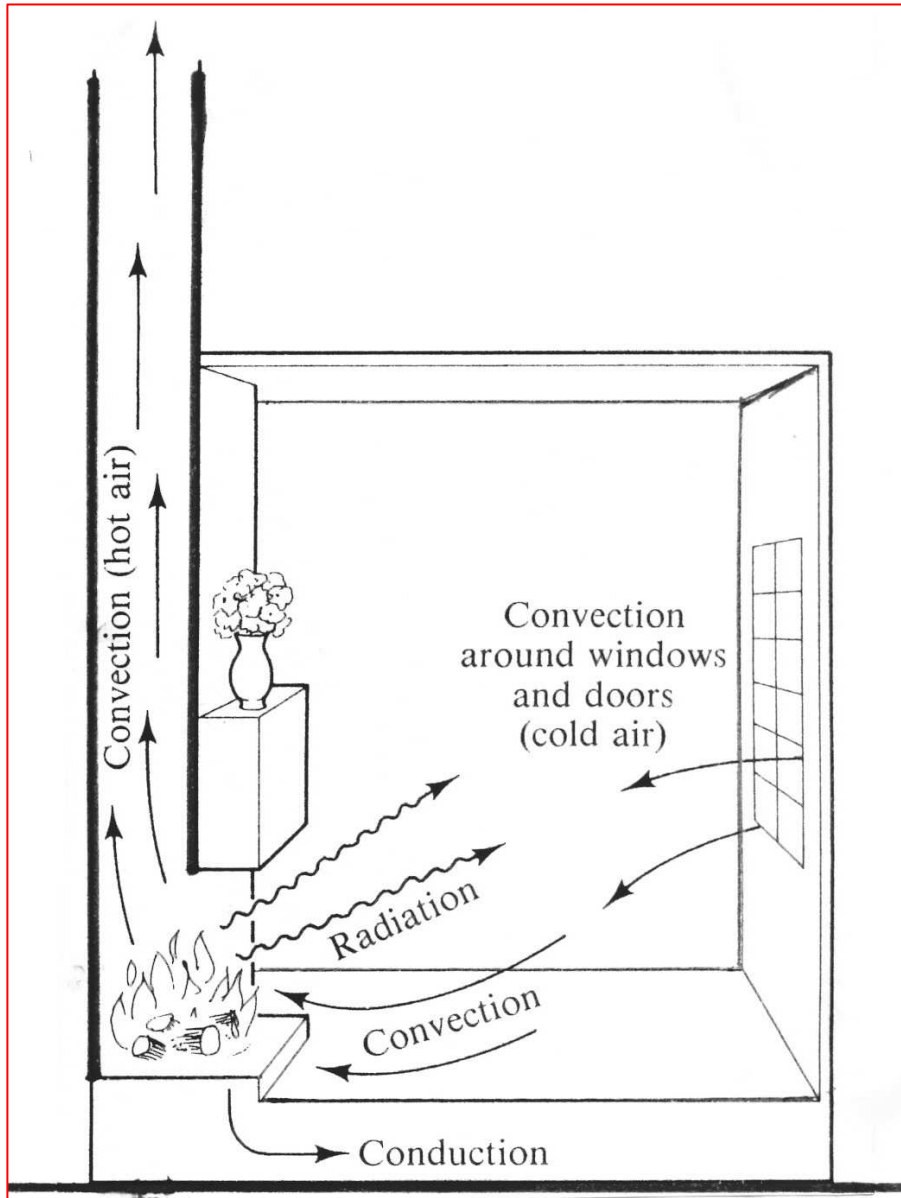
Escalas de Temperatura

Transformação de graus Celsius
a Fahrenheit:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 0.556 \times [T(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

Conversão graus Kelvin

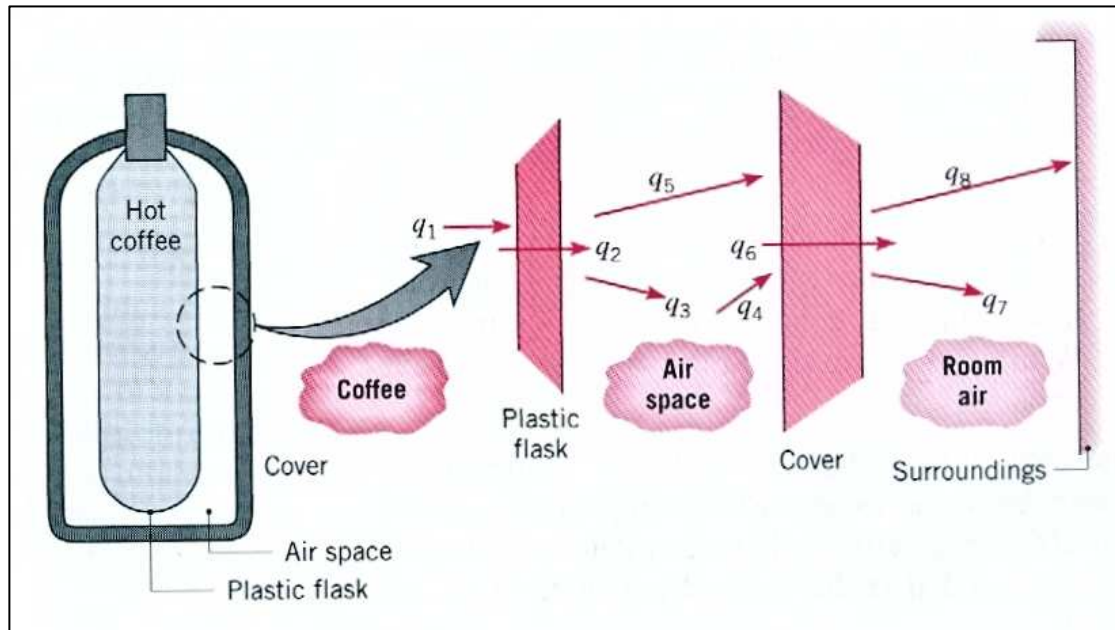
$$T(\text{Kelvin}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$$



Processos de Transferência de Calor

O calor passa de um lugar para outro por:

- 1 - **condução**: transferência de calor que ocorre através do meio.
- 2 - **convecção**: transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento (o vento, por exemplo).
- 3 - **radiação térmica**: toda superfície a uma temperatura maior que zero Kelvin, emite energia na forma de ondas eletromagnéticas.

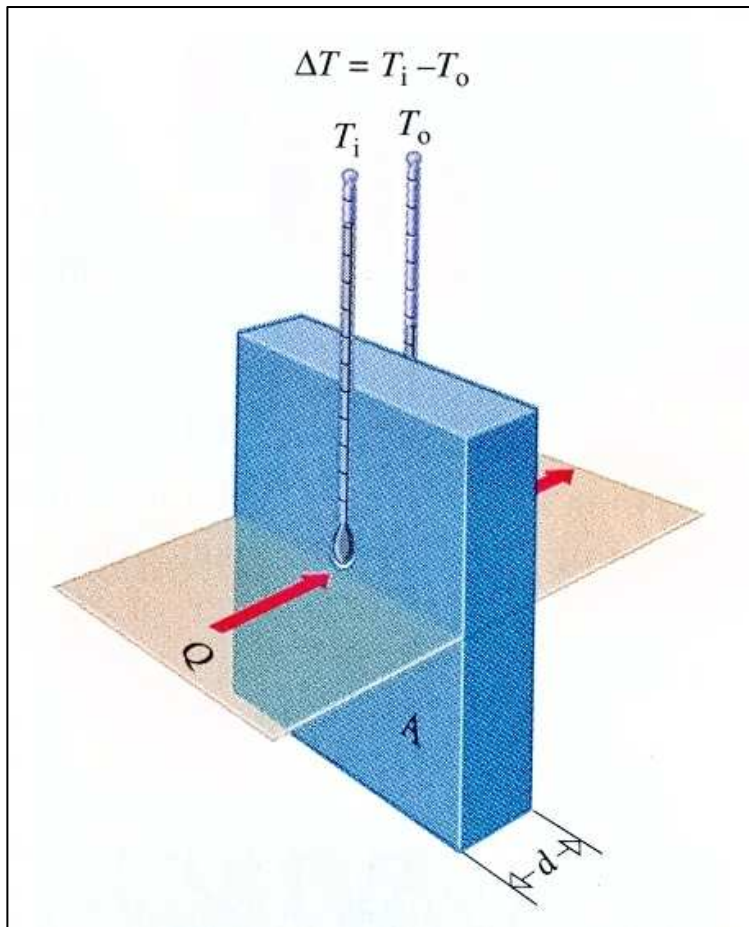


Exemplo:

Processos de transferência de calor numa garrafa térmica com café quente

- q_1 : convecção natural do café para o frasco
- q_2 : condução através do frasco
- q_3 : convecção natural do frasco para o ar
- q_4 : convecção natural do ar para o invólucro plástico
- q_5 : troca líquida por radiação entre a superfície externa do frasco e a superfície interna do invólucro plástico
- q_6 : condução através do invólucro plástico
- q_7 : convecção natural do invólucro plástico para o ar ambiente
- q_8 : troca líquida de calor por radiação entre a superfície externa do invólucro plástico e a vizinhança

Incropera & DeWitt
Fundamentos de transferência de calor e de massa
 Editora LTC



Transferência de calor por condução

A taxa de transmissão de calor ($\Delta Q/\Delta t$) através de uma camada de espessura d de um material é proporcional a área A , e a diferença de temperatura entre as duas faces ΔT :

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{kA\Delta T}{d}$$

K : **condutividade térmica** do material [W/m-K]

Valores típicos: cobre: $k = 393$ W/m-K; tijolo: 0.69; vidro: 0.78; madeira de pinho ~0.13; cimento 0.29; argamassa: 1.16; concreto: 1.37; chapa cimento amianto: 0.74; Insulex: 0.064; lâ de vidro 0.038 W/m-K.

CONDUTIVIDADES TÉRMICAS

SUBSTÂNCIA k (W/m · K)

Metais

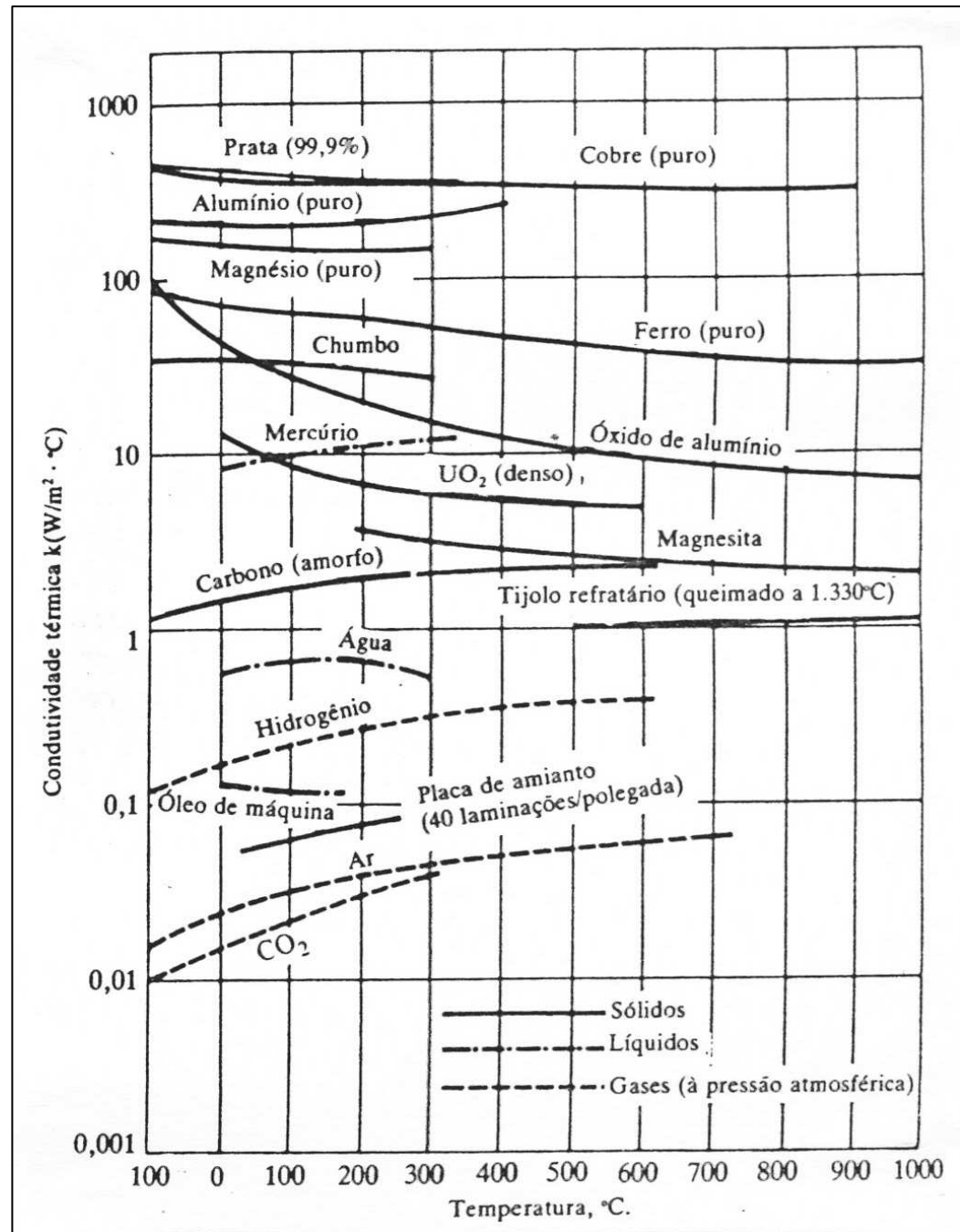
Alumínio	205,0
Latão	109,0
Cobre	385,0
Chumbo	34,7
Mercúrio	8,3
Prata	406,0
Aço	50,2

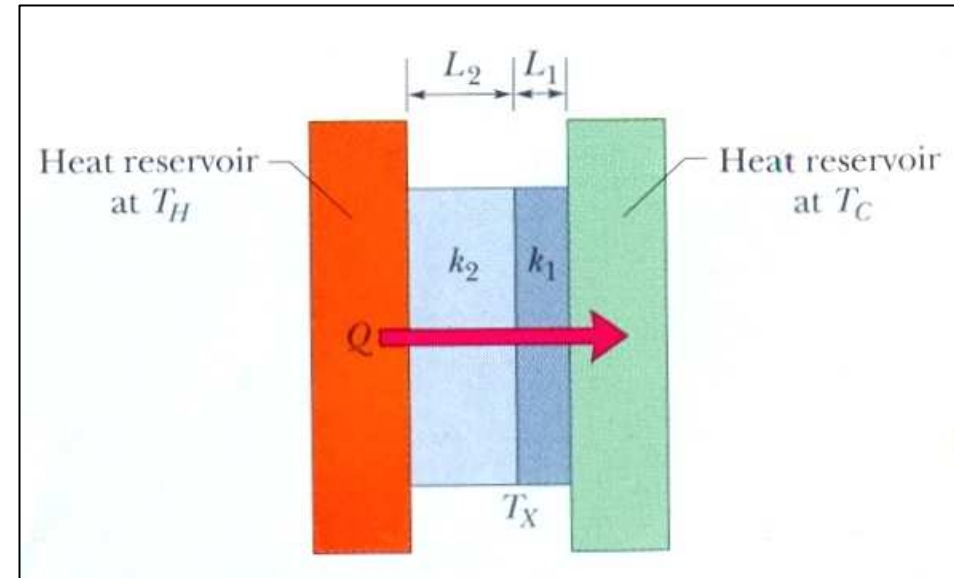
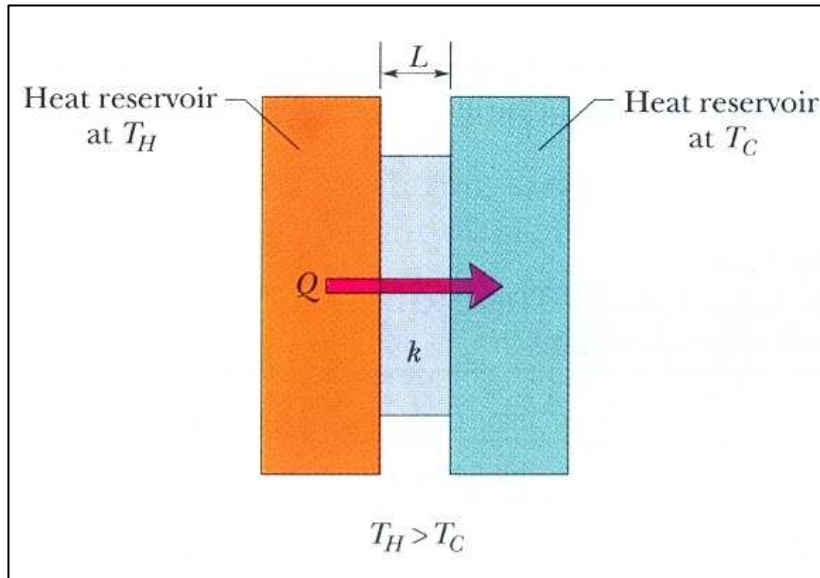
Diversos sólidos (valores típicos)

Tijolo (isolante)	0,15
Tijolo vermelho	0,6
Concreto	0,8
Cortiça	0,04
Feltro	0,04
Fibra de vidro	0,04
Vidro	0,8
Gelo	1,6
Lã mineral	0,04
Isopor	0,01
Madeira	0,12–0,04

Gases

Ar	0,024
Argônio	0,016
Hélio	0,14
Hidrogênio	0,14
Oxigênio	0,023





Na construção civil costuma-se utilizar o conceito de *resistência térmica*: $R = d/k$

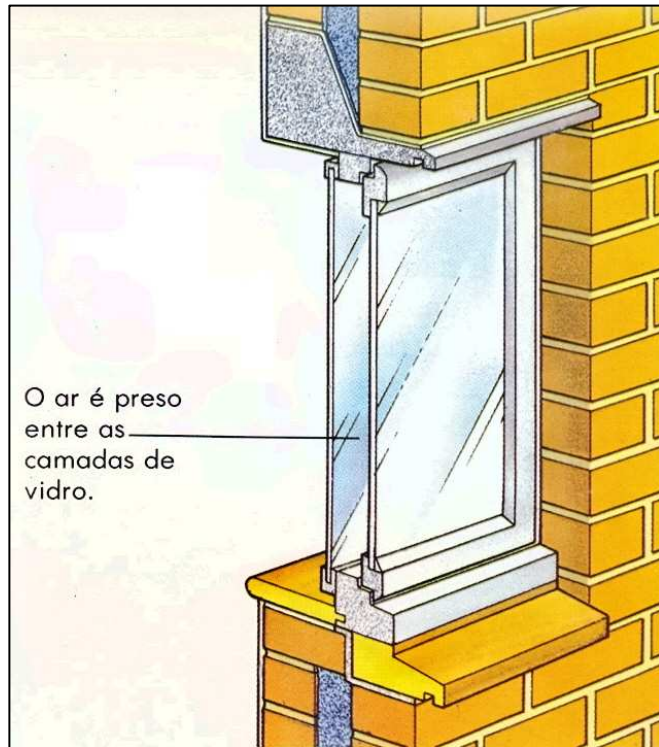
Quando há várias camadas da mesma superfície A , a resistência vale

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Neste caso, a taxa de perda de calor é:

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{A \Delta T}{R}$$

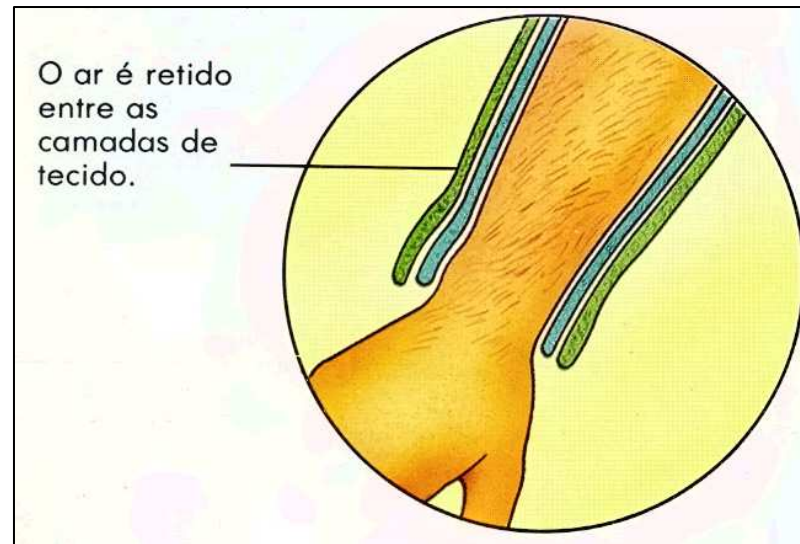
Aplicações



B. Walpole, *Ciência Divertida: Ar*
(Melhoramentos, 1991)
José de Lima Acioli,
Física Básica para Arquitetura
(Editora UnB, 1994)

- 1- Em julho de 1988 a temperatura atingiu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ no Rio Grande do Sul.
 - (a) Calcule a que taxa perde calor uma parede de tijolo de $6\text{ m} \times 4\text{ m}$ e 13 cm de espessura. A temperatura interna é de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Condutividade térmica do tijolo, $k = 0.74\text{ W/m-K}$.
 - (b) Calcule a taxa de perda de calor através de uma janela de vidro de $2.60 \times 1.80\text{ m}^2$ de área e 3 mm de espessura.
 - (c) Se instala uma janela reforçada, com uma lacuna de ar de 2 cm entre dois vidros da mesma espessura. Qual será a taxa de perda de calor, presumindo-se que a condução seja o único mecanismo importante de perda de calor? A condutividade térmica do ar é 0.026 W/m-K

Respostas: (a) $\Delta Q/\Delta t = 4.5 \times 10^3\text{ W}$,. (b) 51.5 kW ,
(c) 200 W



2- Considere um dia muito frio de inverno em Campos de Jordão.

- a) Calcule a que taxa o calor de um corpo flui para fora através das roupas de uma pessoa, sendo que a área da superfície do corpo é de 1.8 m^2 e as roupas têm 1.2 cm de espessura. A temperatura superficial da pele é de $33 \text{ }^\circ\text{C}$ enquanto a superfície externa das roupas está a $1 \text{ }^\circ\text{C}$. A condutividade térmica das roupas é 0.040 W/m-K .
- b) Como muda a resposta se, após uma queda, as roupas ficam molhadas ($k = 0.60 \text{ W/m-K}$)?

Respostas: a perda de calor através da roupa: (a) $\Delta Q/\Delta t = 192 \text{ W}$; (b) 2.9 kW

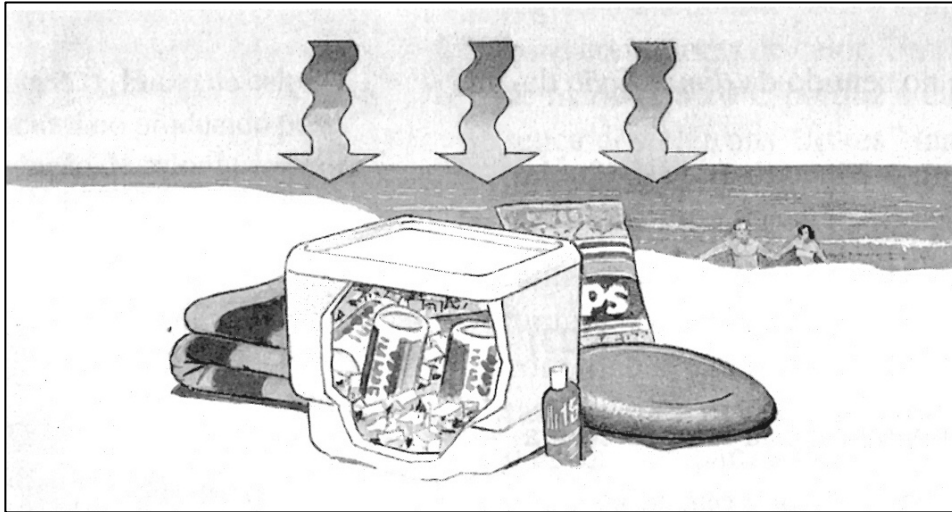
3- Uma lamina de madeira de $\frac{3}{4}$ " de espessura é utilizada para o forro de um quarto de 18 m^2 . Num dia quente, a superfície superior do forro está a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (313 K) enquanto a superfície inferior está a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K). Calcule a taxa de calor transferido do forro para o ar do quarto. Como muda a resposta se o forro do quarto for constituído por um sandwich de 4" de lâ de vidro entre duas lâminas de madeira de $\frac{3}{4}$?

Respostas: (a) 1.9 kW; (b) 91 W

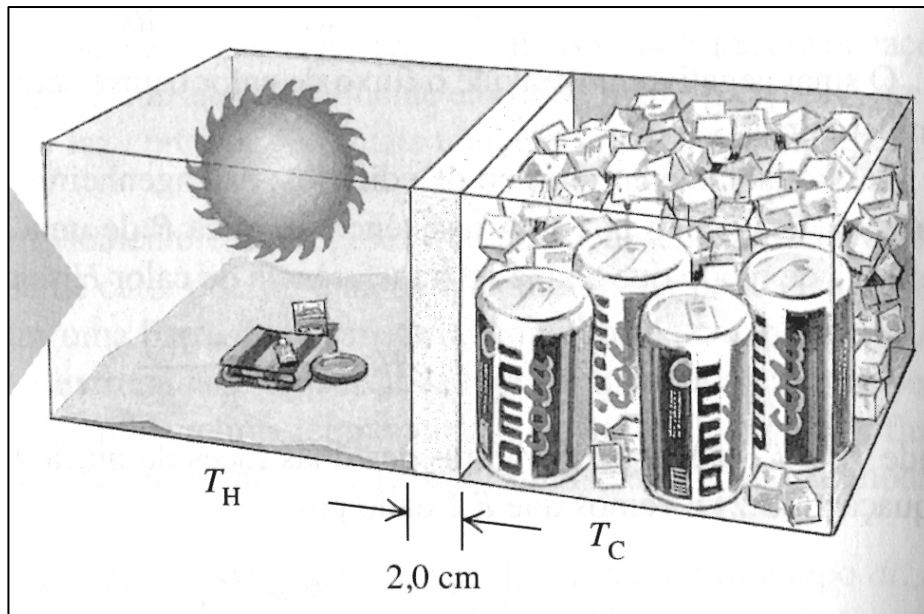
4- A face externa de uma parede de tijolos de 20 cm de espessura de uma sala esta a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ e a face interna esta a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Devido a essa diferença de temperatura se estabelece uma transferência de calor de fora para dentro. Qual a espessura que deve ter uma camada de feltro forrando a parede interna para que a taxa de transmissão de calor seja reduzida á metade?

A condutividade termica do feltro é $k = 0.042 \text{ W/m-K}$ e a do tijolo, 1 W/m-K .

Resposta: 1.2 cm.



Uma caixa de isopor usada para manter bebidas frias possui uma área total de 0.8 m^2 . A espessura da parede é 2 cm . A caixa está cheia de água, gelo e latas de refrigerantes.



- (a) Qual a taxa do fluxo de calor para o interior da caixa se a temperatura da parede externa for $30 \text{ }^\circ\text{C}$?
- (b) Qual é a quantidade de gelo que se liquefaz durante um dia?

Respostas: (a) 12 W (b) 3.1 kg

Young & Freedman
Sears & Zemansky, Física II
Pearson, 2007



A figura mostra a neve no telhado onde as vigas permanecem geladas. O telhado está bem isolado. O calor flui dos cômodos interiores aquecidos, passa entre as vigas e derrete a neve.

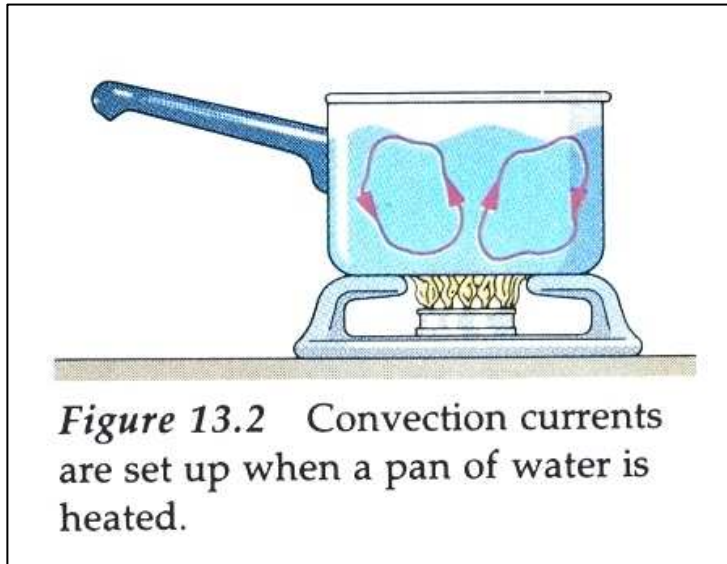
E. Hecht, *Physics* Brooks & Cole 1994

Uma forma de retardar a transferência de calor é usar um isolante térmico. A madeira é um bom isolante térmico, já que não retira muito calor de sua mão.

Trefil & Hazen, *Física viva* (LTC, 2006)



Transferência de calor por convecção

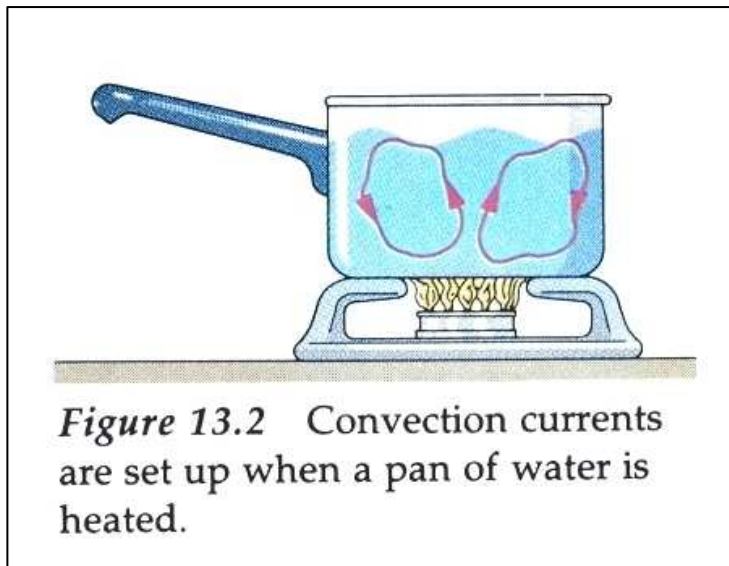


Neste processo o calor é transferido pelo movimento do médio (líquido ou ar). A taxa de transmissão de calor ($\Delta Q/\Delta t$) do objeto quente para o medio que o rodeia é proporcional a área A do objeto e a diferença de temperatura ΔT :

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = hA\Delta T$$

onde o **coeficiente de convecção** h depende da forma e orientação do objeto e das propriedades de transferência do médio.

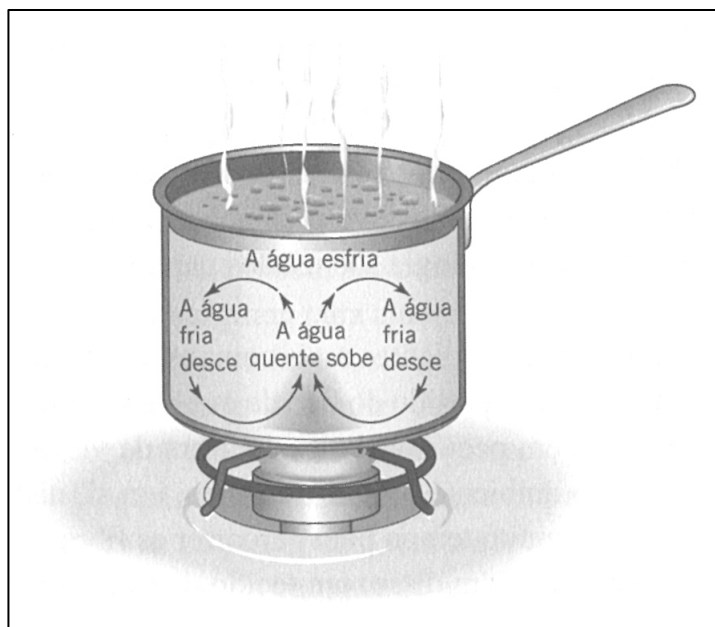
O coeficiente de convecção natural do ar para uma placa ou parede vertical, é $h = 1.77 (\Delta T)^{1/4} \text{ W/m}^2\text{-K}$.



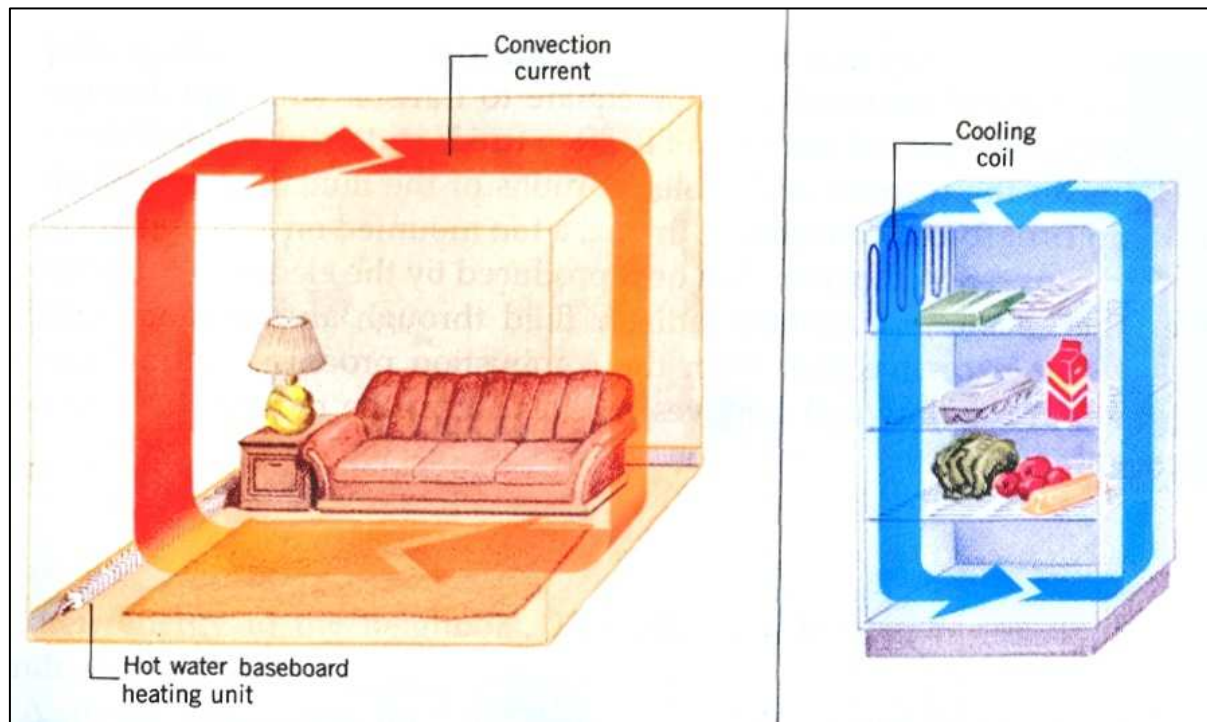
Aplicação:

Analise o processo de transferência de calor no caso de uma panela com água colocada no fogão.

Resposta: a água quente no fundo da panela se expande ligeiramente e, portanto diminui sua densidade. Esta água quente se elevará então para a superfície enquanto a água fria (mais densa) vai para o fundo da panela. Este movimento de convecção é responsável pelo aquecimento homogêneo da água.



Trefil & Hazen, *Física viva* (LTC, 2006)
Cutnell & Johnson, *Physics* (Wiley, 1995)



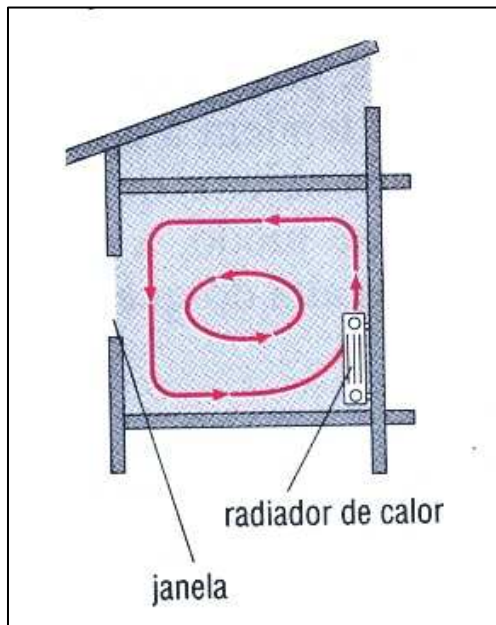
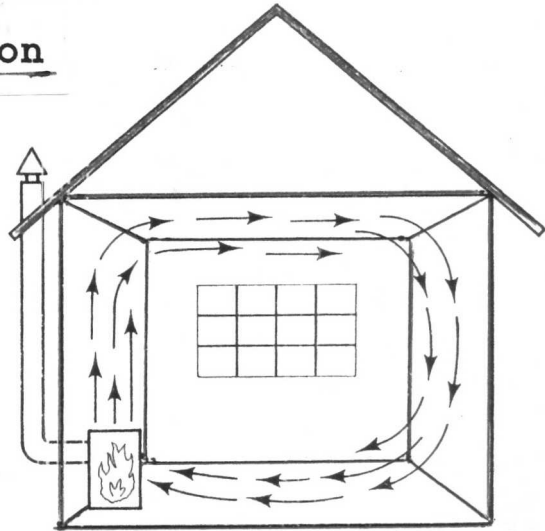
Correntes de convecção

Sala: O ar aquecido pela unidade de aquecimento no piso se eleva até o teto do quarto empurrado pelo ar frio mais denso. Este movimento de convecção é responsável pelo aquecimento homogêneo do ar na sala.

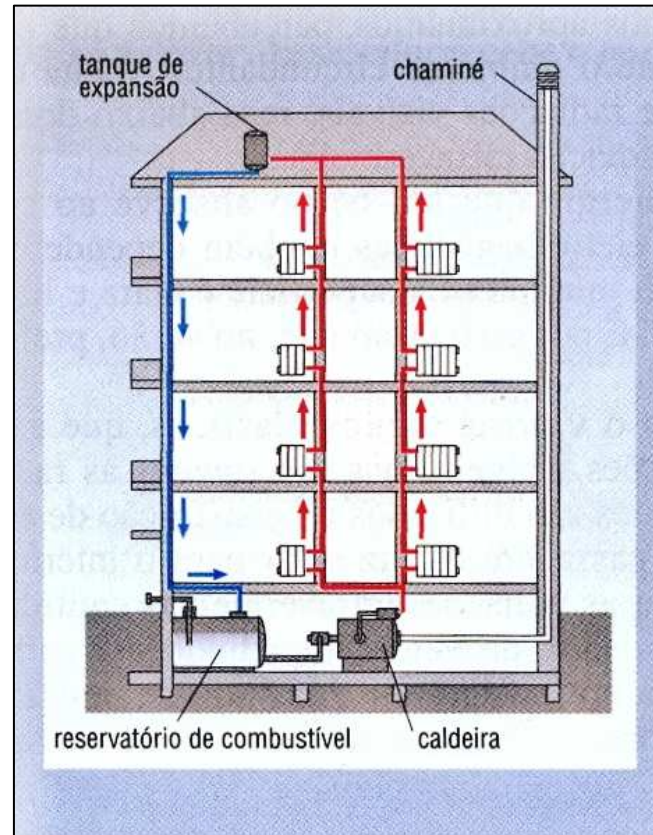
Geladeira: o ar esfriado pela serpentinas de refrigeração circula em direção ao fundo da geladeira.

Cutnell & Johnson, *Physics* (Wiley, 1995)

tion



Correntes de convecção



U. Amaldi, *Imagens da Física* (editora Scipione, 2006)

Transferência de calor por processos combinados de convecção e de condução

Resistência térmica:

$$R = \left(\frac{1}{h_1 A} \right) + \left(\frac{L}{kA} \right) + \left(\frac{1}{h_2 A} \right)$$

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \left(\frac{\Delta T}{R} \right)$$

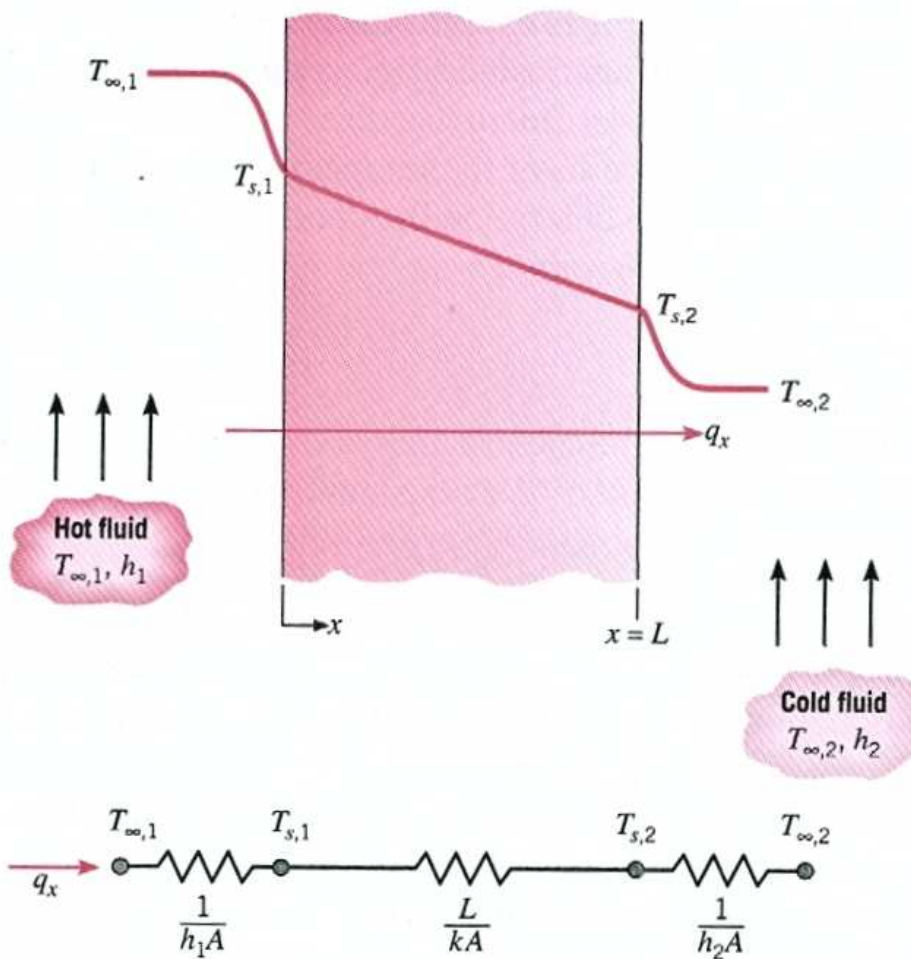


FIGURE 3.1 Heat transfer through a plane wall. (a) Temperature distribution. (b) Equivalent thermal circuit.

Incropera & DeWitt
*Fundamentos de transferência
de calor e de massa*
Editora LTC

2 - A área exposta de um dispositivo eletrônico é 100 mm^2 . Para assegurar-se de que a temperatura dessa superfície não passe de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (323 K) quando a temperatura ambiente é de $35 \text{ }^\circ\text{C}$, o calor deve ser removido a uma taxa de 0.6 W . Determine o coeficiente h de transferência de calor?

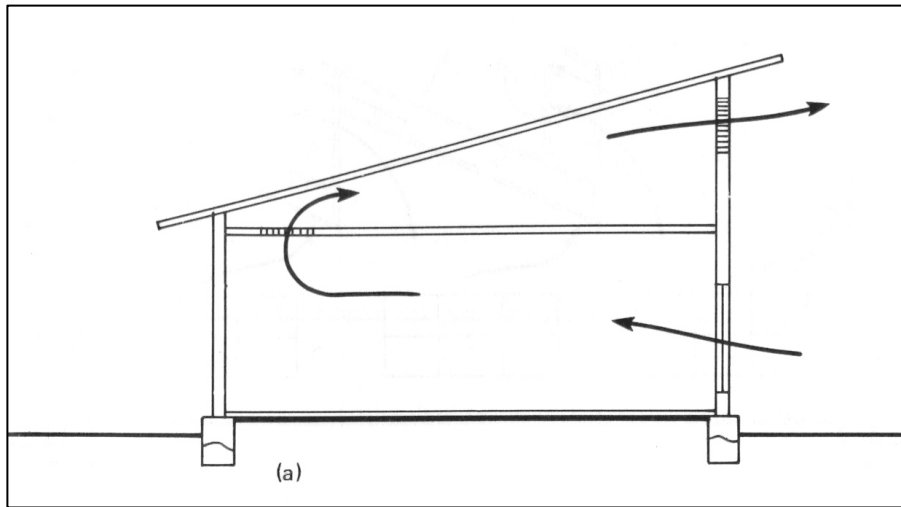
Resposta: $h = 400 \text{ W/m}^2\text{-K}$

3- Uma janela de vidro de 5 mm de espessura tem área $A = 1 \text{ m}^2$. O vidro está colocado entre o ar do quarto ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) e o ar externo no inverno ($T = -10 \text{ }^\circ\text{C}$). O coeficiente de transferência de calor do ar da sala para o vidro é $h_1 = 15 \text{ W/m}^2\text{-K}$ enquanto que a convecção entre a superfície do vidro e o ar externo é $h_2 = 20 \text{ W/m}^2\text{-K}$. A condutividade térmica do vidro é $k = 1 \text{ W/m-K}$. Determine a perda de calor do ar da sala através do vidro.

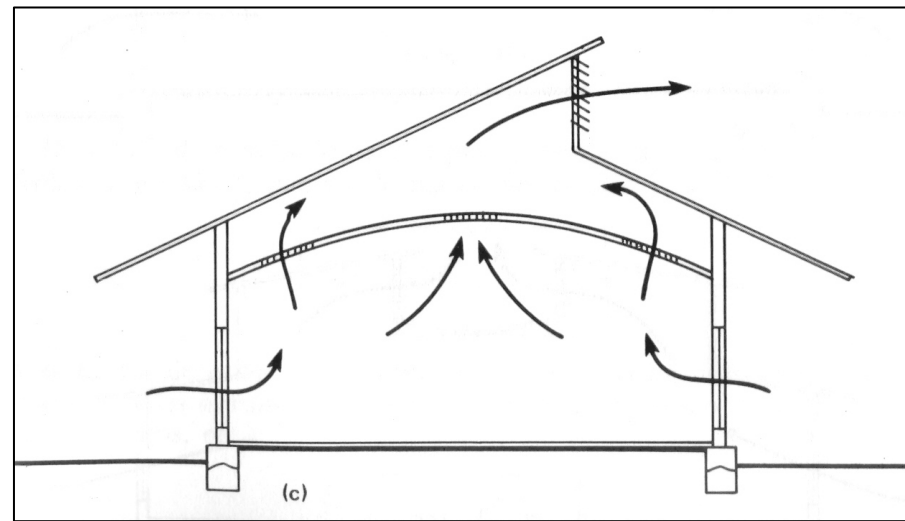
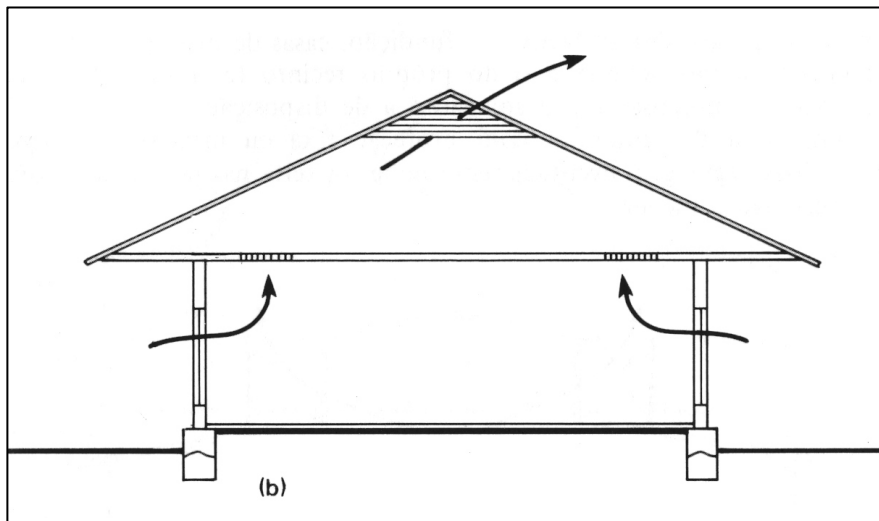
Solução:

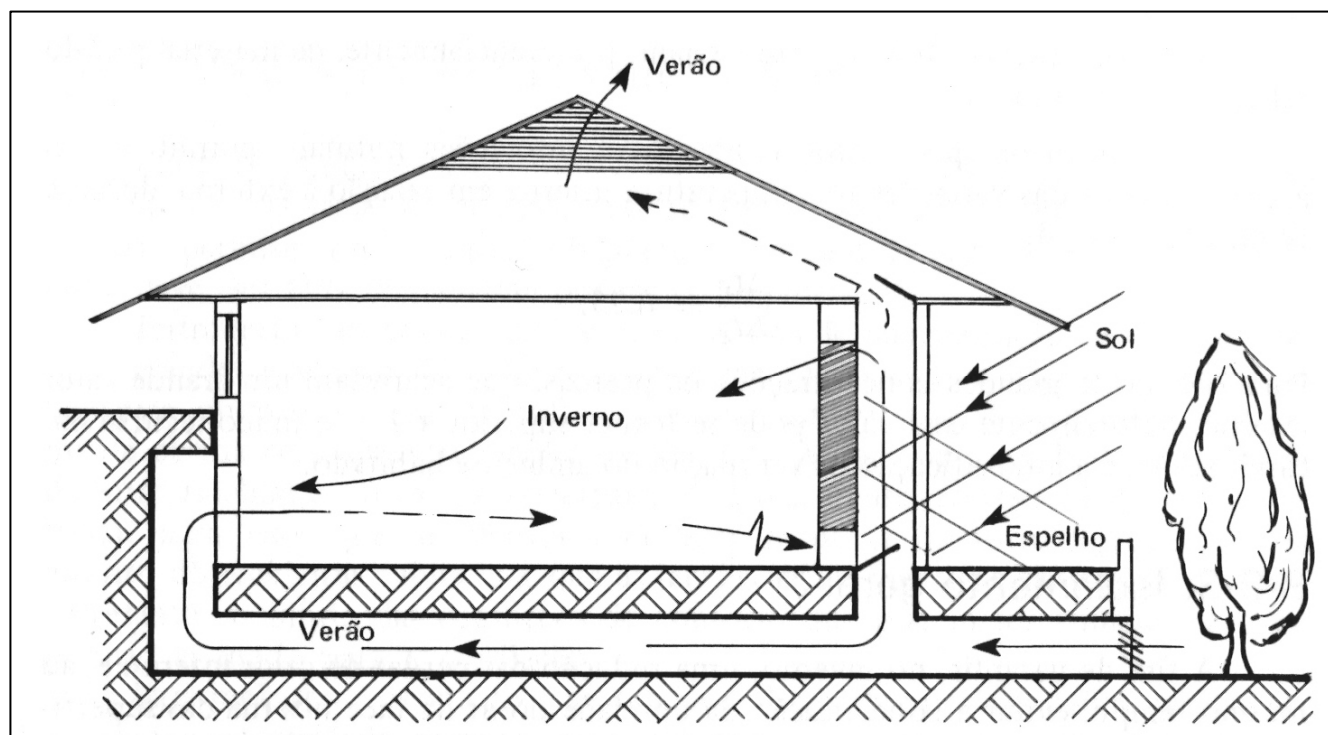
A resistência térmica total é $R = (1/h_1A) + (0.005/kA) + (1/h_2A) = 0.12 \text{ K/W}$

A perda de calor é: $\Delta Q/\Delta t = \Delta T/R = 247 \text{ W}$



A colocação de aberturas nas coberturas aumenta a ventilação natural e arrastam o calor, pela formação de uma camada de ar móvel entre o forro e o telhado. O calor de insolação no verão, incide sobre as telhas e aquece o forro





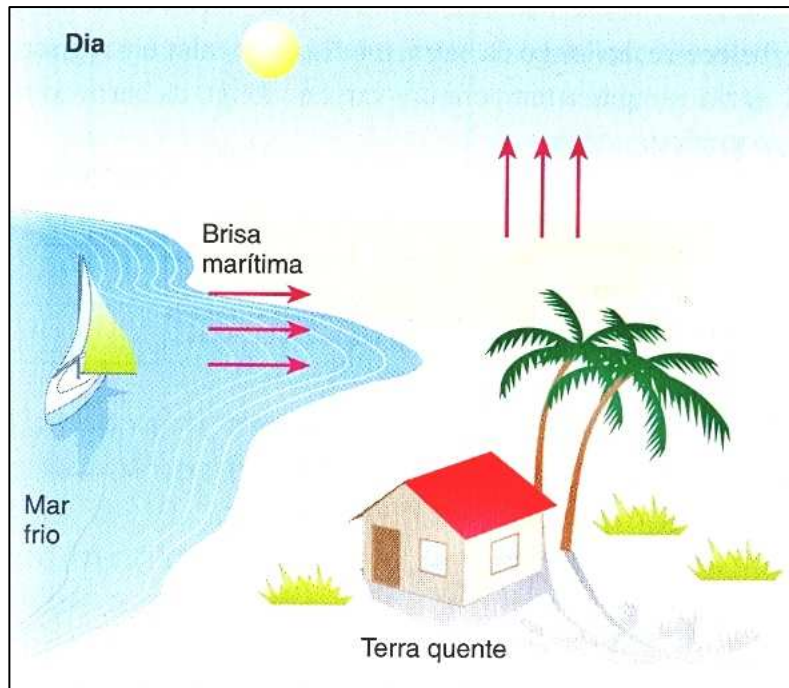
A refrigeração pode ser obtida por meio de pedras resfriadas por água. A figura mostra uma casa com aquecimento solar por meio de ar quente, e resfriamento por meio de terra.

Ennio Cruz da Costa: *Arquitetura Ecológica* (Editora E. Blücher, 2000)



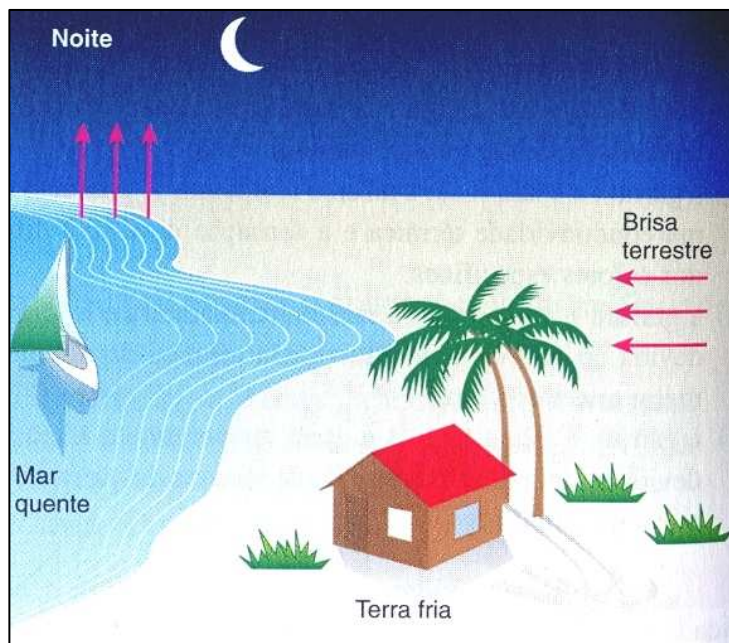
Circulação atmosférica

Coleção Ciência & Natureza
Espaço e Planetas
Time Life e Abril Livros, 1995

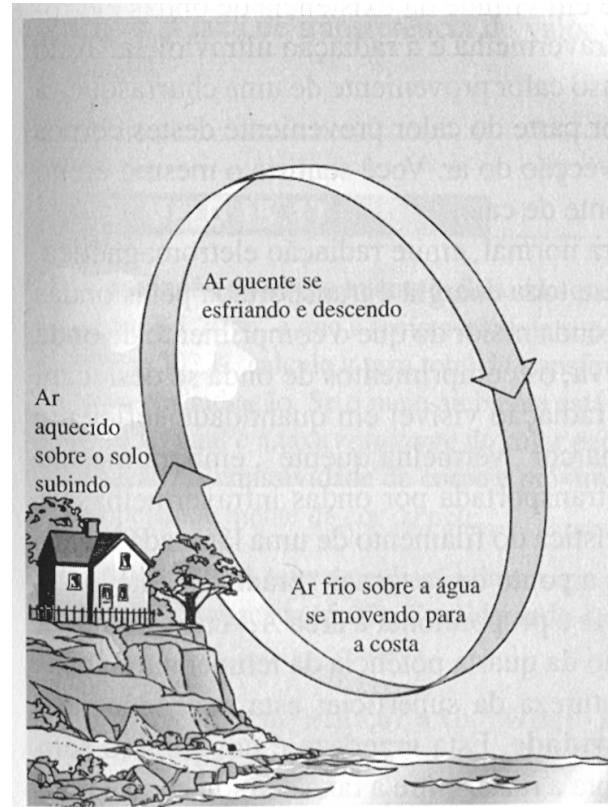
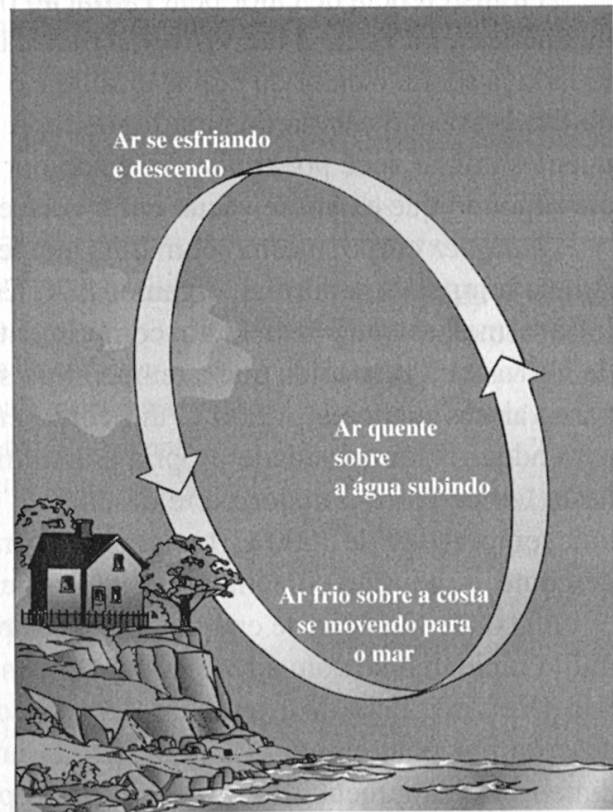


As brisas que ocorrem nas regiões litorâneas podem ser explicadas pelas correntes de convecção, associadas ao aquecimento da terra e do mar no decorrer do dia.

Durante o dia, a terra está mais quente que o mar, pois a água é uma substância que precisa de muito calor para se aquecer. Então o ar mais quente, em contato com a terra, sobe por convecção e produz uma região de baixa pressão que “aspira” o ar que está sobre o oceano. Sopra então a **brisa marítima**.

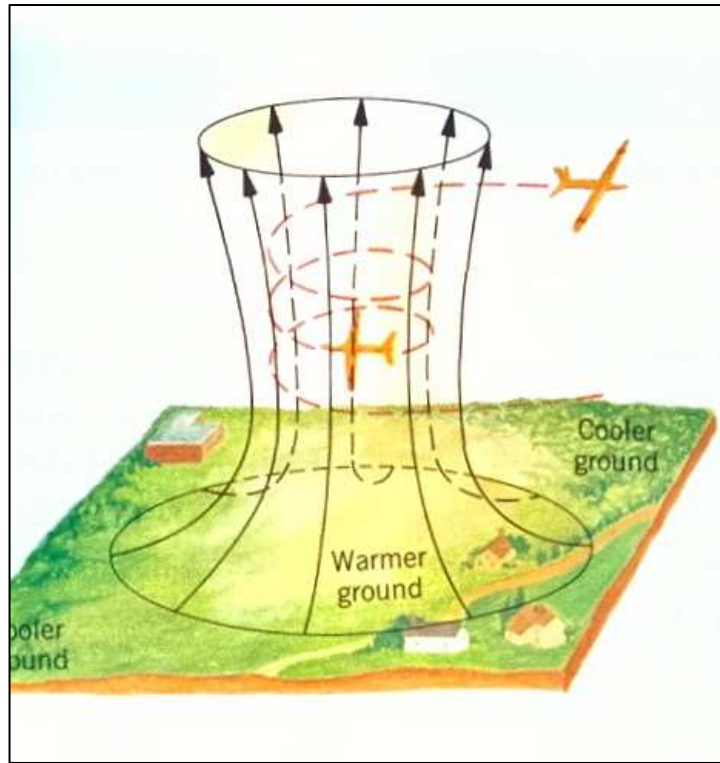


A noite o processo se inverte. O ar sobre o mar (mais quente) sobe por convecção, produzindo uma região de baixa pressão que “aspira” o ar que está sobre a terra. Sopra assim a brisa **terrestre**.



Young & Freedman
Sears & Zemansky
Física II
(Pearson, 2007)

A água possui um calor específico mais elevado do que o do solo. O calor do Sol produz um efeito relativamente menor sobre a água do mar do que sobre o solo; portanto, durante o dia o solo se aquece mais rapidamente do que o mar e se resfria mais rapidamente durante a noite. A diferença de temperatura entre o solo e o mar dá origem a uma brisa que sopra do mar para a costa durante o dia e da costa para o mar durante a noite.



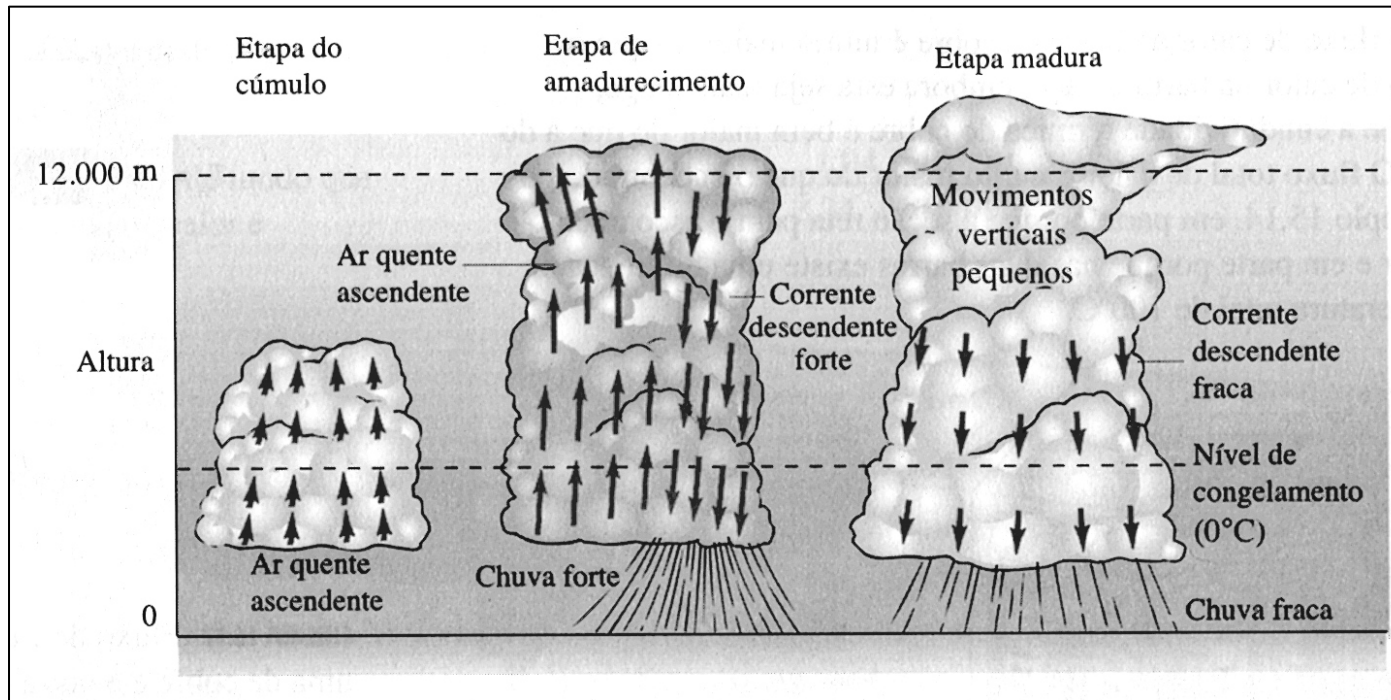
Correntes de ar ascendentes (*térmicas*) são produzidos pelas correntes de convecção do ar aquecido pelo solo

Na ausência de correntes de convecção no ar, a poluição se acumula na forma de camadas de *smog* sobre New York



Cutnell & Johnson, *Physics* (Wiley, 1995)

Convecção em uma tempestade



O ar quente e úmido é menos denso do que o ar frio seco e, portanto, se eleva até altitudes da ordem de 12 mil a 18 mil metros. Uma nuvem de tempestade típica com um diâmetro de 5 km pode conter 5×10^8 kg de água. Quando esta umidade elevada se condensa e forma gotas de chuva, ocorre a transferência de cerca de 10^{15} J de calor para a atmosfera superior. O ar é empurrado pela chuva e cai, criando fortes correntes descendentes e ventos superficiais.

Young & Freedman, *Sears & Zemansky Física II* (Pearson, 2007)