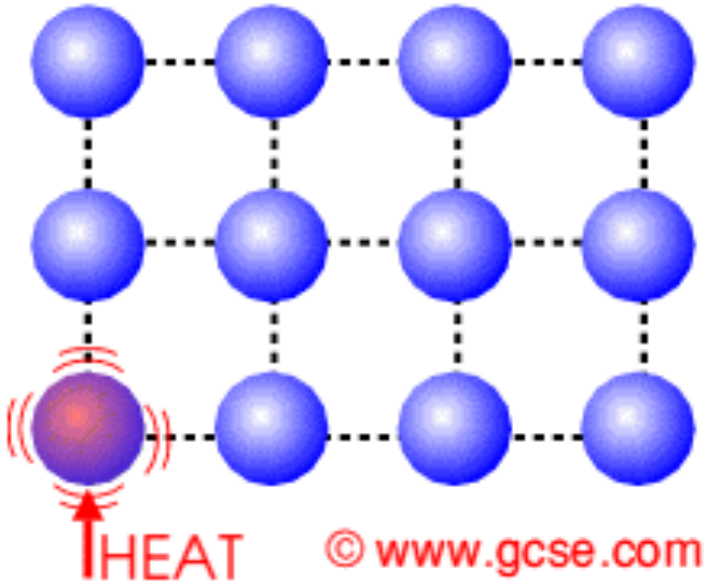
Transferência de Calor

Prof. Marco A. Simões

Mecanismos de transferência

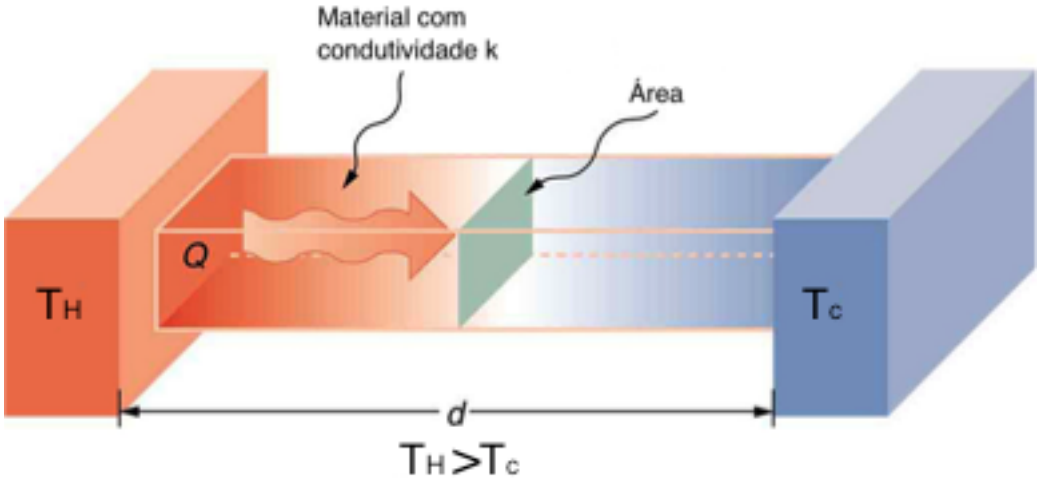
Condução de calor

- Não há transporte de massa
- Os átomos transmitem sua energia cinética por colisão aos seus vizinhos
- O sentido é sempre da temperatura maior para a menor
- Ocorre principalmente com materiais sólidos
- Alguns materiais são bons condutores, outros não
- O índice que mede essa característica é a condutividade térmica



Cálculo – Lei de Fourier

$$H = k \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L}$$



$$\text{Gradiente de temperatura} = \frac{\Delta T}{L}$$

Onde

H $\Rightarrow$ taxa de transferência, J/s ou W

k $\Rightarrow$ coeficiente de condutividade térmica, $\frac{J}{s \cdot m \cdot K}$ ou $\frac{W}{m \cdot K}$

ΔT $\Rightarrow$ diferença de temperatura, ˚C ou K

L $\Rightarrow$ comprimento, m

Coeficientes de condutividade térmica

Material	T ensaio °C	k em W/(m°C)	Material	T ensaio °C	k em W/(m°C)
Água	25	0,58	Gelo	0	2,21
Alvenaria, concreto leve	20	1,1	Gesso em placas	s/ dado	0,21/0,41
Amianto em placas	40	0,29	Lã de rocha	s/ dado	0,063
Areia seca	20	0,33	Lã de vidro	s/ dado	0,044
Areia úmida	20	1,13	Madeira	s/ dado	0,16
Argila 10% água	s/ dado	1,2/2,3			
Asfalto	s/ dado	0,73	Mármore	s/ dado	1,00/1,57
Borracha esponjosa	20	0,055	Nylon	s/ dado	0,23
			Parafina	25	0,25
Borracha macia	20	0,18	Pexiglas	20	0,18
Cerâmica (azulejo)	s/ dado	1,06	Polietileno	s/ dado	0,35
Cimento-amianto placas	s/ dado	1,26	Polietileno espuma	s/ dado	0,025/0,030
			PVC	25	0,19
Concreto armado	20	1,51	Reboco	20	0,79
			Serragem	25	0,06
Cortiça	s/ dado	0,054	Tijolo maciço	s/ dado	0,61
Couro	20	0,14/0,16	Vidro	17	0,72
Ebonite	0	0,16	Vidro	100	0,76

Condutividade térmica k (W/(mK))

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

Exemplo

Uma caixa de isopor usada para manter as bebidas frias possui área total (incluindo a tampa) igual a 0,80 m^2, e a espessura de sua parede mede 2,0 cm. A caixa está cheia de água, gelo e latas de Coca-Cola a 0 °C. Qual é a taxa de fluxo de calor para o interior da caixa, se a temperatura da parede externa for 30 °C? Qual é a quantidade de gelo que se liquefaz durante um dia?

Resolução

$$H = k \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L}$$

$$H = 0{,}01 \cdot 0{,}8 \cdot \frac{30 - 0}{0{,}02}$$

$$H = 12\ W$$

Calor produzido em um dia:

$$\Delta t = 24 \cdot 60 \cdot 20 = 86.400\ s$$

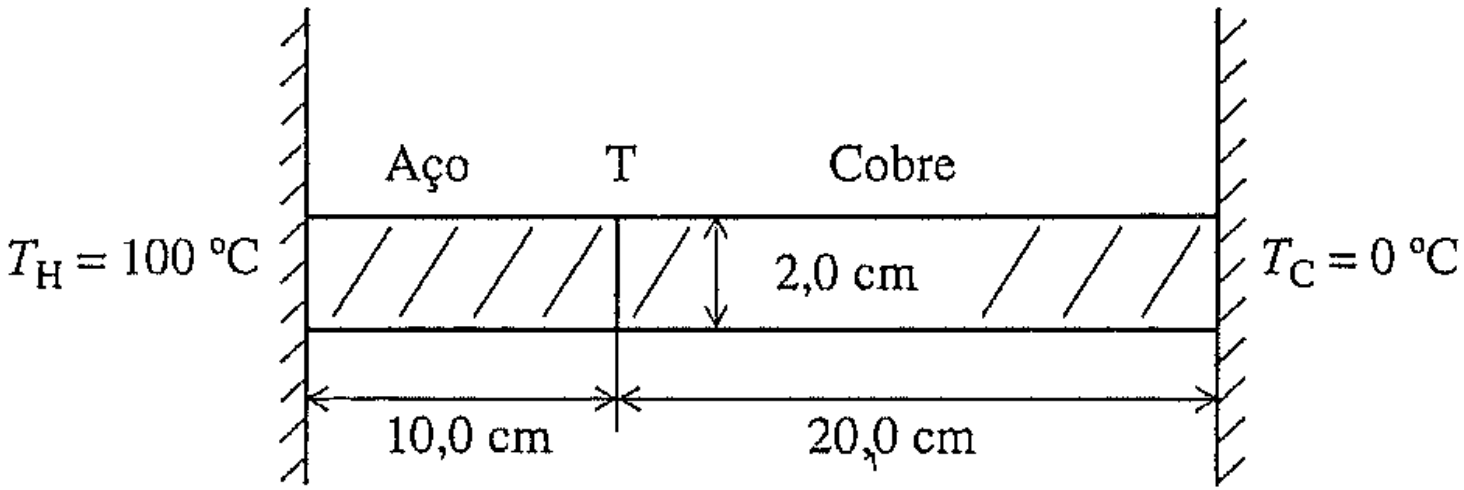
$$H = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow Q = H \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 12 \cdot 86.400 \Rightarrow Q = 1{,}04 \times 10^6\ J$$

Quantidade de gelo derretido:

$$Q = m \cdot L_f \Rightarrow m = \frac{Q}{L_f} \Rightarrow m = \frac{1{,}04 \times 10^6}{3{,}34 \times 10^5} \Rightarrow m = 3{,}1\ kg$$

Exemplo

Uma barra de aço de 10,0 cm de comprimento é soldada pela extremidade a uma barra de cobre de 20,0 cm de comprimento. As duas barras são perfeitamente isoladas em suas partes laterais. A seção transversal das duas barras é um quadrado de lado igual a 2,0 cm. A extremidade livre da barra de aço é mantida a 100 °C pelo contato com vapor d'água obtido por ebulição, e a extremidade livre da barra de cobre é mantida a O °C por estar em contato com gelo. Calcule a temperatura na junção entre as duas barras e a taxa total da transferência de calor.



Resolução

A taxa de transferência de calor nas duas barras é a mesma:

$$H_{aço} = H_{cobre}$$

$$k_{aço} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{aço}} = k_{cobre} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{cobre}}$$

$$50{,}2 \cdot \frac{100 - T}{0{,}10} = 385 \cdot \frac{T - 0}{0{,}20} \Rightarrow T = 20{,}7\ ^\circ C$$

Para encontrar H, substituímos acima:

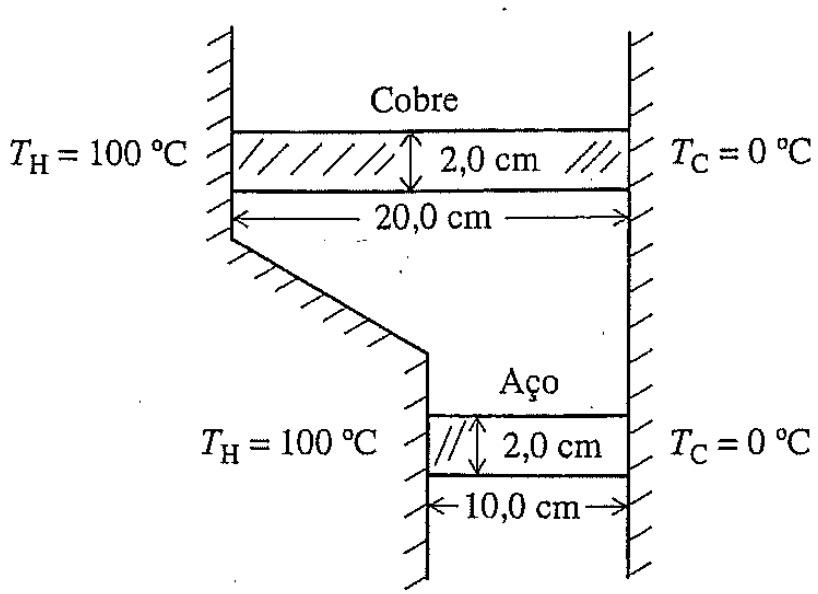
$$H_{aço} = k_{aço} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{aço}} = 50{,}2 \cdot 0{,}02^2 \cdot \frac{100 - 20{,}7}{0{,}10} \Rightarrow H_{aço} = 15{,}9\ W$$

Ou:

$$H_{cobre} = k_{cobre} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{cobre}} = 385 \cdot 0{,}02^2 \cdot \frac{20{,}7 - 0}{0{,}20} \Rightarrow H_{cobre} = 15{,}9\ W$$

Exemplo

No exemplo anterior, suponha que as duas barras estejam separadas. Uma extremidade de cada barra é mantida a 100 °C e a outra extremidade é mantida a O °C. Qual é a taxa total de transferência de calor nas duas barras?



Resolução

Nesse caso a transferência total de calor será a soma o calor transferido pelas duas barras. Nos dois casos $T_H = 100\,^{\circ}C$ *e* $T_C = 0\,^{\circ}C \Rightarrow T_H - T_C = 100 - 0 = 100\,K$

$$H = H_{aço} + H_{cobre}$$

$$H = k_{aço} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{aço}} + k_{cobre} \cdot A \cdot \frac{T_H - T_C}{L_{cobre}}$$

$$H = 50{,}2 \cdot 0{,}02^2 \cdot \frac{100}{0{,}10} + 385 \cdot 0{,}02^2 \cdot \frac{100}{0{,}20}$$

$$H = 20{,}1 + 77{,}0$$

$$H = 97{,}1\,W$$

Resistência térmica

- Um valor também usado na construção civil é o valor da **resistência térmica R**.

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

Onde:

R $\Rightarrow$ resistência térmica, $\frac{m^2 \cdot K}{W}$

L $\Rightarrow$ espessura do material, m

k $\Rightarrow$ coeficiente de condutividade térmica, $\frac{W}{m \cdot K}$

- Quando usamos a resistência R a fórmula do calor transmitido fica:

$$H = A \cdot \frac{T_H - T_C}{R}$$

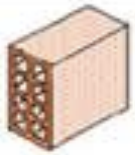
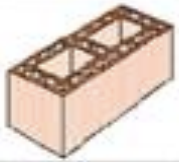
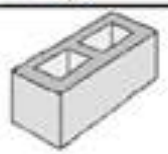
Podemos também nos referir ao fluxo superficial de calor:

$$\dot{q} = \frac{H}{A} \Rightarrow \dot{q} = \frac{T_H - T_C}{R} \quad \left[W/m^2 \right]$$

Cálculo da resistência térmica de materiais isolantes para várias espessuras (m^2.k/W)

Espessura do isolamento térmico (cm)	Poliestireno extrudido (XPS)	Poliestireno expandido (EPS 100)	Lã de rocha	Aglomerado de cortiça	Argamassa de reboco para isolamento térmico (tipo ISODUR)	
					Humidade 30%	Humidade 100%
3	0,86	0,83	0,79	0,75	0,38	0,15
4	1,14	1,11	1,05	1,00	0,51	0,20
5	1,43	1,39	1,32	1,25	0,63	0,24
6	1,71	1,67	1,58	1,50	0,76	0,29
7	2,00	1,94	1,84	1,75	0,89	0,34
8	2,29	2,22	2,11	2,00	1,01	0,39
9	2,57	2,50	2,37	2,25	1,14	0,44
10	2,86	2,78	2,63	2,50	1,27	0,49
11	3,14	3,06	2,89	2,75	1,39	0,54
12	3,43	3,33	3,16	3,00	1,52	0,59
13	3,71	3,61	3,42	3,25	1,65	0,63
14	4,00	3,89	3,68	3,50	1,77	0,68
15	4,29	4,17	3,95	3,75	1,90	0,73

Resistência térmica

Tipo de bloco	Largura do bloco (cm)	Características da parede		
		Largura (cm)	Massa (Kg/m^2)	Resist. Térmica ($m^2.°C/W$)
	9	9	90	*
		12	130	0,22
	14	17	180	0,30
	9	9	130	*
		12	170	0,11
	14	17	215	*
	14	14	120	0,31
		17	160	*
	14	14	175	0,16
		17	215	*

*Ensaios não realizados;

Exemplo

Uma parede de 5 metros de largura por 2,8 metros de altura é feita apenas de tijolo baiano de 14 cm. A temperatura externa é de 30˚C e a interna é de 22˚C. Calcule a taxa de transmissão de calor e o custo por dia para atender essa diferença, supondo uma tarifa de R$ 120,00/kWh.

$$H = A \cdot \frac{T_H - T_C}{R}$$

$$H = 5{,}0 \times 2{,}8 \cdot \frac{30-22}{0{,}30} \Rightarrow H = 373\,W$$

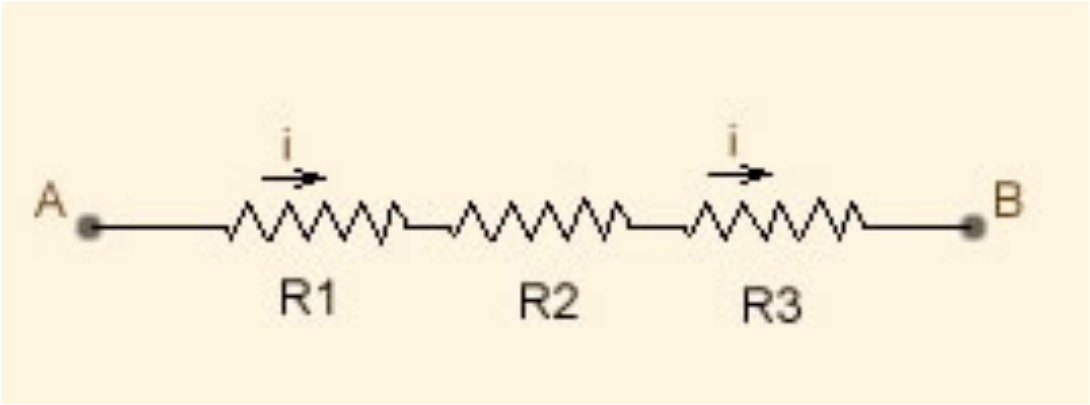
$$\text{Consumo} \Rightarrow C = 373 \times 24 \Rightarrow C = 8{,}95 \times 10^3\,Wk \Rightarrow C = 8{,}95\,kWh$$

$$\text{Custo} \Rightarrow Custo = 8{,}95 \times 120 \Rightarrow Custo = R\$\,1074{,}00$$

Resistência térmica (série)

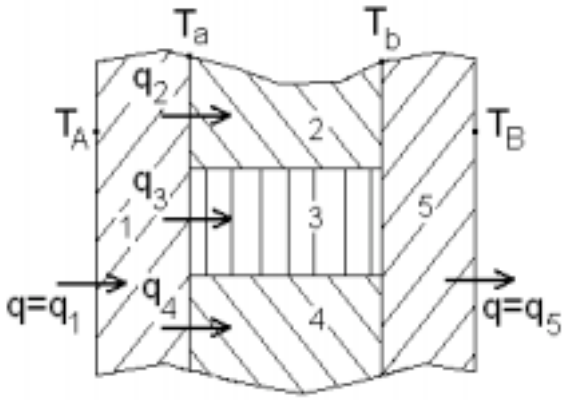
- Um aspecto prático da resistência térmica, é que, quando os materiais isolantes estão justapostos, ela pode ser somada, quando vários materiais de coeficiente de condutividade diferente estão justapostos.

$$R_{\text{Total}} = 2 \cdot R_{\text{Tijolo}} + R_{\text{Isopor}} + R_{\text{Reboco}}$$



Resistência térmica (paralelo)

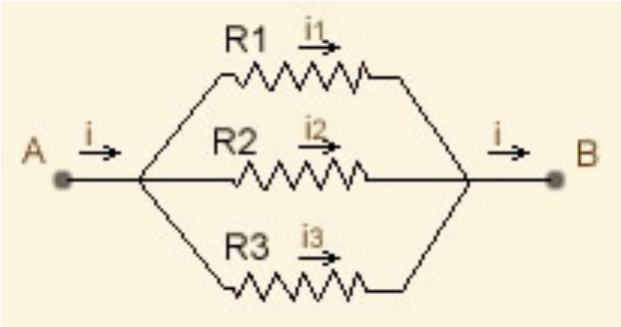
- Caso os materiais estiverem montados em série e em paralelo, a resistência térmica será dada por:



$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3,4} + R_5$$

Com

$$\frac{1}{R_{2,3,4}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$



$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Exemplo

Uma sala de 3 metros de comprimento por 4 de largura e 2,5 de altura é feita de tijolo baiano de 9x12 cm, revestido externamente por uma camada de lã de rocha de 5 cm, e internamente por argamassa Isodur de 3 cm, com 30% de umidade. Qual o fluxo de calor que ocorre apenas pelas paredes, considerando uma temperatura externa de 35˚C e uma interna de 22˚C?

Resolução

Área das paredes:

$$A = (2\times3 + 2\times4)\times2{,}5 \Rightarrow A = 35\,m^2$$

Resistência térmica total da parede:

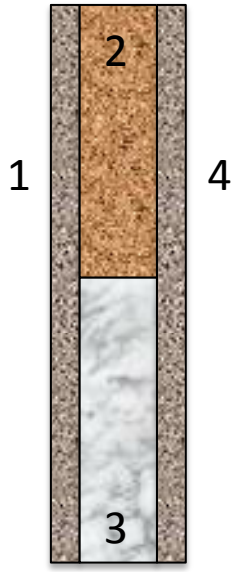
$$R = R_{tijolo} + R_{lã} + R_{argamassa} \Rightarrow R = 0{,}22 + 1{,}32 + 0{,}38 \Rightarrow R = 1{,}92\ \frac{m^2 \cdot °C}{W}$$

Fluxo de calor:

$$H = A \cdot \frac{T_H - T_C}{R} \Rightarrow H = 35 \cdot \frac{35 - 22}{1{,}92} \Rightarrow H = 237\,W$$

Exemplo

- Calcular o fluxo de calor por m² de um conjunto composto por duas camadas externas de reboco isolante seco de 3 cm de espessura, internamente por tijolo baiano de 14 cm e lã de rocha de 14 cm. Suponha uma temperatura externa de 30˚C e interna de 22˚C.



$$R_{eq} = R_1 + R_{2,3} + R_4$$

$$\frac{1}{R_{2,3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_{2,3}} = \frac{1}{0,16} + \frac{1}{3,68} \Rightarrow R_{2,3} = 5,83$$

$$R_{eq} = 0,38 + 5,83 + 0,38 \Rightarrow R_{eq} = 6,59$$

$$\dot{q} = \frac{T_H - T_C}{R_{eq}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{30-22}{6,59} \Rightarrow \dot{q} = 1,21 \, W/m^2$$

Convecção

- A convecção ocorre nos fluidos (estado líquido ou gasoso)
- A região aquecida fica menos densa que a região ao redor, e é impulsionada para cima.
- As regiões mais frias descem, mantendo o ciclo.
- Com esse ciclo, o calor é transportado

Convecção

- A análise matemática é complexa, mas é possível verificar que:
  - Quanto maior a área, maior a troca de calor por convecção. Por isso o uso de aletas nos radiadores
  - Quanto mais viscoso o líquido, menor a transmissão por convecção

- A convecção pode ser natural ou forçada

Convecção - Aplicações

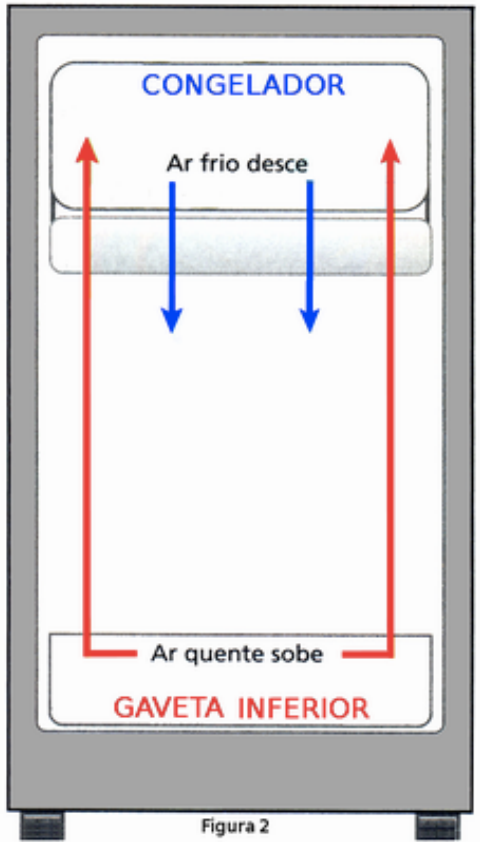
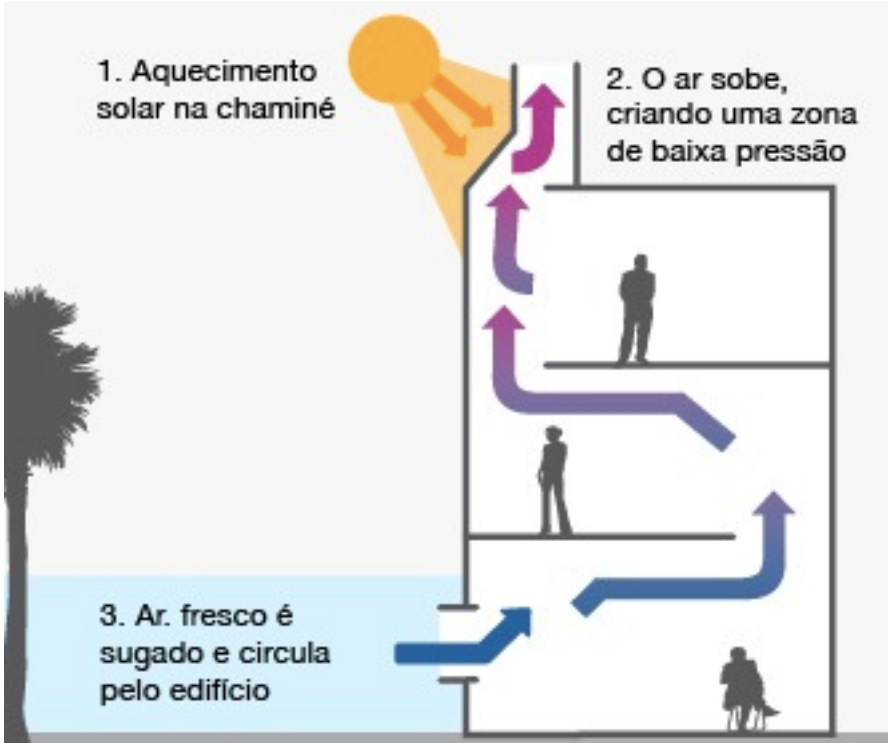
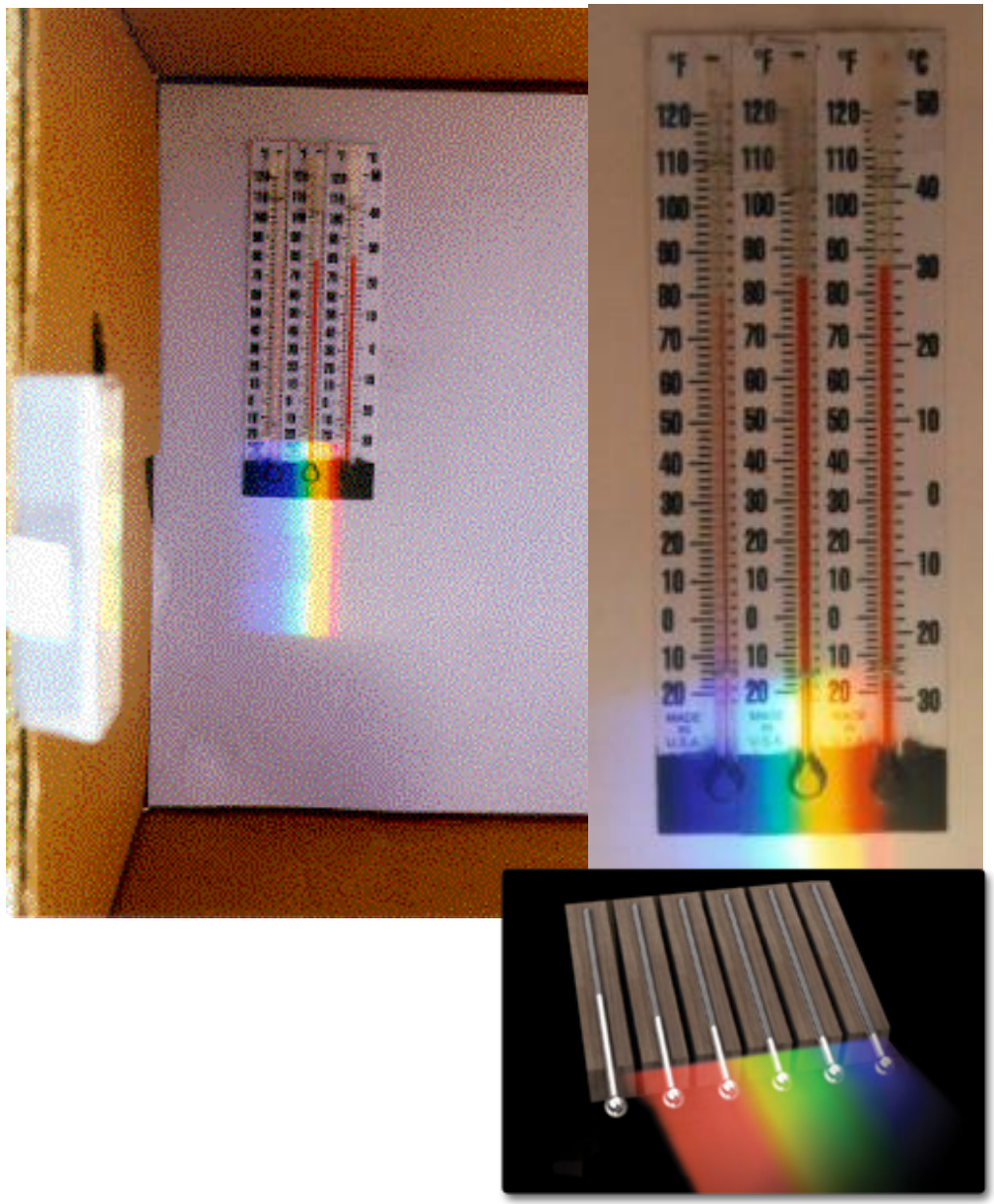


Figura 2

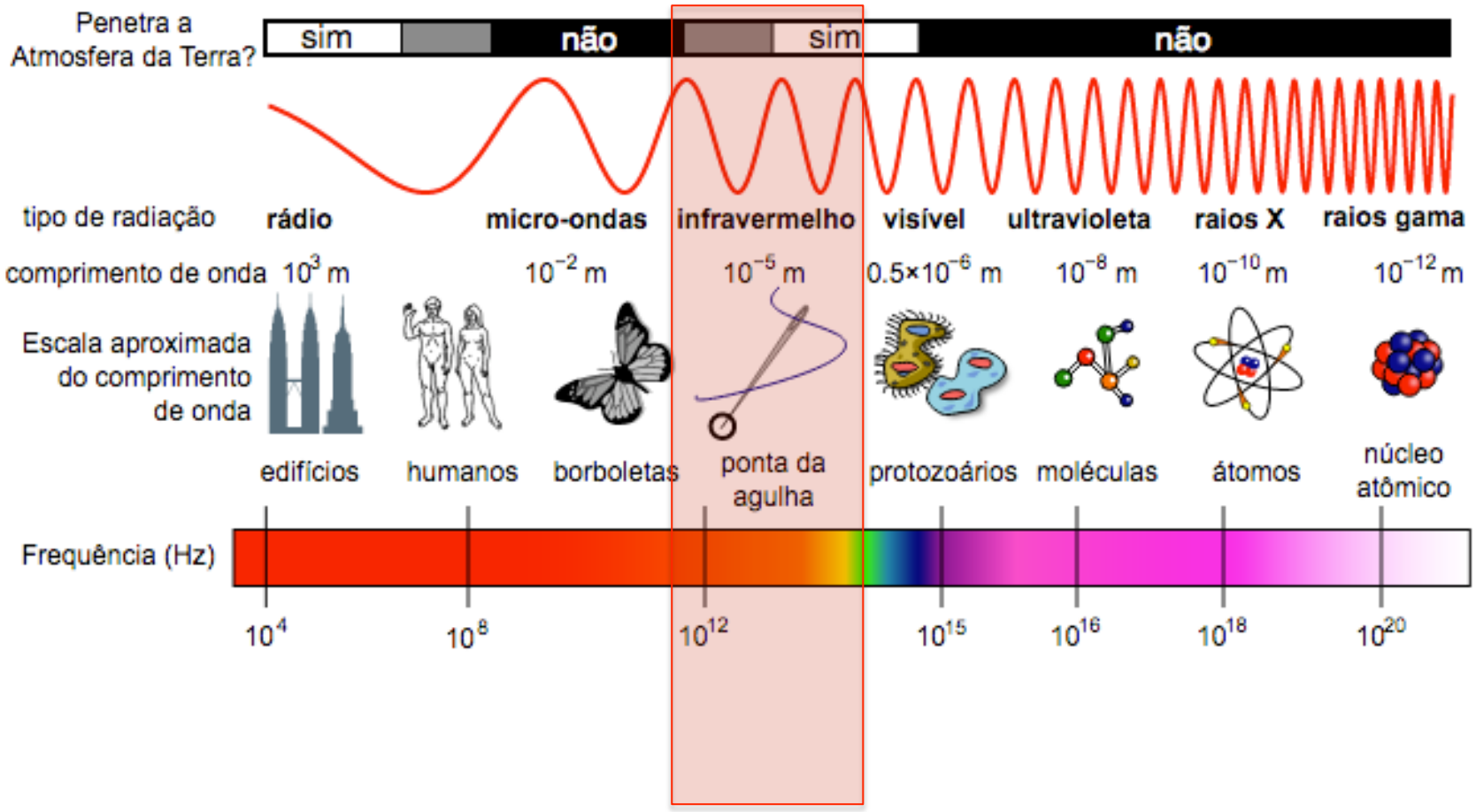


Radiação

- Em 1800, William Herschell demonstrou que as temperaturas nas cores laranja e vermelha eram maiores que na azul e violeta.
- Era ainda maior na área escura antes do vermelho.
- Chamamos essa região de infra-vermelho.

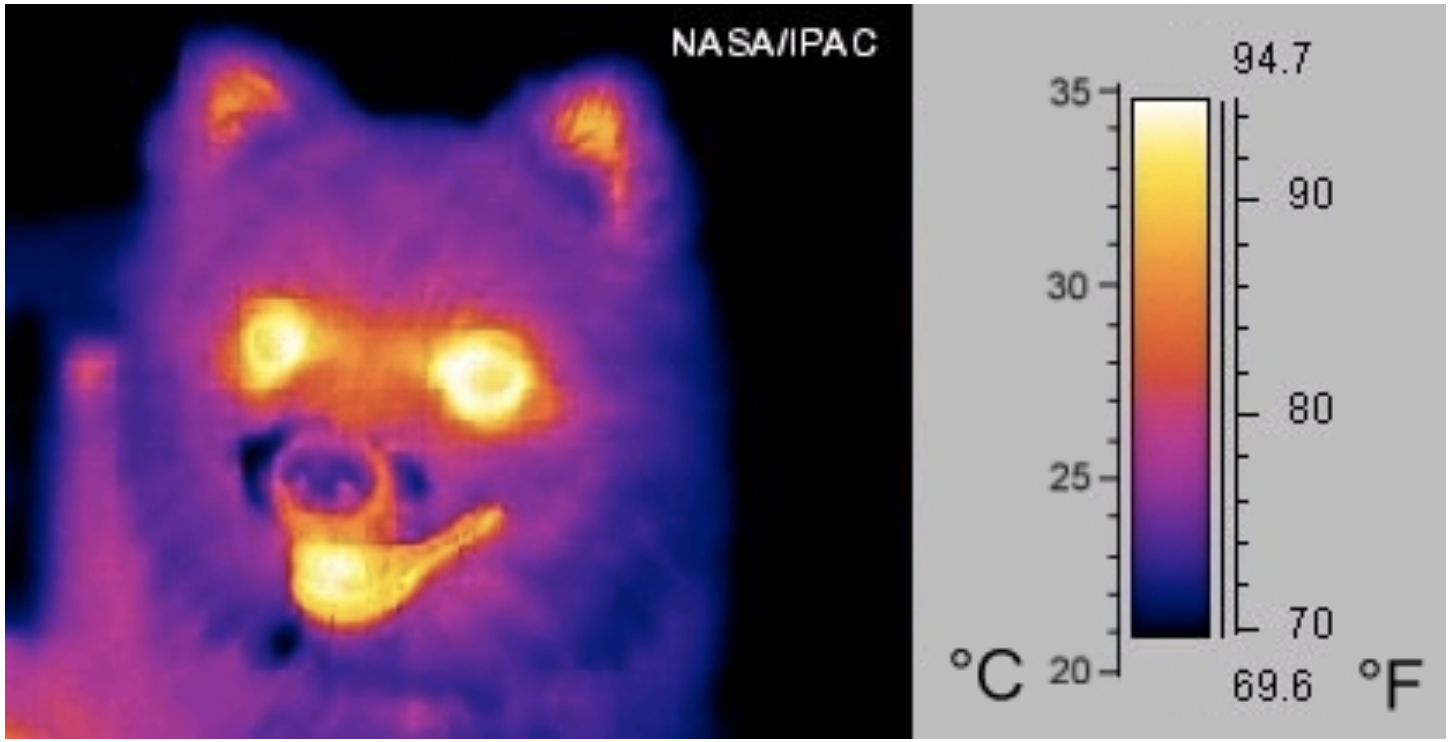


Espectro eletromagnético

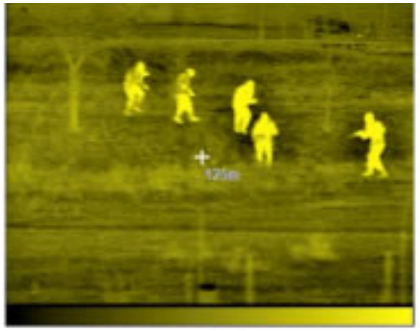


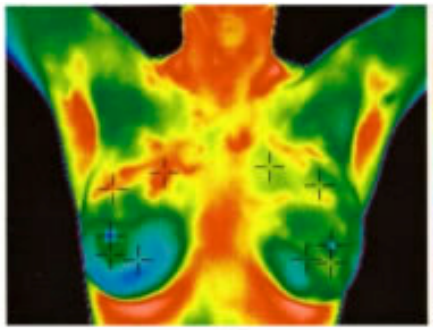
Aplicações

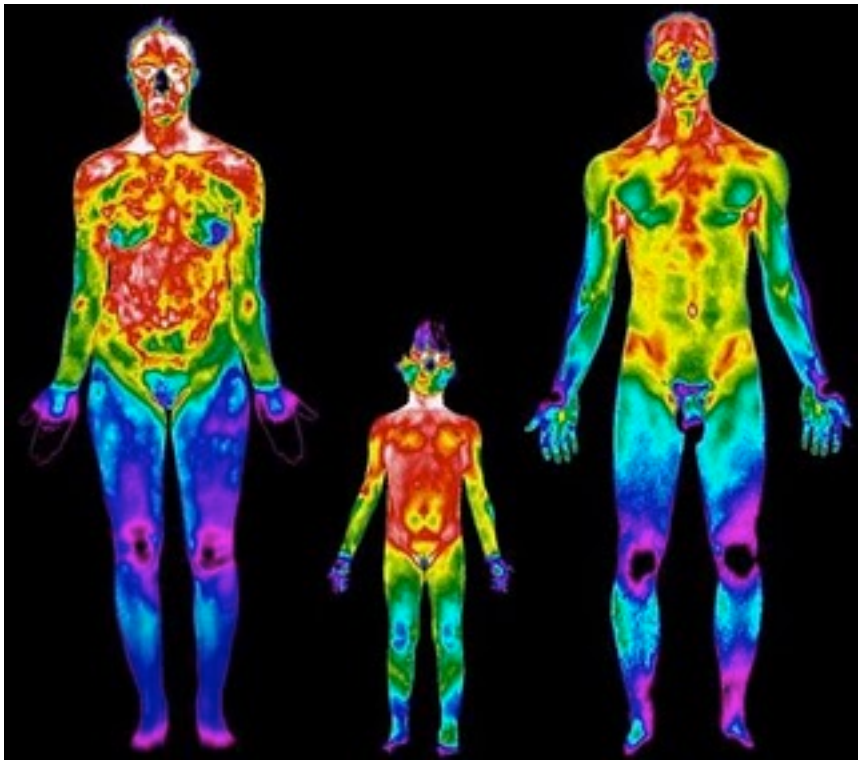
- Os corpos emitem calor na forma de radiação infra-vermelha
- Isso permite várias aplicações médias e industriais

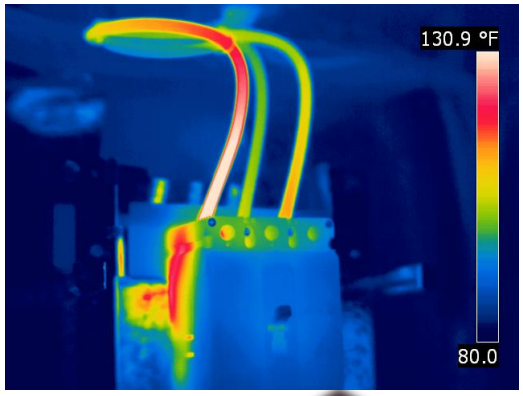


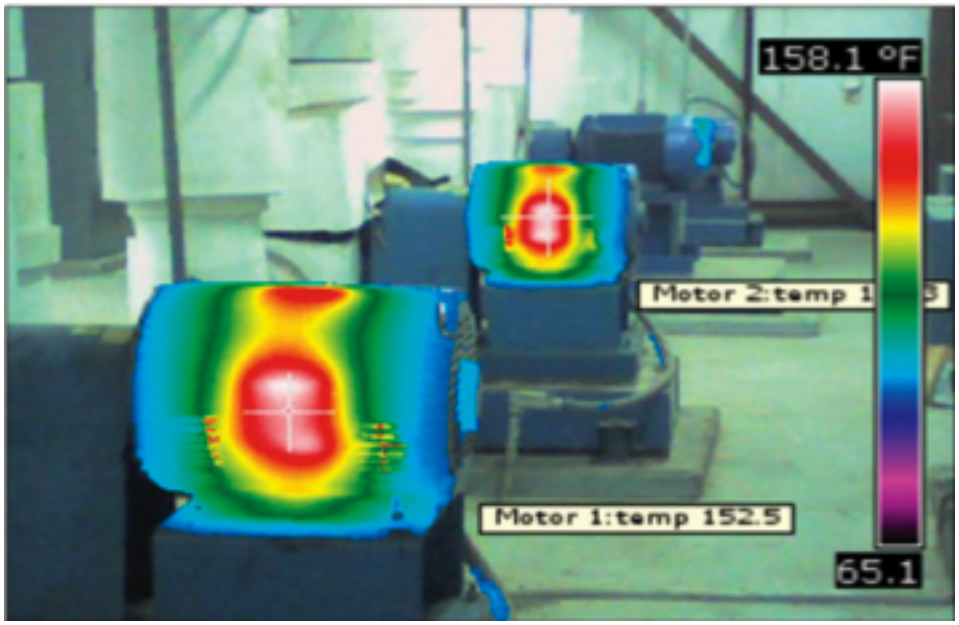
Aplicações



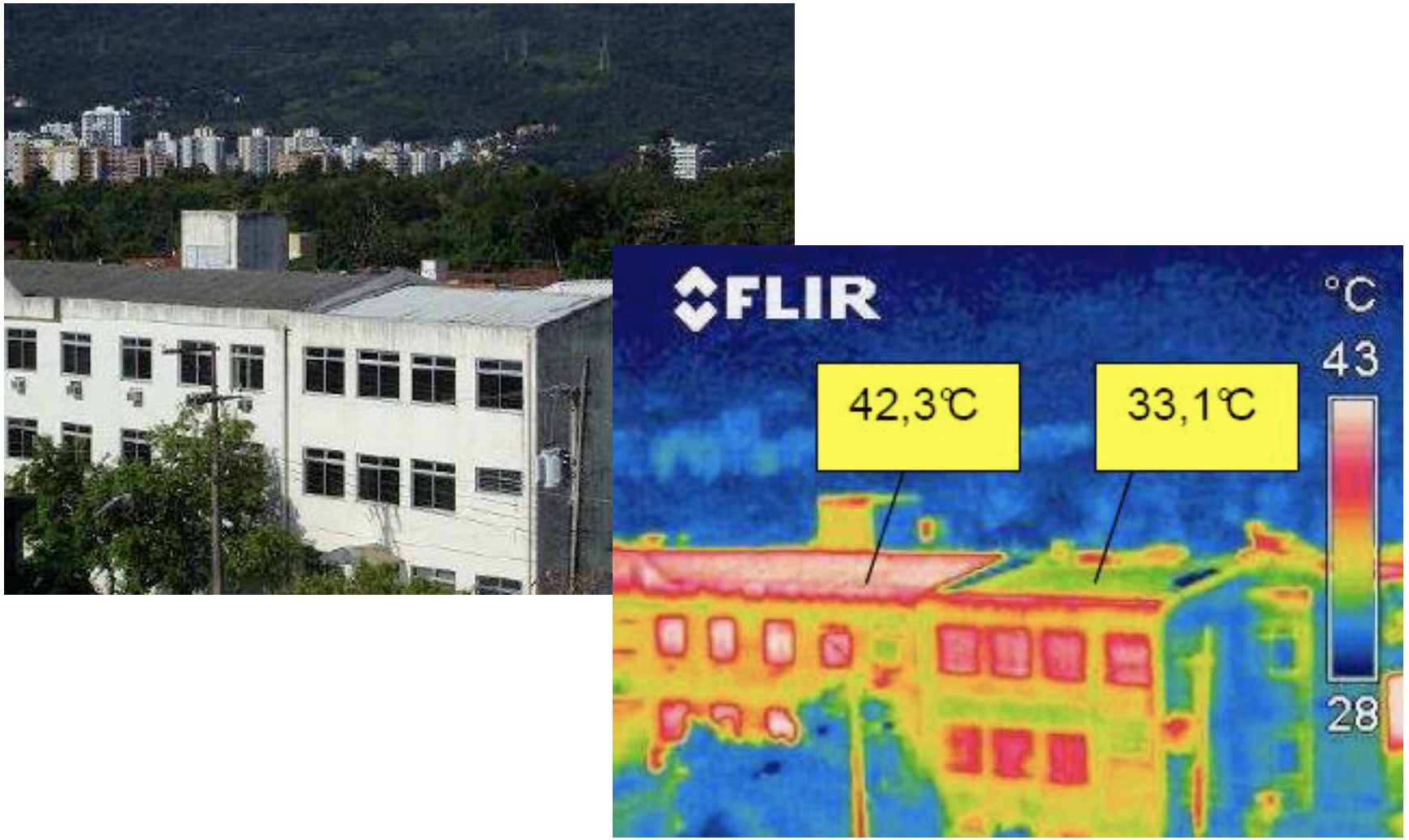




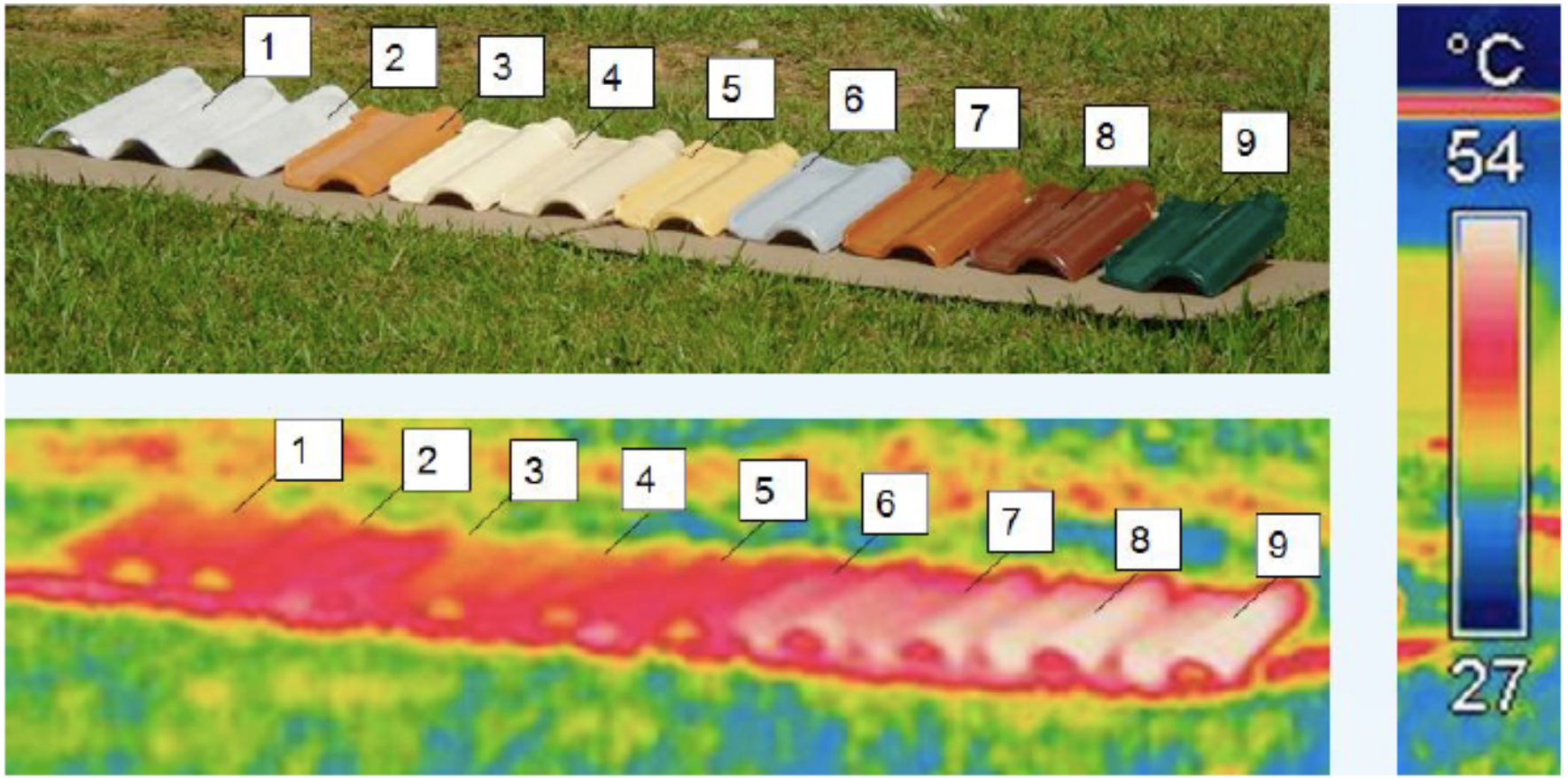




Aplicações



Aplicações



Coeficiente de emissividade

- Corpo negro: idealmente, pode absorver 100% da energia que incide sobre ele, ou emitir 100% da energia que ele contiver
- Exemplo: uma superfície fosca de cor preta
- Comparamos a taxa de emissão das superfícies com a taxa de emissão de um corpo negro
- Essa relação é chamada de coeficiente de emissividade, e varia de 0 a 1
- Quanto mais próximo de 1, mais próximo ele está de um corpo negro (absorsor/emissor)
- Quanto mais próximo de 0, mais refletor de calor é o corpo

Coeficientes de emissividade

Tipo de superfície		ε
Chapa de alumínio (nova e brilhante)		0,05
Chapa de alumínio (oxidada)		0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25
Caiação nova		0,90
Concreto aparente		0,85 / 0,95
Telha de barro		0,85 / 0,95
Tijolo aparente		0,85 / 0,95
Reboco claro		0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico		0,90 / 0,98
Vidro comum de janela		0,90 / 0,95
Pintura:	- branca	0,90
	- amarela	0,90
	- verde claro	0,90
	- "alumínio"	0,50
	verde escuro	0,90
	- vermelha	0,90
	- preta	0,90

Cálculo do calor transmitido por radiação

$$H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4$$

Onde

H $\Rightarrow$ taxa de trasmissão de calor, J/s ou W

A $\Rightarrow$ área que está transmitindo o calor, m^2

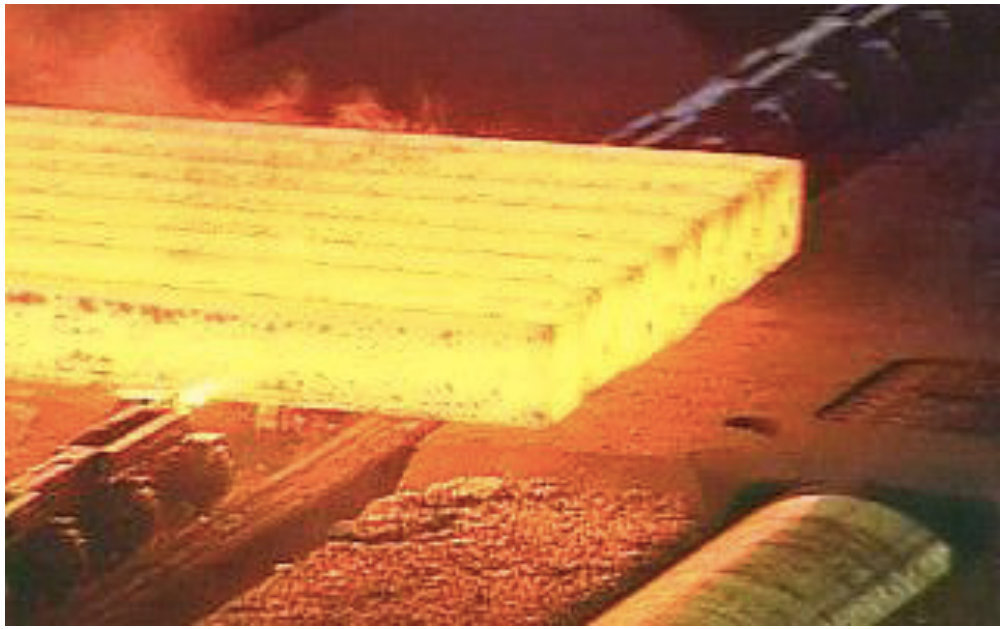
e $\Rightarrow$ coeficiente de emissividade da superfície (de 0,0 a 1,0)

$\sigma \Rightarrow$ constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann=$5{,}67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

T $\Rightarrow$ temperatura, Kelvin

Exemplo

Uma placa quadrada de aço, com lado igual a 10 cm e espessura 1 cm é aquecida em uma forja até uma temperatura de 800 ˚C. Sabendo que a emissividade é igual a 0,60, qual é a taxa total de energia transmitida por radiação?



Resolução

A temperatura deve ser em Kelvin:

$$T_{Kelvin} = T_{Celsius} + 273 \Rightarrow T_{Kelvin} = 800 + 273 \Rightarrow T_{Kelvin} = 1073\ K$$

Área da placa:

$$A = 2{\times}0{,}1{\times}0{,}1 + 4{\times}0{,}1{\times}0{,}01 \Rightarrow A = 2{,}4{\times}10^{-2}\ m^2$$

Transferência de calor:

$$H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$H = 2{,}4{\times}10^{-2} \cdot 0{,}6 \cdot 5{,}67{\times}10^{-8} \cdot 1073^4$$

$$H = 1{,}08{\times}10^{3}\ W$$

Radiação e absorção

- Os corpos emitem e aborvem energia térmica ao mesmo tempo.
- Se as temperatura forem iguais, calor recebido é igual ao calor irradiado.
- Se a temperatura do ambiente, T_s for diferente da do corpo, a taxa de radiação resultante será:

$$H_{Total} = A \cdot e \cdot \sigma \cdot \left(T^4 - T_s^{\,4} \right)$$

Exemplo

Sabendo que a área total do corpo humano é aproximadamente 1,20 m^2, e que a temperatura da superfície é de 30 ˚C, calcule (a) a taxa total de transferência do corpo por radiação e (b) a taxa resultante do calor perdido pelo corpo por radiação, supondo uma temperatura ambiental de 20 ˚C. A emissividade do corpo humano é de cerca de 0,98, independente da pigmentação da pele.

Resolução

Calor irradiado pelo corpo:

$$H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$H = 1{,}2 \cdot 0{,}98 \cdot 5{,}67 \times 10^{-8} \cdot 303^4 \Rightarrow H = 562\,W$$

Radiação resultante:

$$H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_s^4)$$

$$H = 1{,}2 \cdot 0{,}98 \cdot 5{,}67 \times 10^{-8} \cdot (303^4 - 293^4) \Rightarrow H = 70{,}6\,W$$