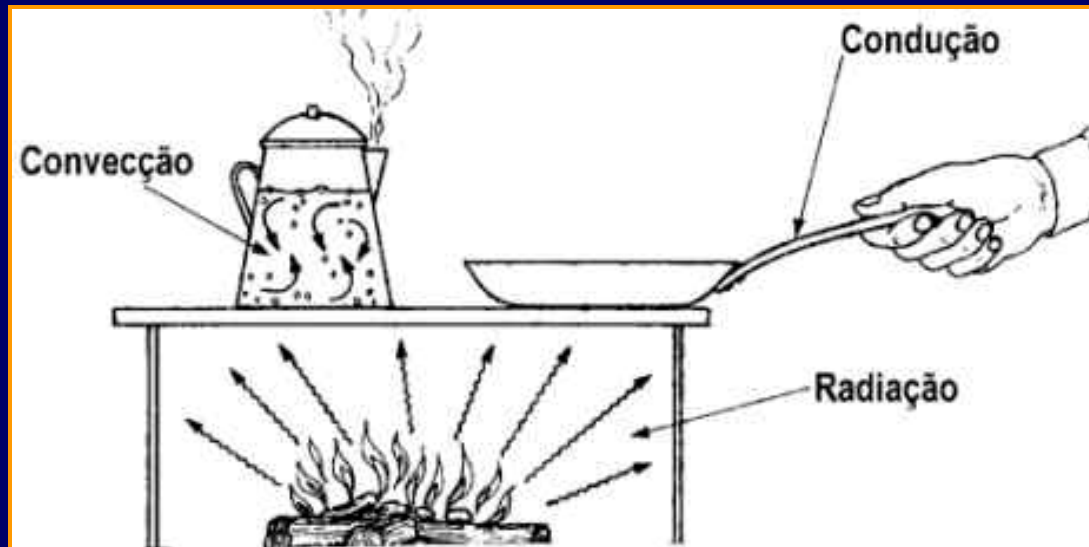


# Aula-9

## Temperatura, Calor e 1ª Lei da Termodinâmica



Física Geral II - F 228

1º Semestre, 2021

# Termodinâmica

- Estuda as relações entre Calor e outras formas de energia em sistemas macroscópicos;
- Grandezas básicas:  
Temperatura ( $T$ ) , Pressão ( $p$ ), Volume ( $V$ ),  
Energia interna ( $E_{\text{int}}$ ), Calor ( $Q$ ), Entropia ( $S$ ).
- Máquinas Térmicas :  
A Vapor; Refrigeradores; Ar-Condicionados, ...

# Equilíbrio Térmico

- Dois sistemas macroscópicos em contato térmico:

Muitas configurações microscópicas  $\leftrightarrow$  Distribuição de Energia Térmica permitida,

MAS...

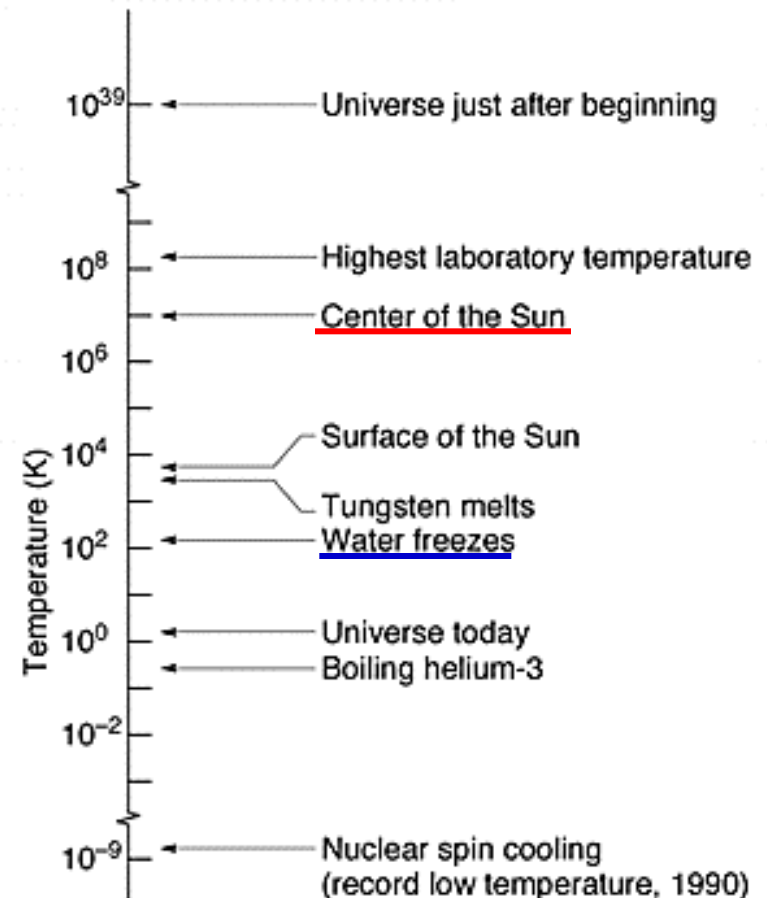
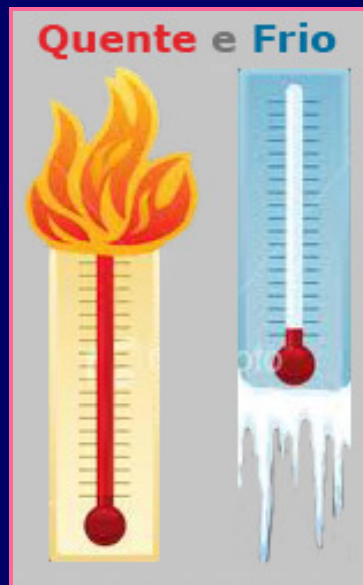
...*EXISTE UMA CONFIGURAÇÃO MUITO MAIS PROVÁVEL*

- A CONFIGURAÇÃO DE EQUILÍBRIO TÉRMICO descreve MUITO BEM as propriedades do sistema
- Parâmetro que se iguala na configuração de equilíbrio térmico:

**TEMPERATURA**

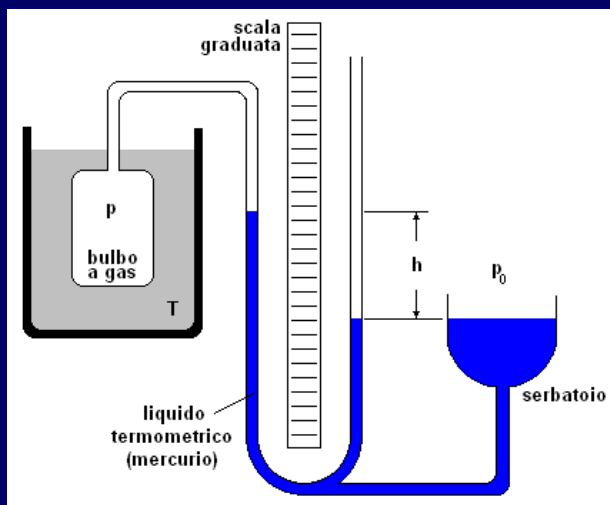
# Temperatura

- É grandeza escalar;
- Conceito macroscópico;
- Característica de sistemas termodinâmicos em equilíbrio térmico;



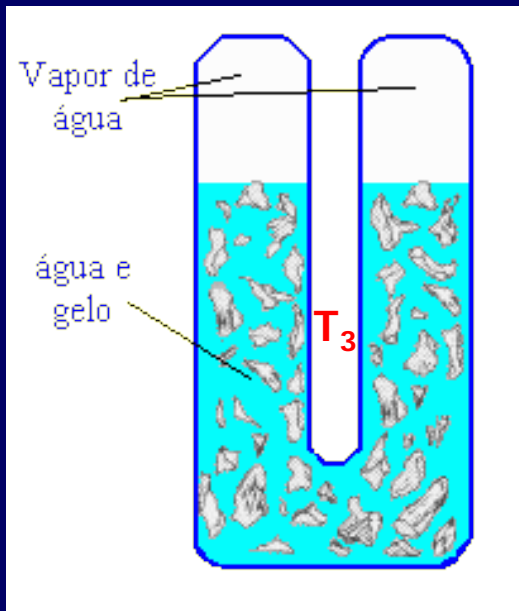
# Medida da Temperatura

- São utilizadas propriedades físicas que dependem de  $T$ :
  - Pressão de gases
  - Volume de gases e líquidos
  - Dimensões de sólidos
  - Resistência elétrica ...
- Principais Escalas: Kelvin [K], Celsius [ $^{\circ}\text{C}$ ], Fahrenheit [ $^{\circ}\text{F}$ ]



# Escalas de Temperatura

## ■ Referência: PONTO TRIPLO DA ÁGUA



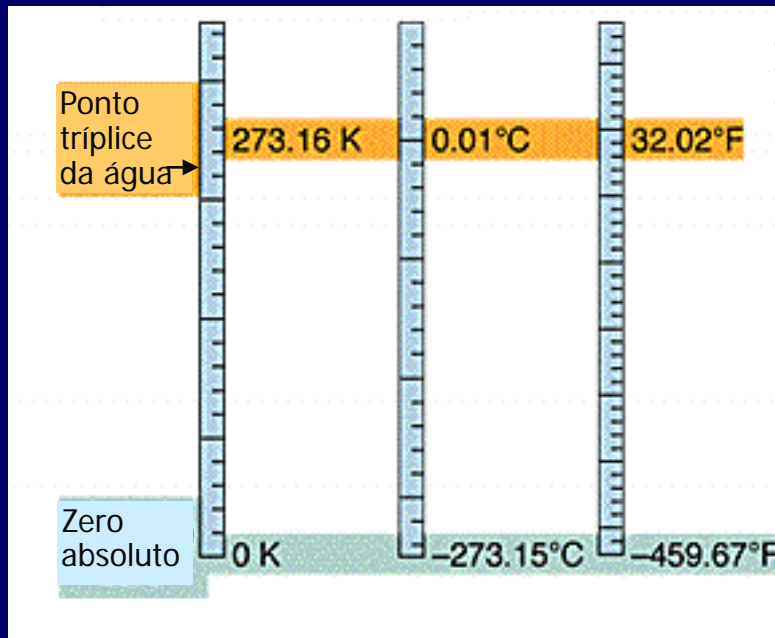
- Define um único conjunto de  $p$ ,  $V$  e  $T$
- $T_3$  atribuída por acordo internacional:

$$T_3 = 273,16 \text{ K}$$

*Célula de ponto triplo*

# Escalas de Temperatura

## ■ Kelvin, Celsius, Fahrenheit



Celsius:

$$T_3 = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} ; \Delta T = 1 \text{ K} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fahrenheit :

$$T_3 = 32,02 \text{ } ^\circ\text{F} ; \Delta T = 5 \text{ K} = 9 \text{ } ^\circ\text{F}$$

**TABLE 19-1** SOME CORRESPONDING TEMPERATURES

TEMPERATURE	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
Boiling point of water <sup>a</sup>	100	212
Normal body temperature	37.0	98.6
Accepted comfort level <sup>a</sup>	20	68
Freezing point of water <sup>a</sup>	0	32
Zero of Fahrenheit scale	$\approx -18$	0
Scales coincide	-40	-40

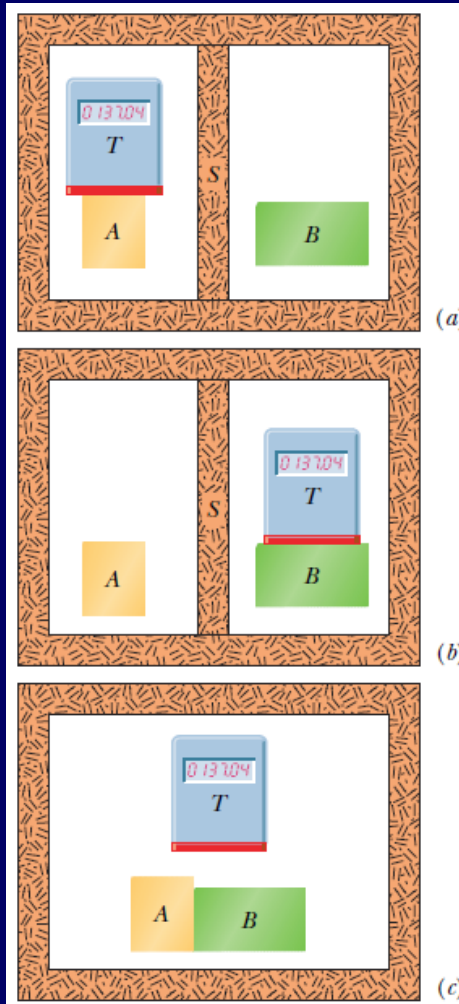
$$\frac{T_K - 273,15}{5} = \frac{T_C}{5} = \frac{T_F - 32}{9}$$

$$T_C = T_K - 273,15^{\circ}$$

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^{\circ}$$

# Lei Zero da Termodinâmica

- *Se dois sistemas estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles devem estar em equilíbrio térmico entre si.*



- Sistemas :  $A$  ,  $B$  e  $T$  (termômetro)
- Parâmetro do Sistema  $T$  : Temperatura

$$\text{Se: } T_T = T_A \quad \text{e} \quad T_T = T_B$$

$$\rightarrow T_A = T_B$$

- Se:  $T_i > T_j$   
 $\rightarrow$  Fluxo de energia de  $i$  para  $j$



# Dilatação (ou Expansão) Térmica

- Aumento de  $T \rightarrow$  aumento da separação média entre átomos do sólido

Expansão linear:  $\Delta L = L\alpha\Delta T \rightarrow \frac{\Delta L}{L} = \alpha\Delta T$

Coeficiente de expansão linear:

$$\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T} \approx CTE$$

**TABLE 19-2** SOME COEFFICIENTS OF LINEAR EXPANSION

SUBSTANCE	$\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	SUBSTANCE	$\alpha$ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
Ice (at $0^{\circ}\text{C}$ )	51	Steel	11
Lead	29	Glass (ordinary)	9
Aluminum	23	Glass (Pyrex)	3.2
Brass	19	Diamond	1.2
Copper	17	Invar <sup>b</sup>	0.7
Concrete	12	Fused quartz	0.5

<sup>a</sup> Room temperature values except for the listing for ice.

<sup>b</sup> This alloy was designed to have a low coefficient of expansion. The word is a shortened form of "invariable."

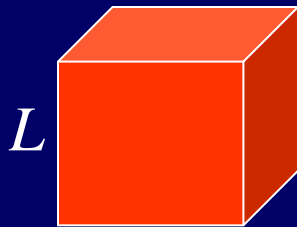
# Dilatação térmica

## Expansão volumétrica

Coeficiente de expansão volumétrica isotrópica :

$$\beta = \frac{\Delta V / V}{\Delta T} = 3\alpha$$

Exemplo: CUBO



$$V = L^3$$

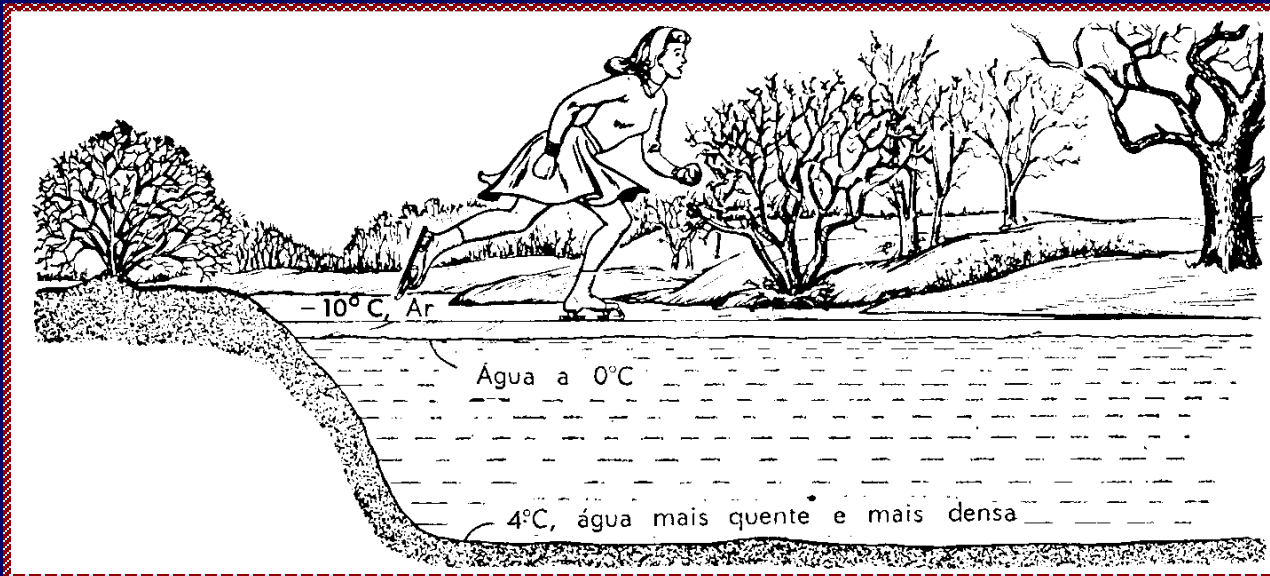
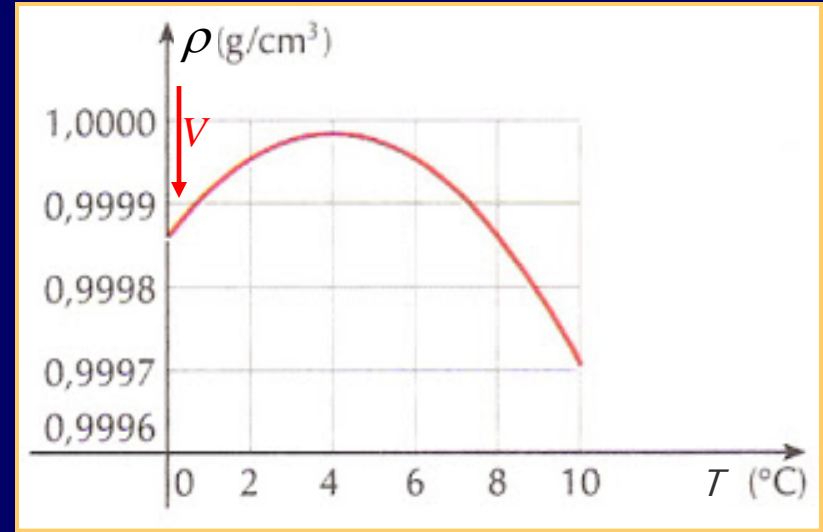
$$\beta \Delta T = \frac{\Delta V}{V} = \frac{3L^2 \Delta L}{L^3} = 3 \frac{\Delta L}{L} = 3\alpha \Delta T$$

# Dilatação térmica anômala

## ■ Coeficiente de dilatação anômalo da água

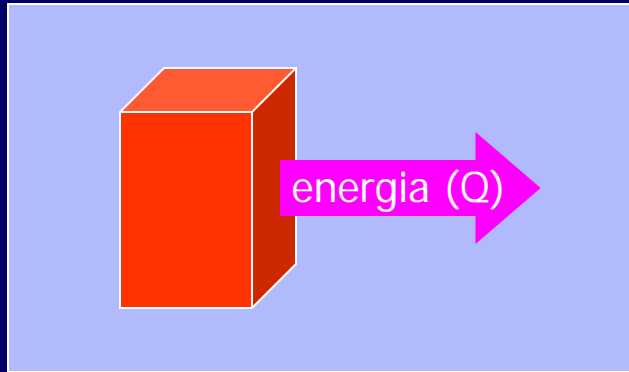
- Densidade:  $\rho = \frac{m}{V}$

- Volume específico:  $\rho^{-1} = \frac{V}{m}$



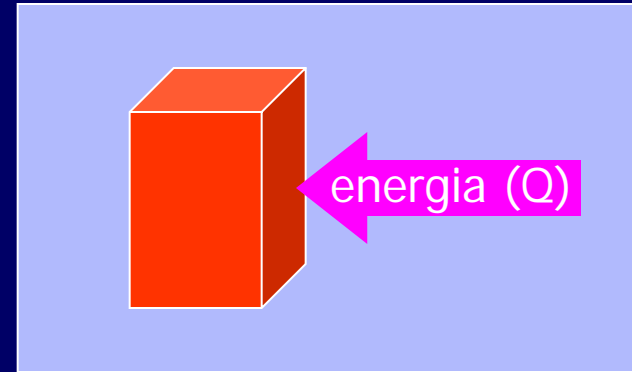
# Calor e Temperatura

$$T_c > T_{\text{ambiente}}$$

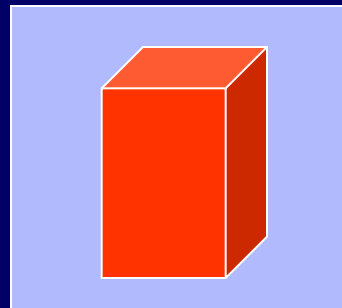


Corpo perde energia interna:  
Calor transferido para o ambiente

$$T_c < T_{\text{ambiente}}$$



Corpo ganha energia interna:  
Calor cedido pelo ambiente



$$T_c = T_{\text{ambiente}}$$

Não há transferência  
de energia

# Absorção de Calor

- A capacidade de absorção depende do sistema;
- Em geral, resulta em aumento de  $T$ .

Capacidade  
Calorífica :

$$C = \frac{Q}{\Delta T} ; \quad \Delta T = T_f - T_i$$

Calor  
Específico:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} ;$$

$$c_{mol} = \frac{Q}{mol \Delta T}$$

- Só dependem do material e das condições  
(Ex.: pressão ou volume constantes)

# Calor específico

**TABLE 19-3** SPECIFIC HEATS OF SOME SUBSTANCES AT ROOM TEMPERATURE

SUBSTANCE	SPECIFIC HEAT		MOLAR SPECIFIC HEAT
	cal/g·K	J/kg·K	J/mol·K
<u>Elemental Solids</u>			
Lead	0.0305	128	26.5
Tungsten	0.0321	134	24.8
Silver	0.0564	236	25.5
Copper	0.0923	386	24.5
Aluminum	0.215	900	24.4
<u>Other Solids</u>			
Brass	0.092	380	
Granite	0.19	790	
Glass	0.20	840	
Ice (−10°C)	0.530	2220	
<u>Liquids</u>			
Mercury	0.033	140	
Ethyl alcohol	0.58	2430	
Seawater	0.93	3900	
Water	1.00	4190	

$$c_{mol} = \frac{Q}{mol \Delta T}$$

# Unidades

➤ **CALOR** = ENERGIA

**[Q]** = Joule : J

**1 cal** = **4,1868 J** : Calor necessário para aumentar **T**, de 1 g de água, de 14,5 °C para 15,5 °C.

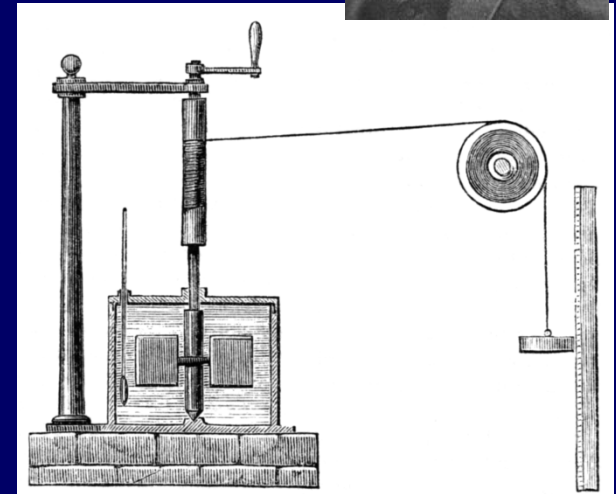
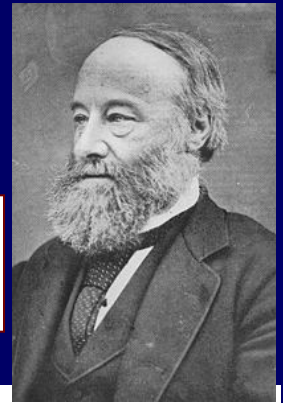
➤ **Calor específico**

**[c]** : J/(kg K) ou: cal/(g K)

➤ **Calor específico molar**

**[c<sub>mol</sub>]** : J/(mol K)

James P. Joule  
1818 – 1889  
Físico Britânico



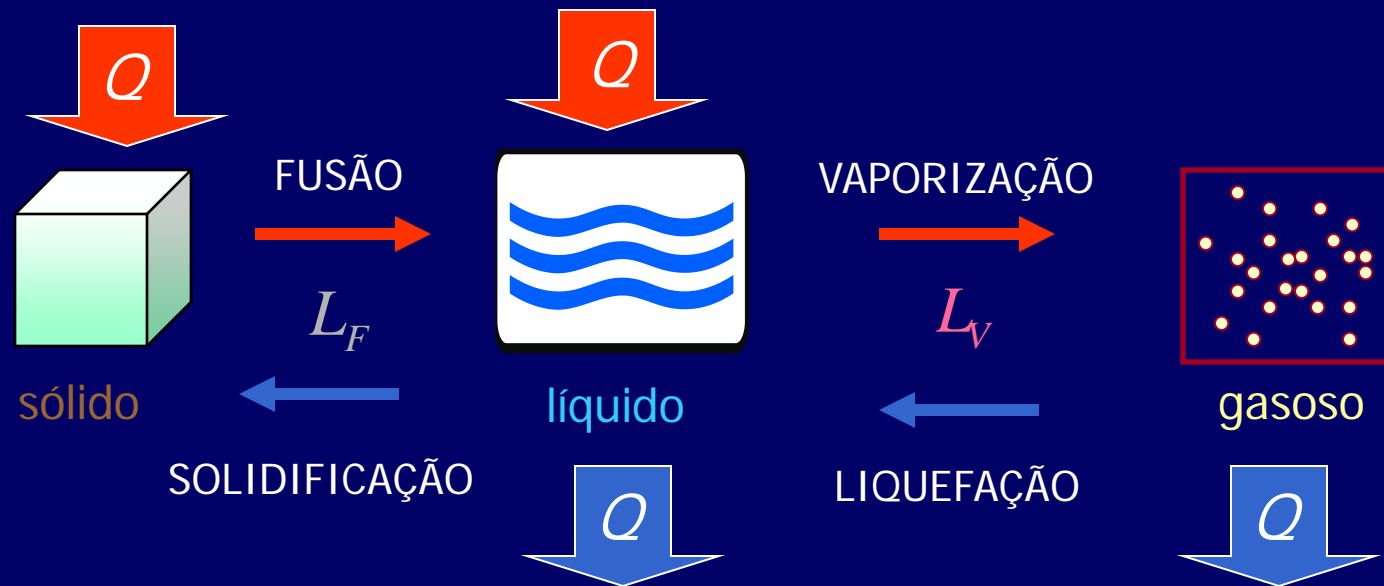
Equivalente mecânico do calor

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

$$c_{mol} = \frac{Q}{mol \Delta T}$$

# Transformação de FASE

Requer energia :  $Q$  (calor absorvido ou liberado)



*Calor de Transformação:*

$$L_i = \frac{Q_i}{m}$$

- A temperatura não varia durante a mudança de estado



# Calor de Transformação

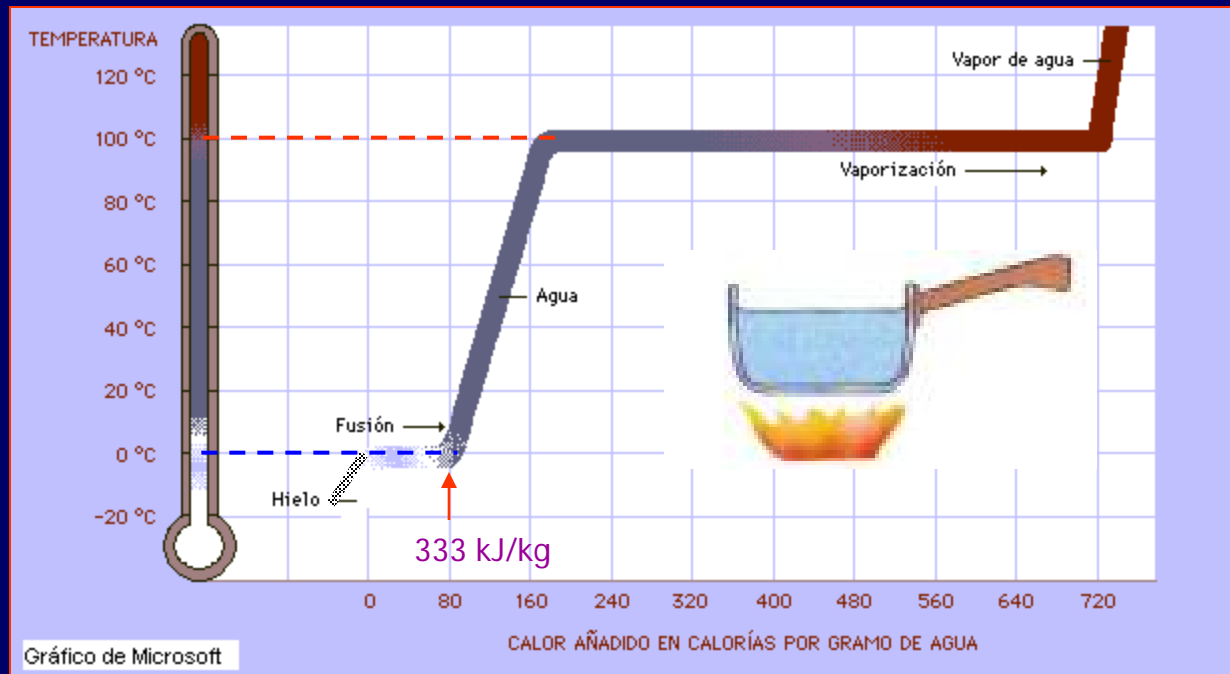


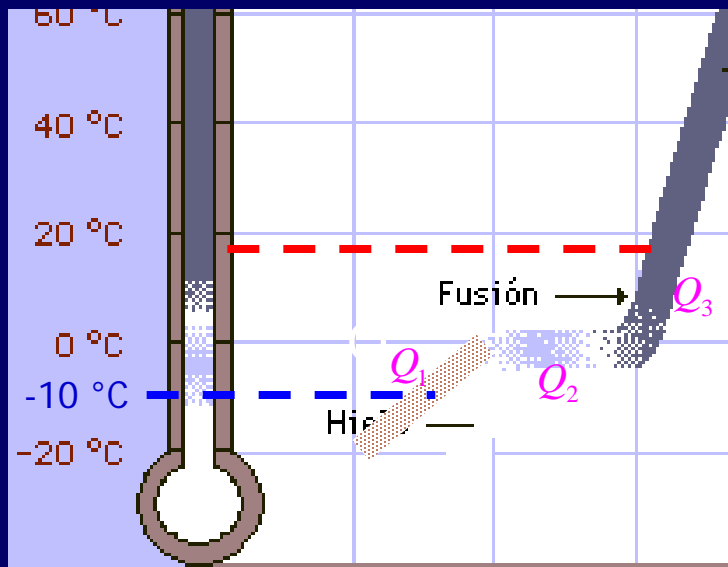
TABLE 19-4 SOME HEATS OF TRANSFORMATION

SUBSTANCE	MELTING		BOILING	
	MELTING POINT (K)	HEAT OF FUSION ( $L_f$ ) (kJ/kg)	BOILING POINT (K)	HEAT OF VAPORIZATION ( $L_v$ ) (kJ/kg)
Hydrogen	14.0	58.0	20.3	455
Oxygen	54.8	13.9	90.2	213
Mercury	234	11.4	630	296
Water	273	333	373	2256
Lead	601	23.2	2017	858
Silver	1235	105	2323	2336
Copper	1356	207	2868	4730

# Exemplo

Qual a quantidade de calor necessária para transformar 720 g de gelo, inicialmente a  $-10^{\circ}\text{C}$ , em água a  $15^{\circ}\text{C}$ ?

Dados:  $c_{ice} = 2220 \text{ J/Kg}$ ,  $L_F = 333 \text{ J/kg}$ ,  $c_{liq} = 4190 \text{ J/kg}$



$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{ice}m(T_f - T_i) & Q &= mc\Delta T \\ &= (2220 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(0.720 \text{ kg})[0^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})] \\ &= 15,984 \text{ J} \approx 15.98 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

$$Q_2 = L_F m = (333 \text{ kJ/kg})(0.720 \text{ kg}) \approx 239.8 \text{ kJ}.$$

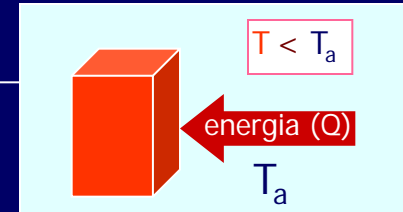
$$\begin{aligned} Q_3 &= c_{liq}m(T_f - T_i) & Q &= mc\Delta T \\ &= (4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(0.720 \text{ kg})(15^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}) \\ &= 45,252 \text{ J} \approx 45.25 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{tot}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= 15.98 \text{ kJ} + 239.8 \text{ kJ} + 45.25 \text{ kJ} \\ &\approx 300 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

# Calor e Trabalho

- **CALOR:**

- Energia transferida por contato térmico;  
+  $Q$  : Calor recebido pelo sistema



- **TRABALHO:**

- Energia transferida por variação dos parâmetros externos do sistema;  
+  $W$  : Trabalho realizado pelo sistema

- **ENERGIA INTERNA DO SISTEMA:**

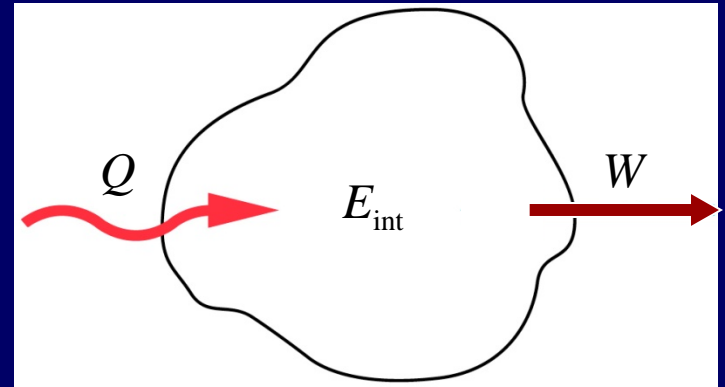
- Energia Cinética + Potencial dos graus de liberdade internos;

Gás Ideal:  $E_{\text{int}} \propto T$  (Proporcional a Temperatura)

# 1ª Lei da Termodinâmica

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$$

(Conservação de Energia)



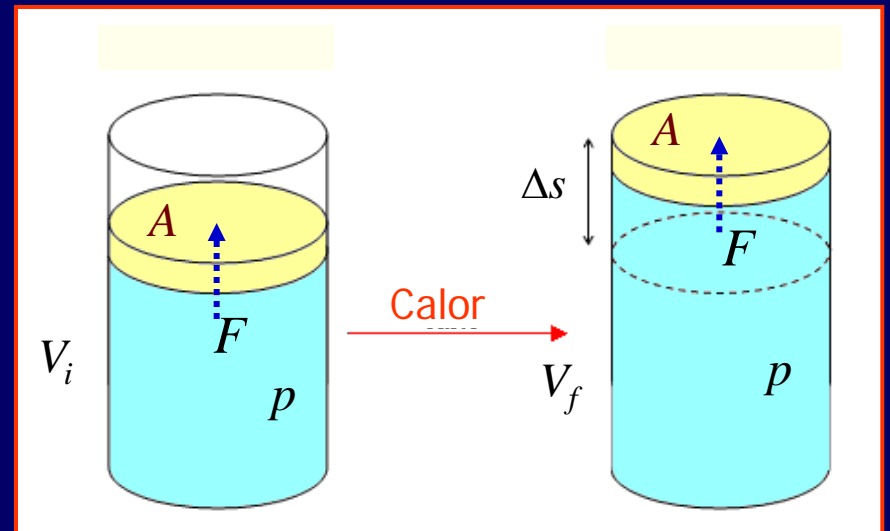
## Trabalho em Fluidos:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds)$$

$$dW = p(Ads)$$

$$dW = p dV$$

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$



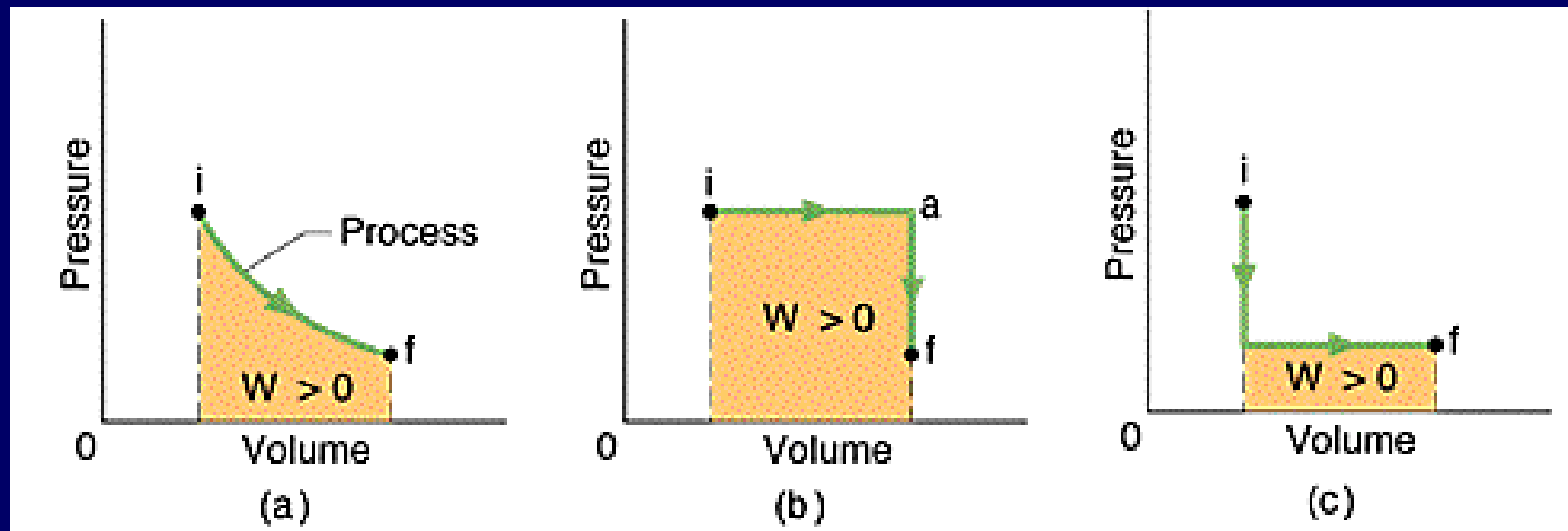
# Trabalho

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$



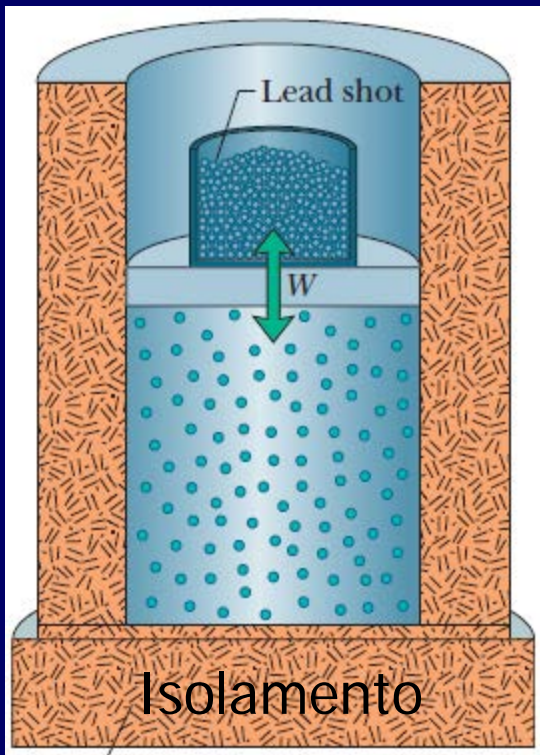
Área sob a curva  
no diagrama  $p - V$

$i \rightarrow f$  ; Qual caminho ?



# 1ª Lei : Processos Adiabáticos

- Sistema isolado OU Processo muito rápido



- Não há transferência de calor

$$Q = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \propto \Delta T \quad (\text{gas ideal})$$



$$\Delta E_{\text{int}} = -W$$

- **Expansão adiabática:**  $W > 0$  :  $\Delta E_{\text{int}} < 0$  : Temperatura diminui
- **Compressão adiabática:**  $W < 0$  :  $\Delta E_{\text{int}} > 0$  : Temperatura aumenta

# 1ª Lei : Processos Isométricos

- Volume = Constante

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV \quad \Rightarrow \quad W = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \quad \Rightarrow \quad Q = \Delta E_{\text{int}}$$

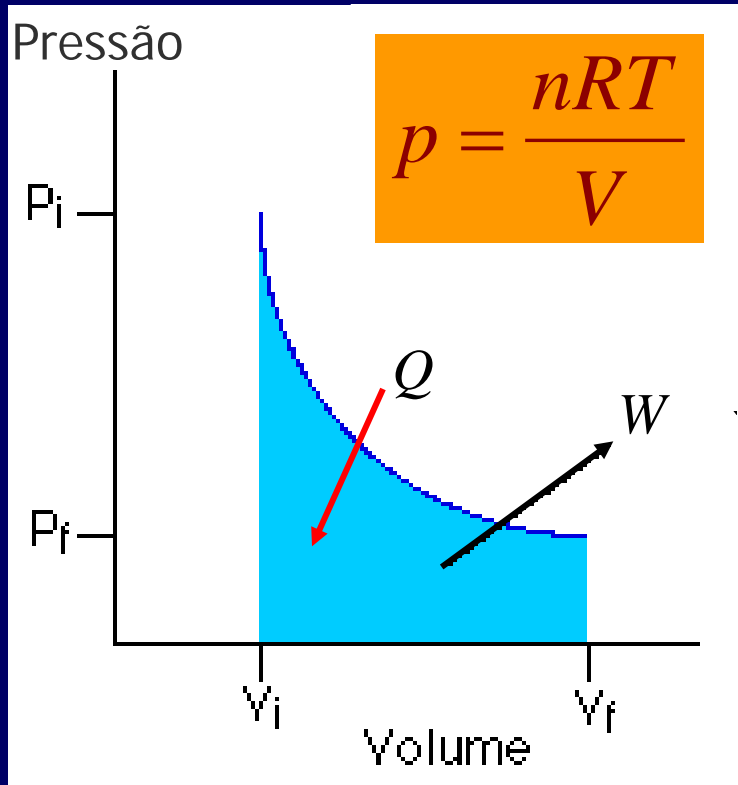
- Gás absorve calor :  $Q > 0$  :  $\Delta E_{\text{int}} > 0$  : Temperatura aumenta
- Gás libera calor :  $Q < 0$  :  $\Delta E_{\text{int}} < 0$  : Temperatura diminui

# 1ª Lei : Processos Isotérmicos

- Temperatura = Constante

Ex.: Gás Ideal  $\rightarrow E_{\text{int}} \propto T \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = Q - W = 0$   $Q = W$

$$pV = nRT$$



$$W_{i \rightarrow f} = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

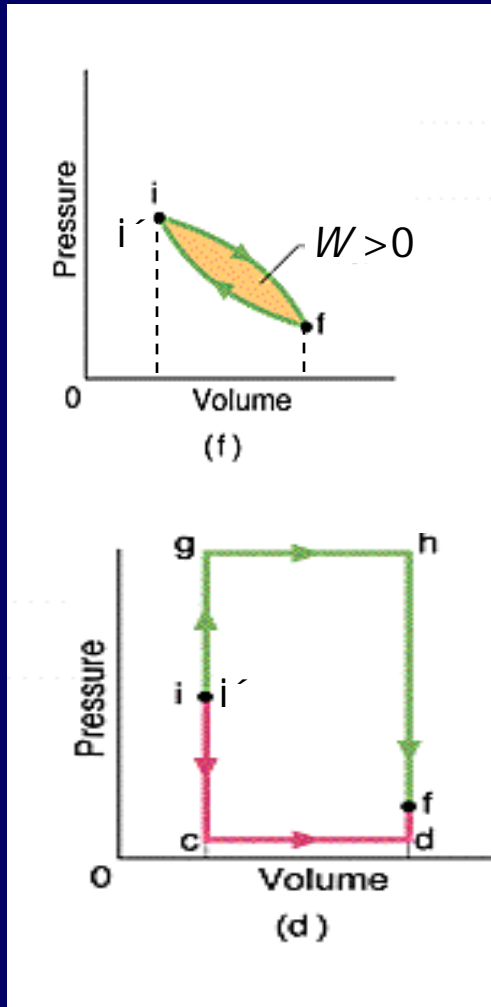
$$W_{i \rightarrow f} = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$W_{i \rightarrow f} = nRT \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$



# 1ª Lei : Processos Cíclicos

- Estado inicial = Estado final ( $i \rightarrow f \rightarrow i'$ )



Curvas fechadas

$$E_{\text{int}} \text{ inicial } (i) = E_{\text{int}} \text{ final } (i')$$



$$T_i = T_{i'}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$$



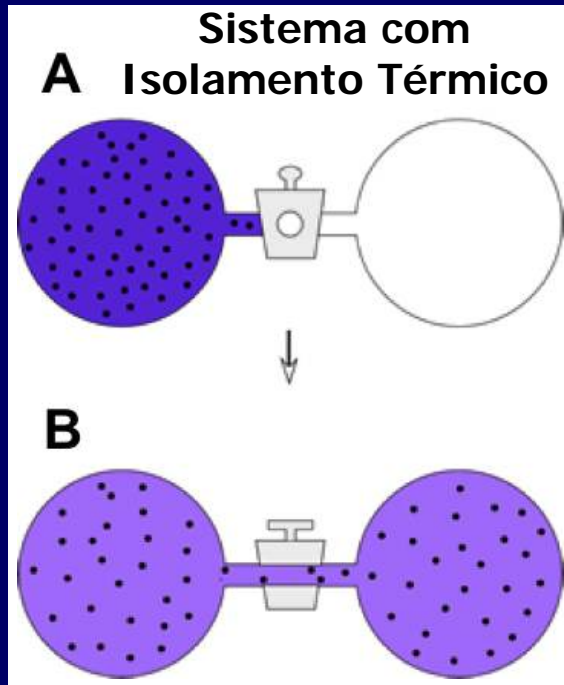
$$Q = W$$

onde:

$$W = W_{i \rightarrow f} + W_{f \rightarrow i'}$$

# Primeira Lei: Expansão Livre

- Expansão adiabática sem realização de trabalho



$$Q = W = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$$

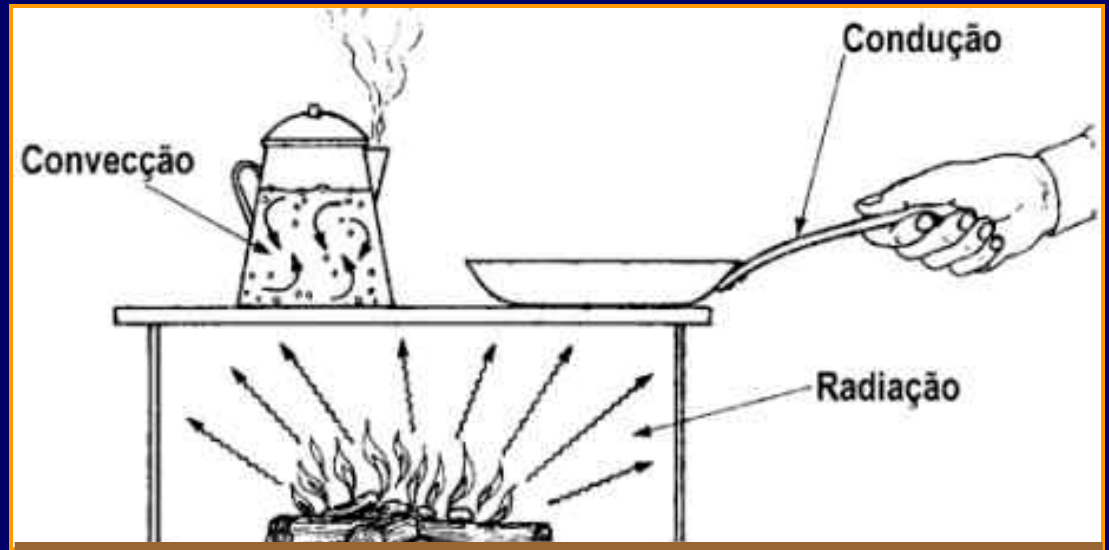


$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

- A temperatura do gás NÃO varia
- Não pode ser realizado lentamente: processo abrupto.
- Os estados intermediários não são “de equilíbrio” ;  
Não se pode plotar a trajetória em um diagrama  $p - V$

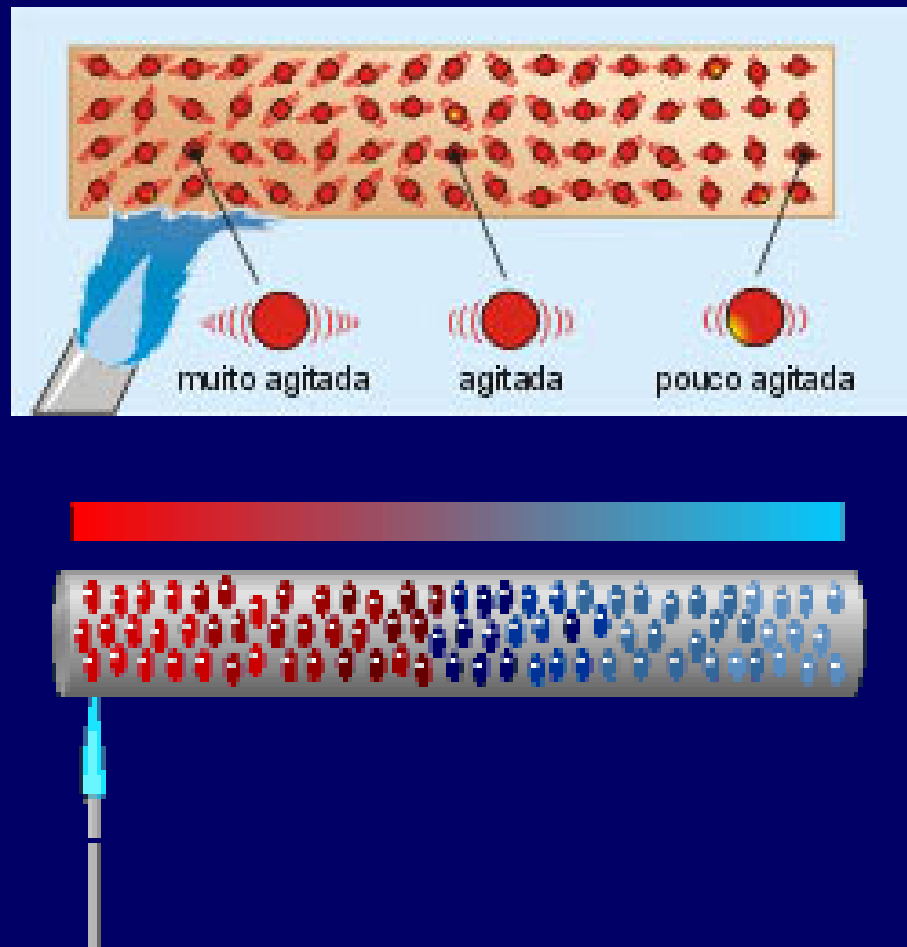
# Transferência de calor

- Condução
- Convecção
- Radiação



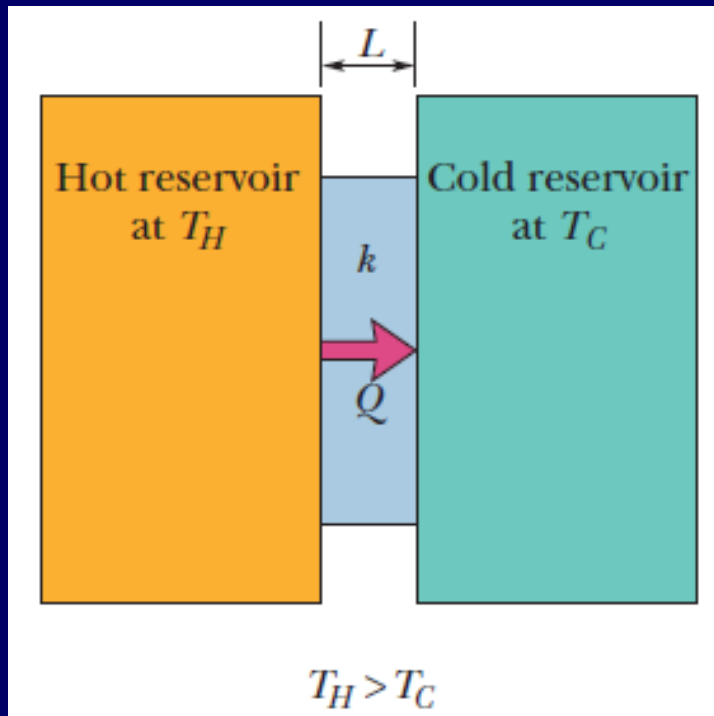
# Condução

- Energia térmica é transferida átomo a átomo



# Condução

- Placa com faces de área  $A$  e espessura  $L$ , mantidas em  $T_H$  e  $T_C$



- Taxa de condução = Calor transferido por unidade de tempo:

$$H = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_H - T_C}{L},$$

$k$  : condutividade térmica do material

Resistência térmica à condução de calor :

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



$$H = A \frac{T_H - T_C}{R_k}$$

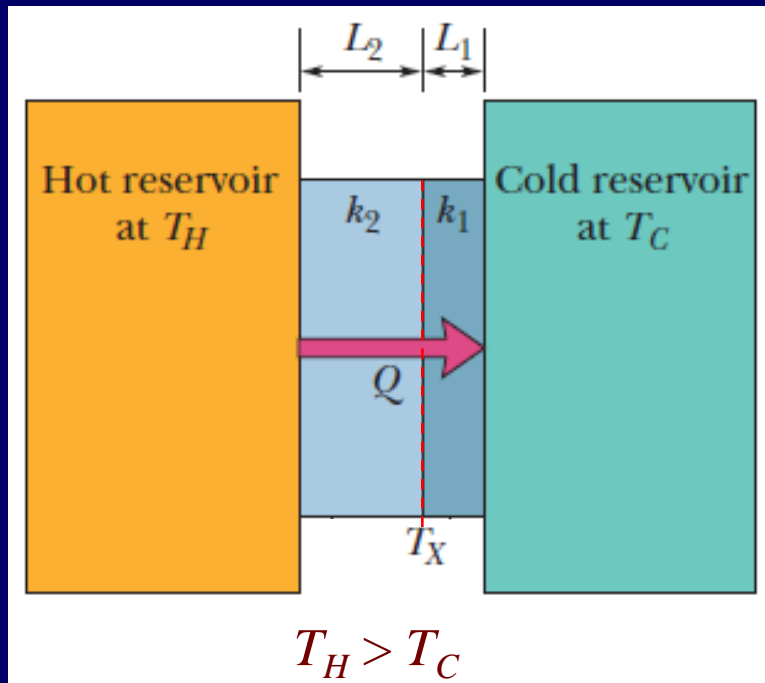
# Condução

**TABLE 19-6** SOME THERMAL CONDUCTIVITIES <sup>a</sup>

$k(\text{W/m}\cdot\text{K})$		$(\text{W/m}\cdot\text{K})$	
<u>Metals</u>		<u>Building Materials</u>	
Stainless steel	14	Polyurethane foam	0.024
Lead	35	Rock wool	0.043
Aluminum	235	Fiberglass	0.048
Copper	401	White pine	0.11
Silver	428	Window glass	1.0
<u>Gases</u>			
Air (dry)	0.026		
Helium	0.15		
Hydrogen	0.18		

# Condução: Exemplo

- Placa composta, em estado estacionário:  $H_1 = H_2 = H$



$$H = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_X - T_C)}{L_1}$$

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$



$$H = \frac{A (T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}$$

$$H = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum (L/k)} = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum R}$$

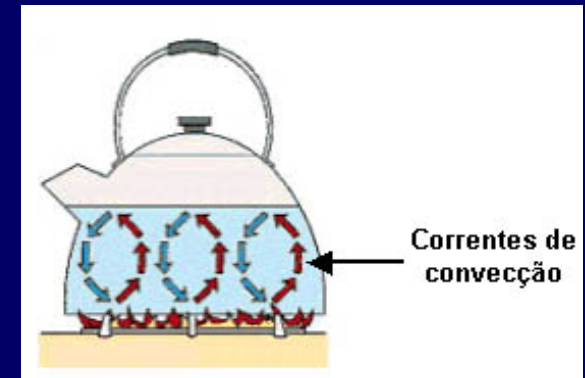
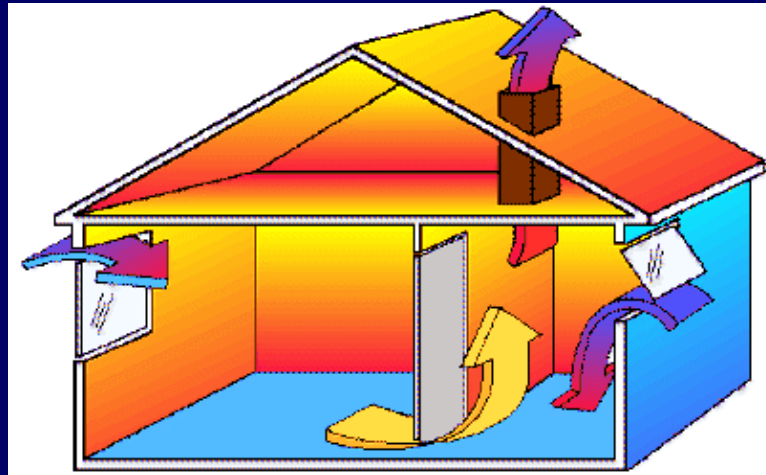
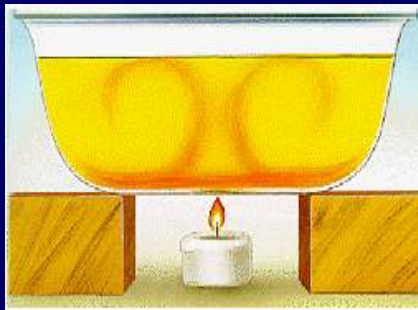


Resistências térmicas  
em série se somam

# Convecção

- FLUIDOS : variação da temperatura  $\rightarrow$  variação da densidade  $\rightarrow$  movimento do fluido :

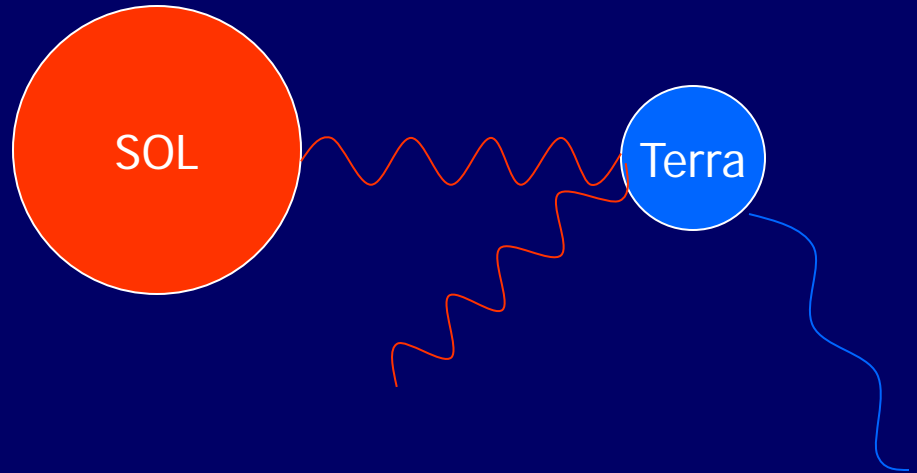
## Correntes de convecção





# Radiação

- Calor absorvido/liberado por absorção/emissão de ondas eletromagnéticas
- Única forma de transferência de calor no vácuo

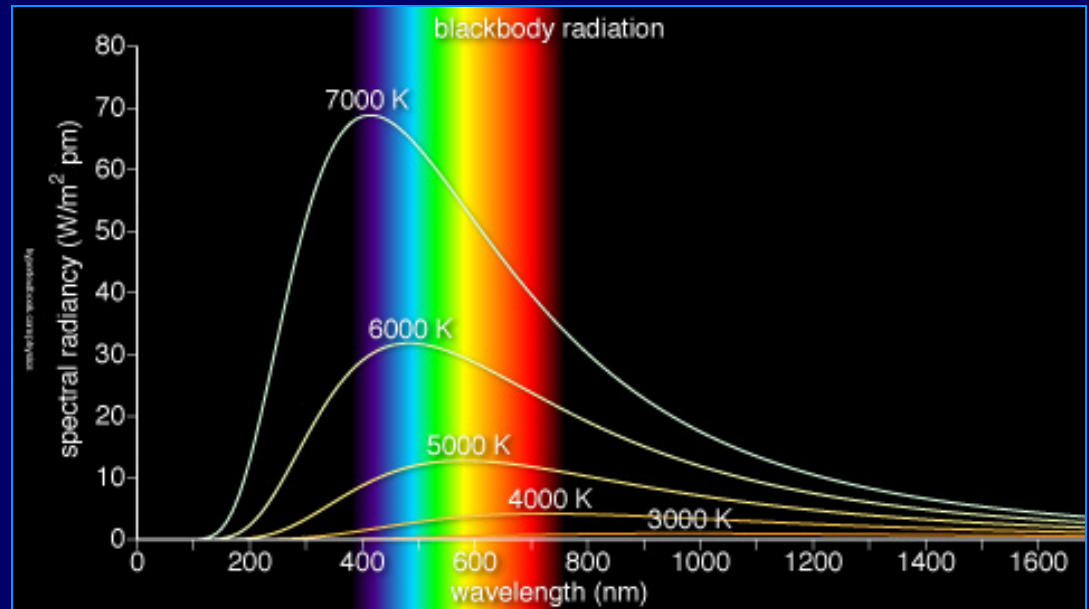


# Radiação

Taxa de radiação térmica = Potência térmica

- Lei de Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma \varepsilon A T^4$$



$\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$  : Cte. de Stefan-Boltzmann

$\varepsilon$  : emissividade :  $0 \rightarrow 1$  ( $1 \rightarrow$  corpo negro)

$T$  : **PRECISA** estar em K

# Radiação

## Emissão vs Absorção

Potência térmica irradiada

$$P_{rad} = \sigma \varepsilon A T^4$$

Potência térmica absorvida

$$P_{abs} = \sigma \varepsilon A T_{amb}^4$$

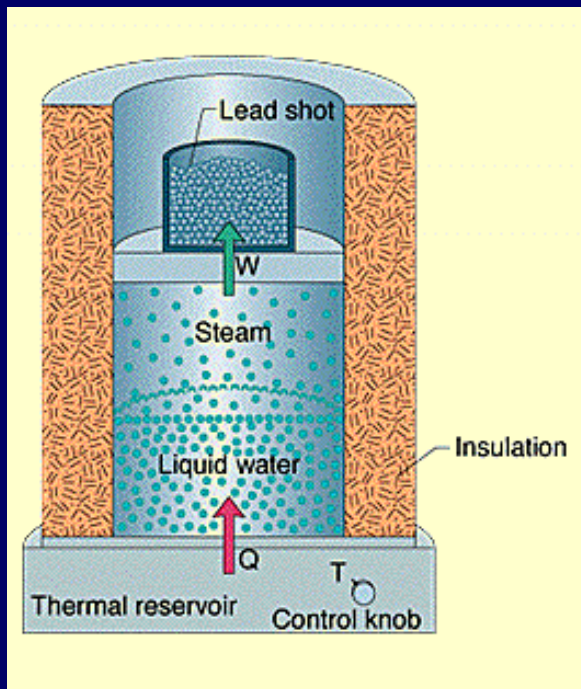
Taxa líquida de troca de energia de um corpo em  $T$ , num ambiente em  $T_{amb}$  :

$$P_{liq} = P_{abs} - P_{rad} = \sigma \varepsilon A (T_{amb}^4 - T^4)$$



# Exemplo

Deve-se converter 1 kg de água, a 100 °C, em vapor d'água na mesma temperatura, numa pressão  $p = 1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . O volume da água varia de  $1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , quando líquida, para  $1,671 \text{ m}^3$  em gás. Calcule: **a)** O trabalho realizado pelo sistema; **b)** A variação da energia interna do sistema.



$$\begin{aligned} W &= \int_{V_i}^{V_f} p \, dV = p \int_{V_i}^{V_f} dV = p(V_f - V_i) \\ &= (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(1.671 \text{ m}^3 - 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \\ &= 1.69 \times 10^5 \text{ J} = 169 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

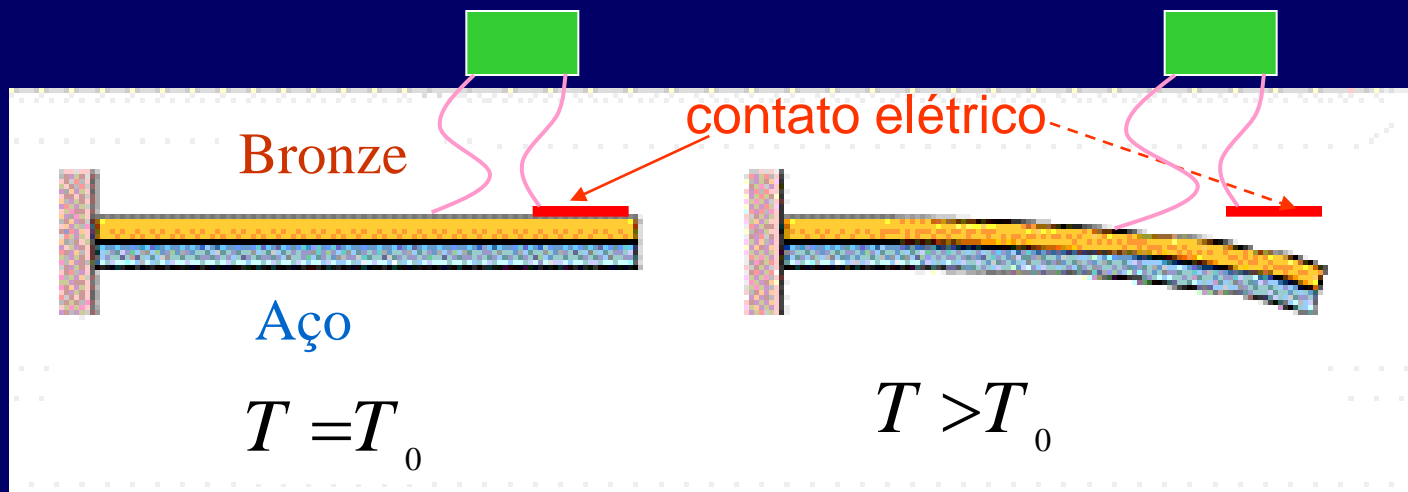
$$\begin{aligned} Q &= L_v m = (2260 \text{ kJ/kg})(1.00 \text{ kg}) \\ &= 2260 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

$$\Delta E_i = Q - W$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{int}} &= Q - W = 2260 \text{ kJ} - 169 \text{ kJ} \\ &\approx 2090 \text{ kJ} = 2.09 \text{ MJ}. \end{aligned}$$

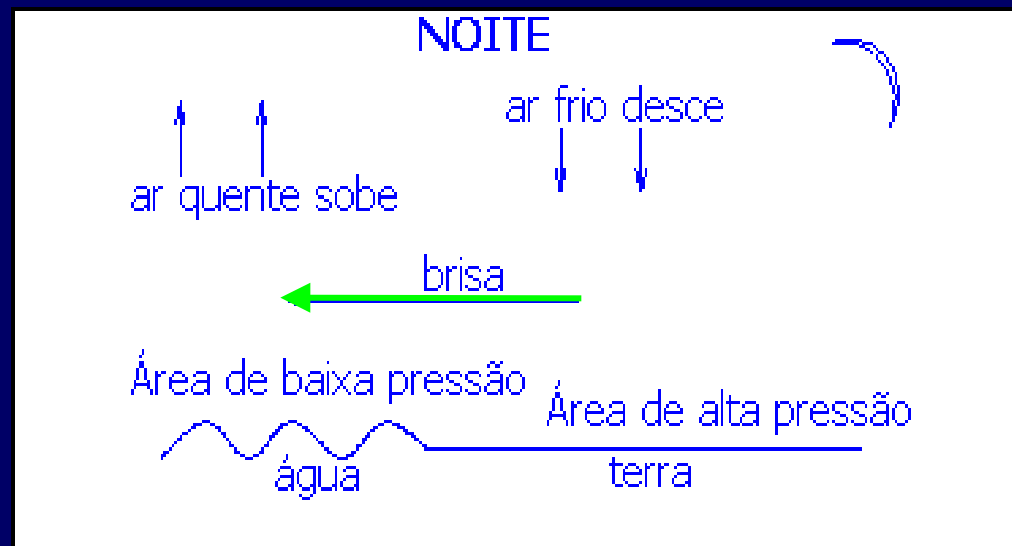
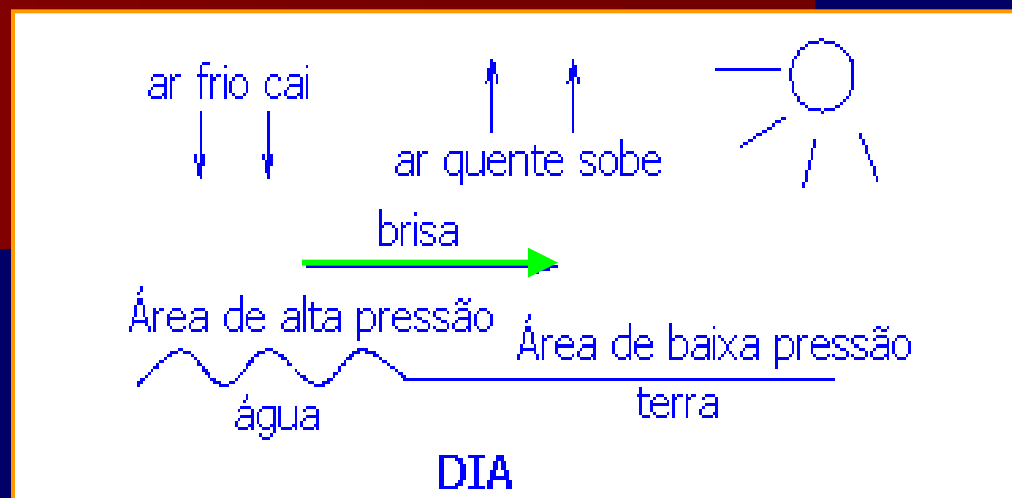
# Dilatação térmica

## ■ Aplicação : termostato



# Convecção

## Brisa do mar:



- O ar quente é menos denso e sobe. O ar frio é mais denso e desce. Correntes de convecção são efetivas formas de trocar calor.

# Exemplo

Um fio de aço com 130 cm de comprimento e 1,1 mm de diâmetro é aquecido a 830 °C e conectado a dois suportes. Qual a força gerada no fio quando ele é resfriado a 20 °C ?  
 $\alpha_{\text{aço}} = 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ;  $E_{\text{aço}} = 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ .

$$\Delta L = L \alpha \Delta T = 1,3 \times 11 \times 10^{-6} \times 810$$

$$\Delta L = 1,16 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,16 \text{ cm}$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L}$$

$$F = E \frac{\Delta L}{L} \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = 200 \times 10^9 \frac{1,16 \times 10^{-2}}{1,3} \pi \left( \frac{1,1 \times 10^{-3}}{2} \right)^2$$

$$F = 1700 \text{ N}$$



# Dilatação térmica

