

# Física II (4302112)

## Turma T2 - noturno

Termometria

Calor

Profa. Luciana V. Rizzo

# Termodinâmica

- Termometria → Modos de medir a temperatura
  - Dilatação térmica → Dilatação e contração de objetos
  - Calorimetria → Trocas de calor
  - Gases Ideais →  $PV=nRT$
  - Teoria Cinética dos Gases → Relaciona variáveis termodinâmicas com propriedades microscópicas da matéria
  - Trocas de calor e a 1ª Lei da Termodinâmica
  - 2ª Lei da Termodinâmica
  - Máquinas Térmicas
  - Entropia
- Transformações termodinâmicas em sistemas

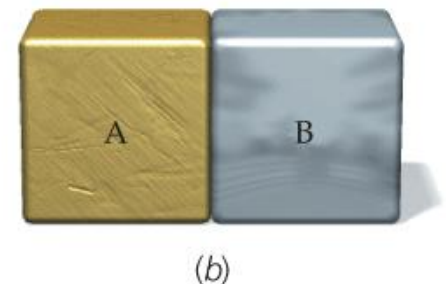
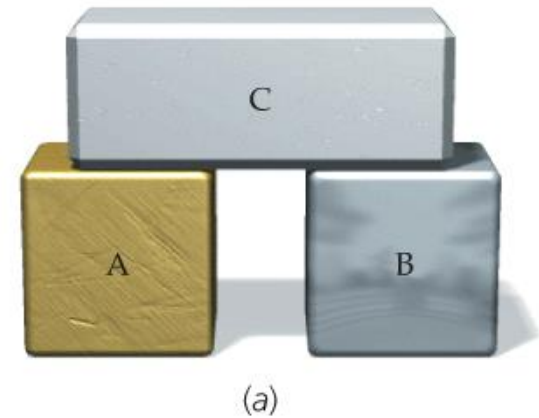
# Termometria

Estudo da temperatura e das  
maneiras de medir temperatura

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, and white) extending from the right side of the slide towards the center.

# Conceitos básicos

- Equilíbrio térmico: Dois corpos em contato físico estão em equilíbrio térmico quando param de trocar energia, ou seja, quando o fluxo líquido de energia entre eles é nulo. Quando isso acontece, a temperatura dos dois corpos é a mesma.
- Lei zero da termodinâmica: Se dois corpos A e B estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, então os três corpos estão em equilíbrio térmico entre si.



# Sensores de temperatura

*Termômetros de expansão de líquidos em tubos de vidro.*

*Termômetros bimetálicos.*

*Termômetros manométricos.*

*Termômetros de resistência elétrica: RTDs e termistores.*

*Termômetros a semicondutores integrados.*

*Termopares.*

*Termômetros de radiação.*

*Termômetros a fibra óptica.*



-50~550°C  
-58~1022°F

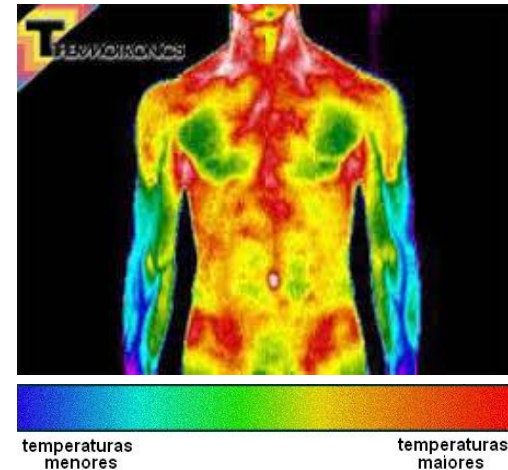
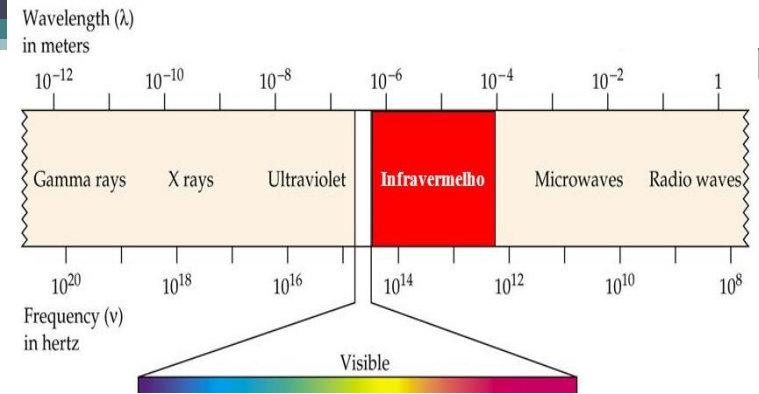


# Propriedades termométricas

- Propriedade física que varia com a temperatura
- A variação de uma propriedade termométrica indica uma variação na temperatura de um corpo.
- Exemplos:
  - volume de um líquido
  - comprimento de uma barra
  - resistência elétrica de um material
  - pressão de um gás mantido em volume constante
- Os termômetros baseados em propriedades termométricas requerem contato físico com o sistema e pressupõem equilíbrio térmico

# Termômetro de radiação infravermelha

- Não requer contato físico nem equilíbrio térmico
- Princípio: todo corpo emite radiação eletromagnética, com potência proporcional a  $T^4$ .
- Desvantagens:
  - As características da superfície emissora devem ser conhecidas
  - Interferência de absorção/emissão do meio entre objeto e o termômetro



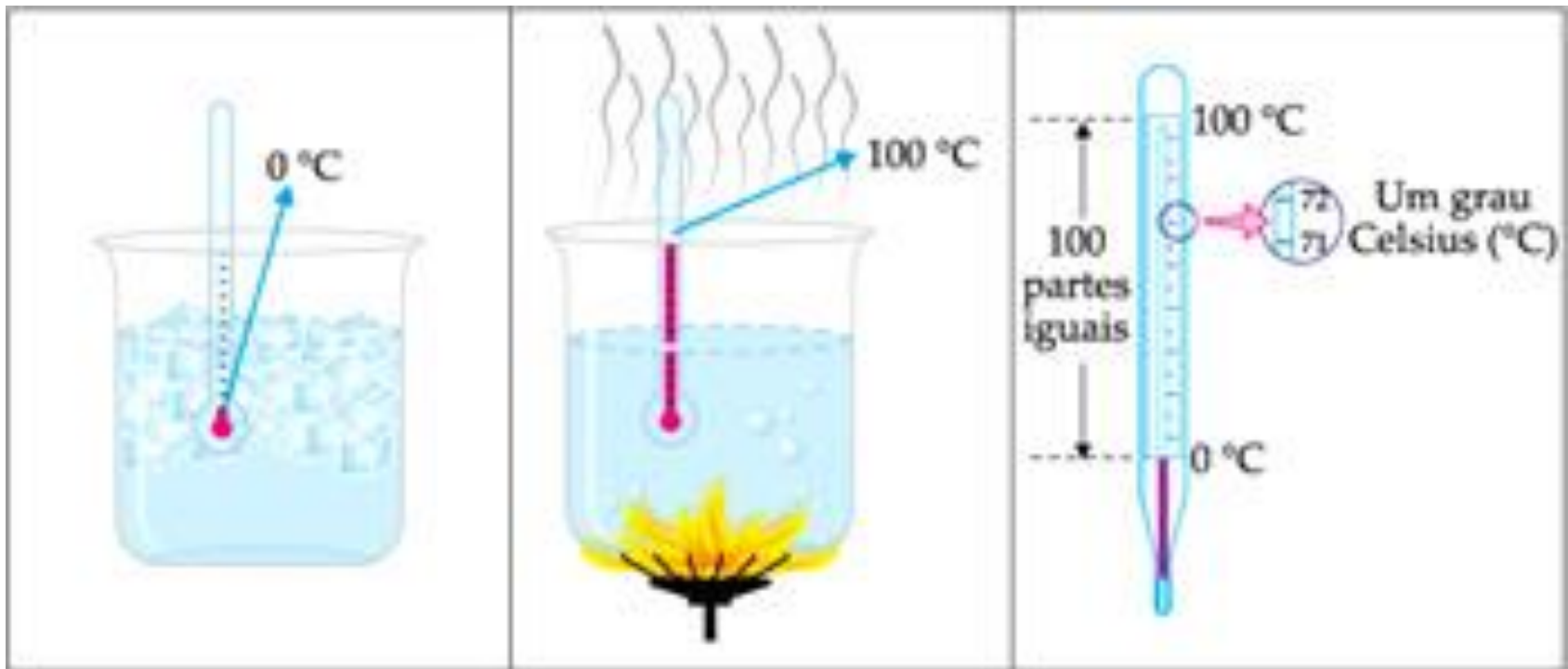
$$P_r = e\sigma AT^4$$

Área da superfície que irradia ( $m^2$ )

Emissividade da superfície que irradia

# Escalas de temperatura

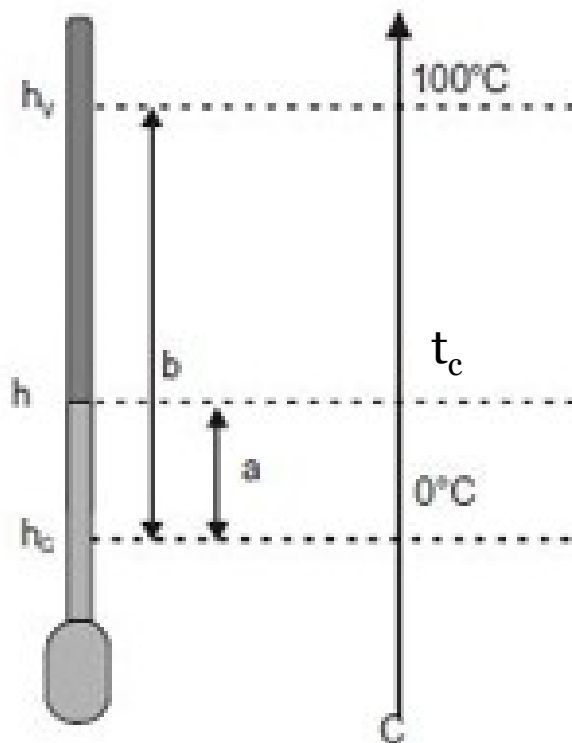
- Baseadas em propriedades termométricas
- Escalas lineares construídas com base em temperaturas conhecidas





# Escala Celsius (1742)

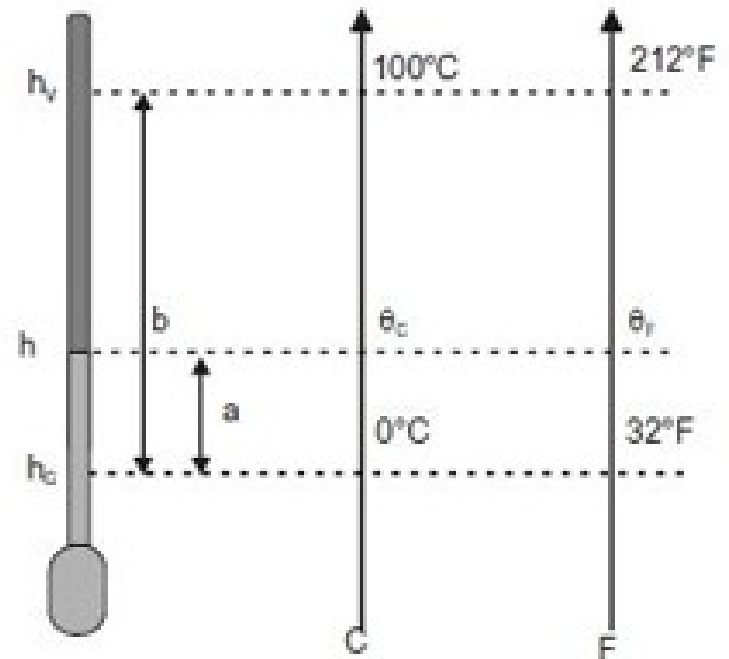
- Adota o valor zero para a temperatura do ponto de gelo, e o valor 100 para a temperatura do ponto de vapor da água.
- Escala entre 0 e 100 subdividida em 100 partes iguais



$$t_c = \frac{h - h_G}{h_v - h_G} \times 100$$

# Escala Farenheit (1727)

- Adota o valor zero para a mistura de água, gelo e sal; e o valor 100 para a temperatura do corpo humano.
- Isso equivale a:  $32^{\circ}\text{F}$  para o ponto de gelo e  $212^{\circ}\text{F}$  para o ponto de vapor da água.
- Entre o ponto de gelo e o ponto de vapor há  $100^{\circ}\text{C}$  e  $180^{\circ}\text{F}$
- **Variação de  $1^{\circ}\text{C}$   
= variação de  $1,8^{\circ}\text{F}$**



# Conversão Celsius - Farenheit

$$t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32)$$

- Celsius e Farenheit são chamadas escalas relativas de temperatura.
- Termômetros de bulbo graduados nessas escalas funcionam bem nas proximidades dos pontos de calibração (0 e 100 °C).
- Deficiência: dependem da propriedade termométrica do material utilizado, como o mercúrio

# Kelvin: escala absoluta de temperatura

- A escala de temperatura de gás ideal (ou escala absoluta de temperatura) é definida de modo que a temperatura do estado de ponto triplo ( $T_3$ ) seja de 273,16 kelvins (K).

$$T = \frac{P}{P_3} T_3$$

- Vantagem: não depende do gás que foi utilizado
- Conversão Celsius – Kelvin:

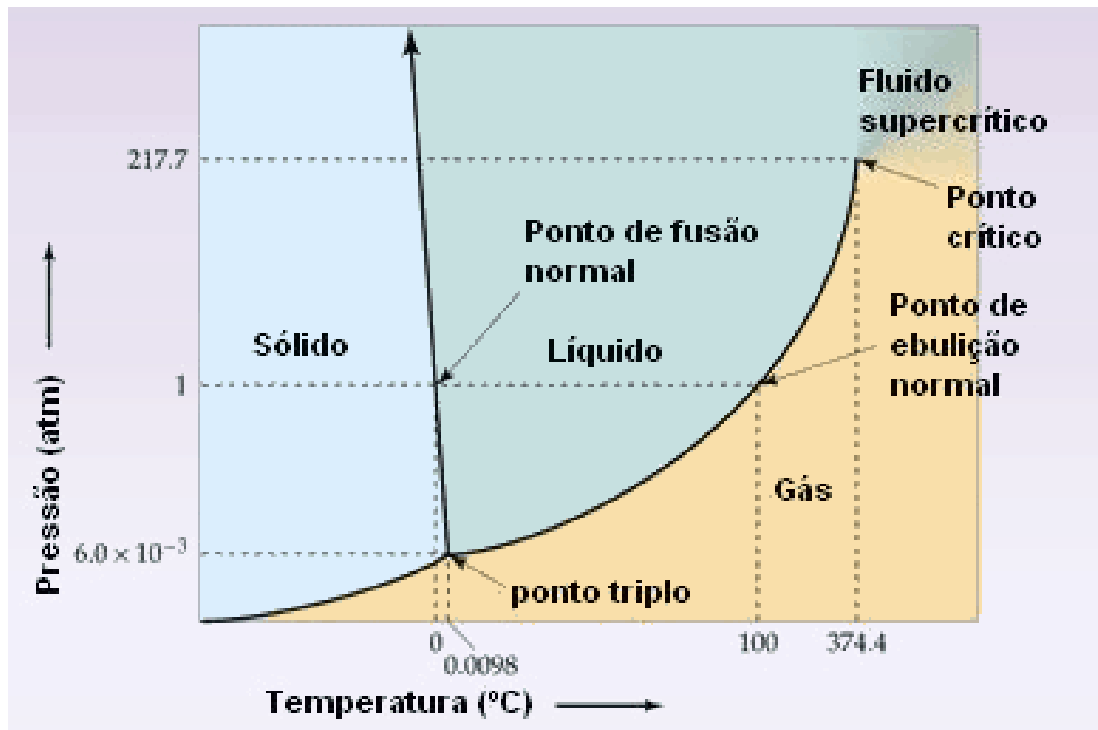
$$T = t_C + 273,15$$

K é a unidade de temperatura no SI

Atenção: uma variação de 1 °C equivale a uma variação de 1 K, isto é:  $\Delta T = 1^\circ\text{C} = 1 \text{ K}$

# Termômetros de gás

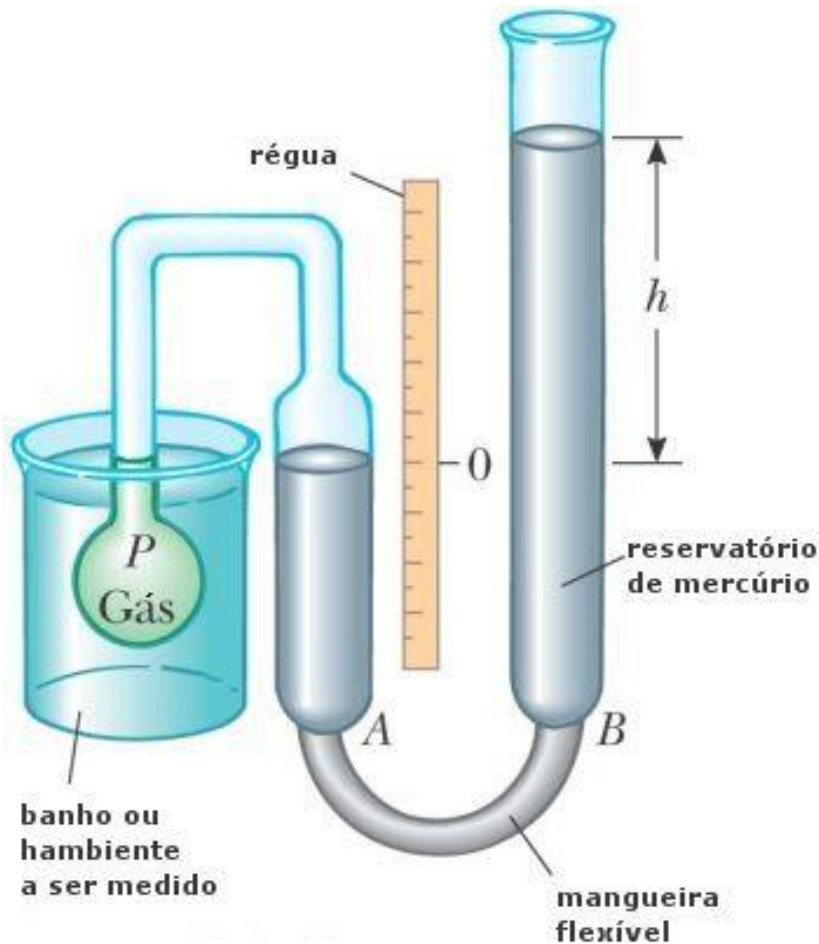
- Calibração: o ponto triplo da água
- Temperatura e pressão únicas em que coexistem água, vapor d'água e gelo em equilíbrio:  
 $T_3=0,0098^{\circ}\text{C}$  e  $P_3=0,006$  atm



Temperatura do ponto triplo em Kelvin (acordo internacional):

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

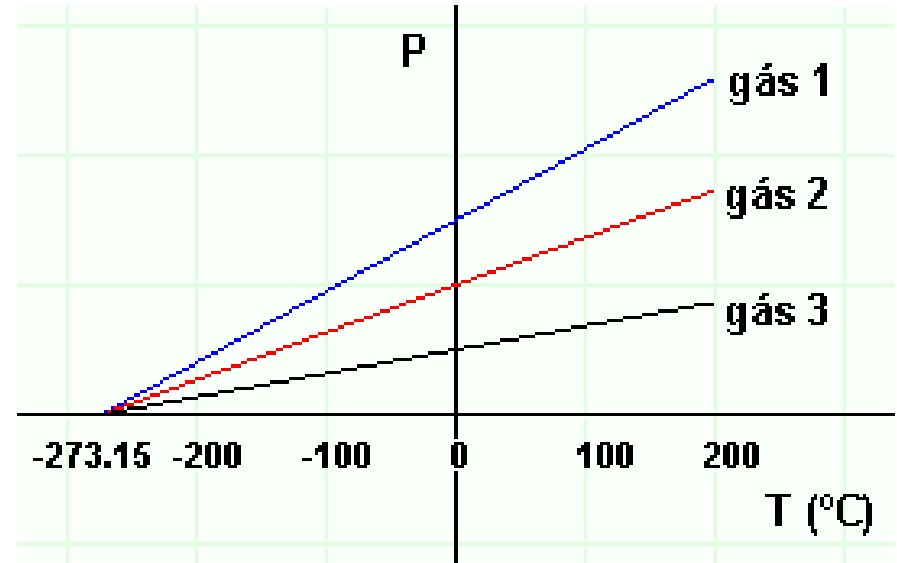
# Termômetro de gás a volume constante



- A altura da coluna B é ajustada de forma que o nível da coluna A esteja sempre na marca zero (volume constante)
- A altura  $h$  indica variações na pressão do gás, que são proporcionais a variações na temperatura
- Vantagem: a medida de temperatura não depende do gás que foi utilizado.

# Termômetros de gás

- Pressão x Temperatura para 3 gases diferentes. Quando extrapolado para a pressão zero, o gráfico intercepta o eixo x no valor  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



- A escala de temperatura de gás ideal (ou escala absoluta de temperatura) é definida de modo que a temperatura do estado de ponto triplo ( $T_3$ ) seja de  $273,15$  kelvins (K).

$$T = \frac{P}{P_3} T_3$$

- Vantagem: não depende do gás que foi utilizado

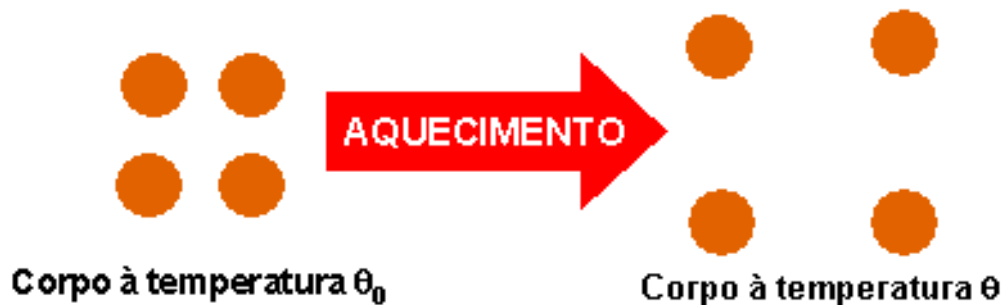
# Dilatação térmica





# Dilatação térmica

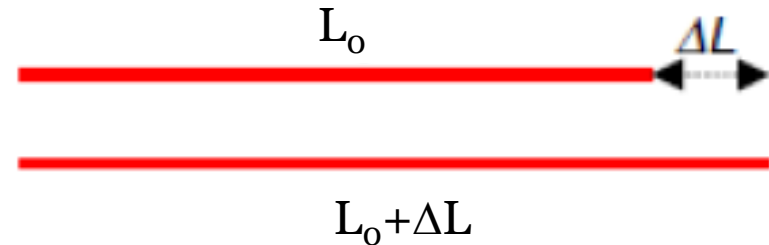
- Aumento da temperatura (energia térmica) → maior agitação das moléculas → aumento de volume



# Dilatação linear

- Seja um bastão de comprimento  $L_0$  à temperatura  $T$ . Quando a temperatura varia de  $\Delta T$ , a variação relativa do comprimento,  $\Delta L/L_0$  é proporcional a  $\Delta T$ :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

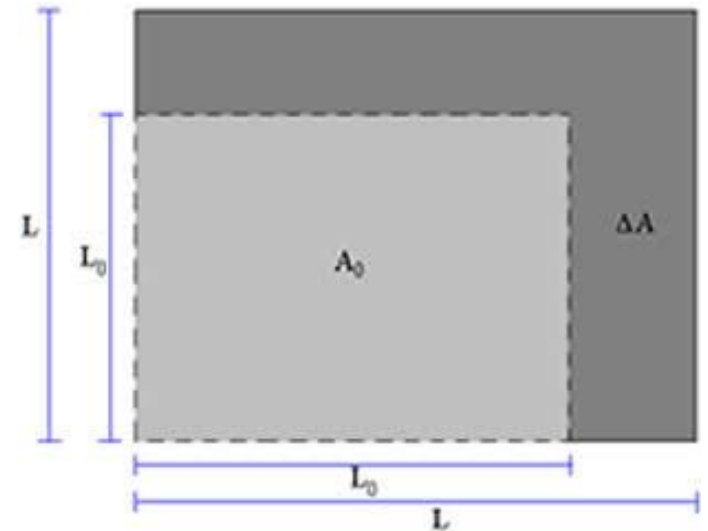


- $\alpha$  = coeficiente de dilatação linear (1/K ou 1/°C). Varia com temperatura e pressão.

$$\alpha = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta L/L}{\Delta T} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$$

# Dilatação superficial

$$\frac{\Delta A}{A} = \beta \Delta T$$

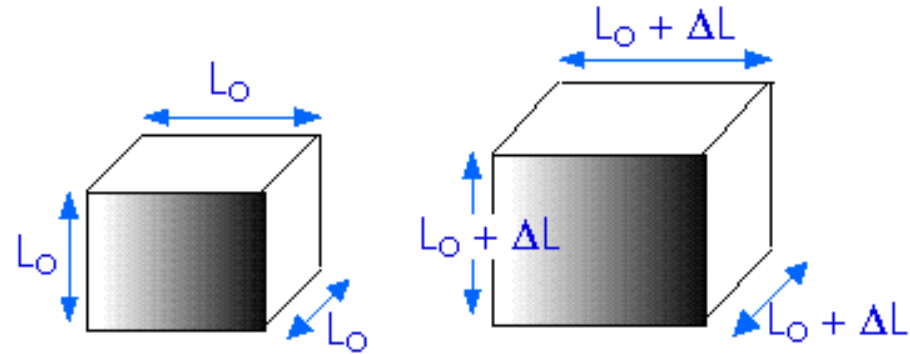


- $\beta$  = coeficiente de dilatação superficial ( $1/\text{K}$  ou  $1/^\circ\text{C}$ ).  
Varia com temperatura e pressão.

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta A/A}{\Delta T} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dT}$$

# Dilatação volumétrica

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \Delta T$$



- $\gamma$  = coeficiente de dilatação volumétrica (1/K ou 1/°C). Varia com temperatura e pressão.

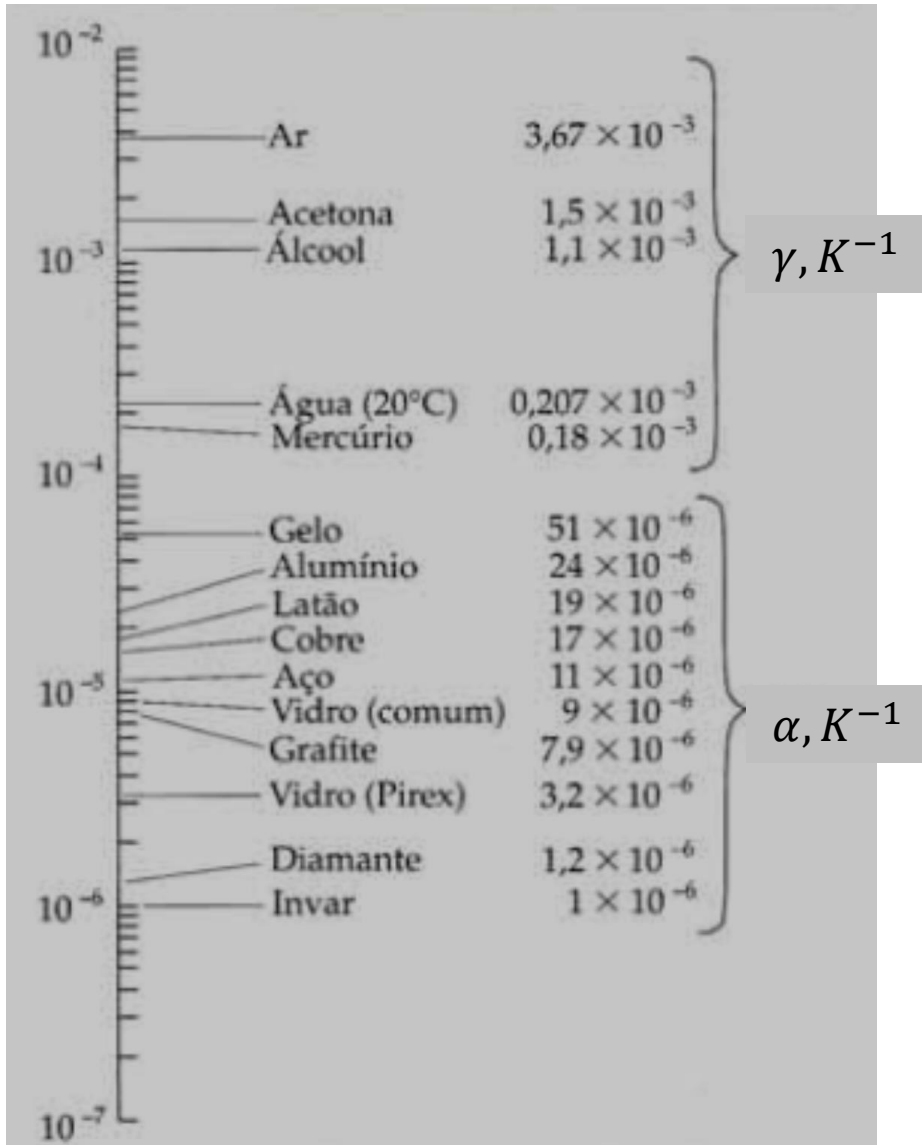
$$\gamma = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V / V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$$

Relação entre os coeficientes de dilatação linear, superficial e volumétrico

$$\beta = 2\alpha$$

$$\gamma = 3\alpha$$

## Valores tabelados para $\alpha$ e $\gamma$

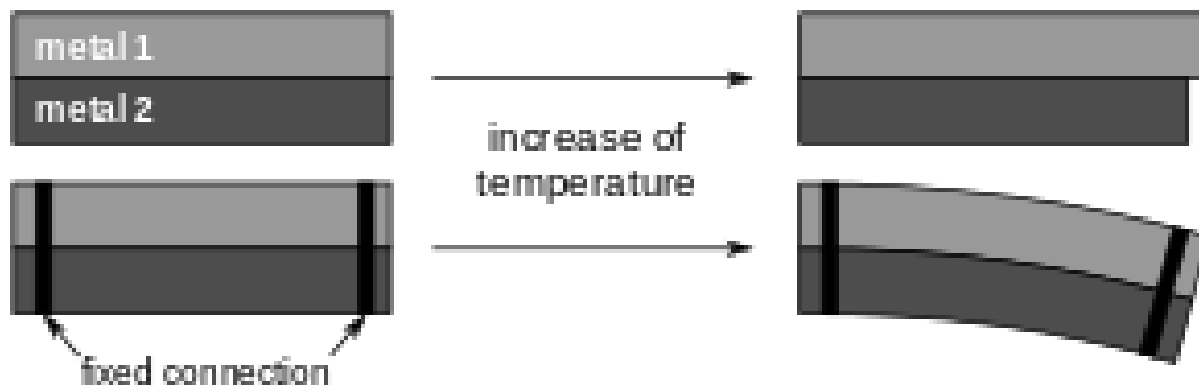


# Termômetros baseados em dilatação

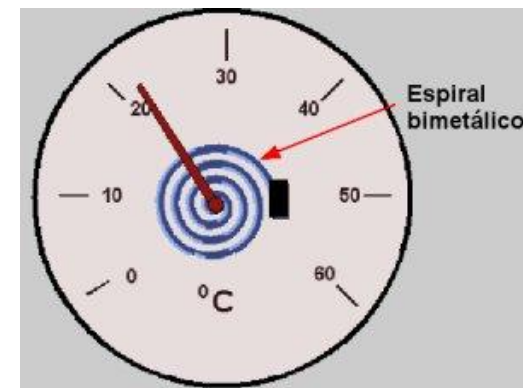
- Termômetro de bulbo



- Termômetro bimetalístico (e termostatos)

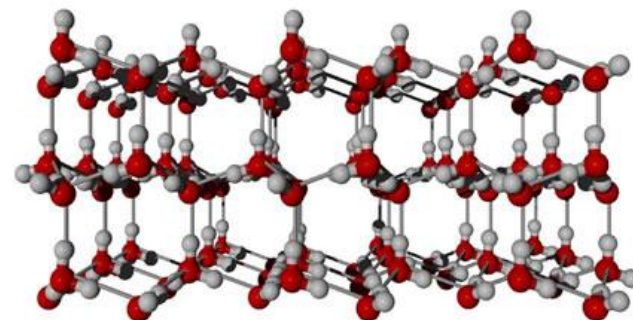
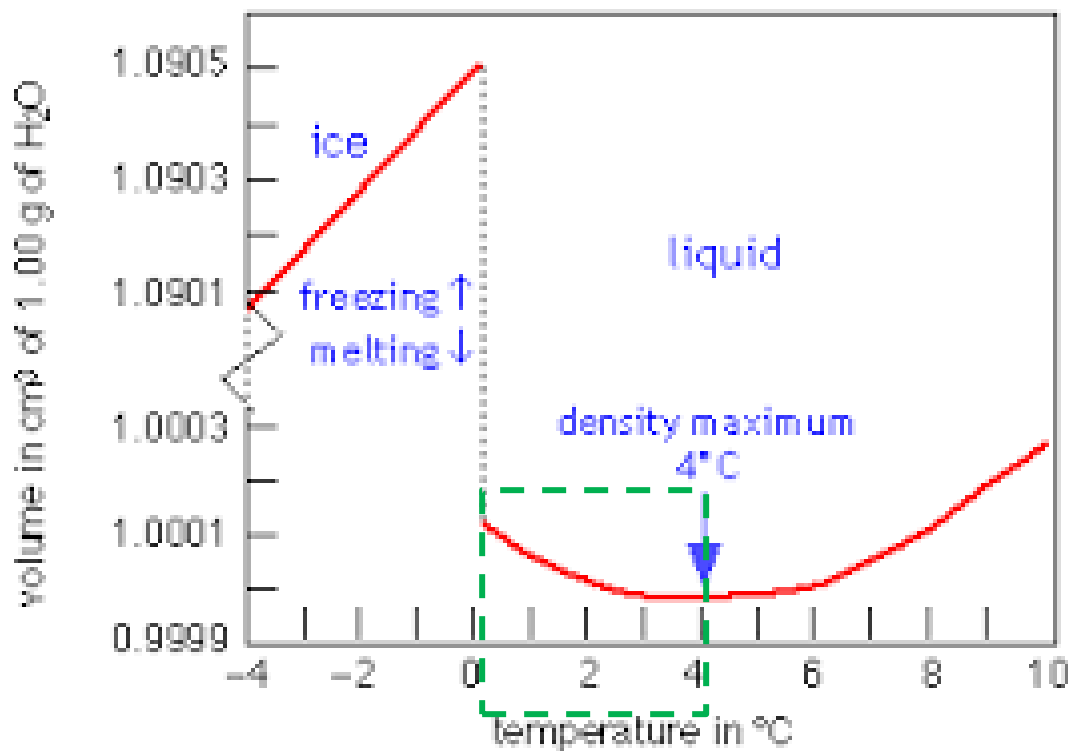


$$\alpha_{\text{metal1}} > \alpha_{\text{metal2}}$$



# Ressalva: dilatação anômala da água

A maioria dos materiais se expande quando aquecidos e se contrai quando resfriados. A água é uma exceção (entre 0 e 4°C).



**Anomalia:** entre 0 e 4 °C a água se contrai com o aumento de temperatura.

O aumento da temperatura tem 2 efeitos:

- \* Agitação térmica → expansão
- \* Quebra das ligações de hidrogênio → contração

# O que é calor?

Equivalência entre calor e trabalho - Experimento de Joule



# O que é calor?

- Foram necessários séculos de pesquisa científica para responder essa pergunta!
- A máquina a vapor já havia sido inventada (1698), mas ainda não se sabia o que era calor.
- Parte da resposta surgiu em meados do século XIX, pelo trabalho independente de cientistas de diversas áreas: Mayer, Joule, Colding, Helmholtz, Carnot, Séguin, Boltzmann, Hirn, Mohr, Grove, Faraday e Liebig

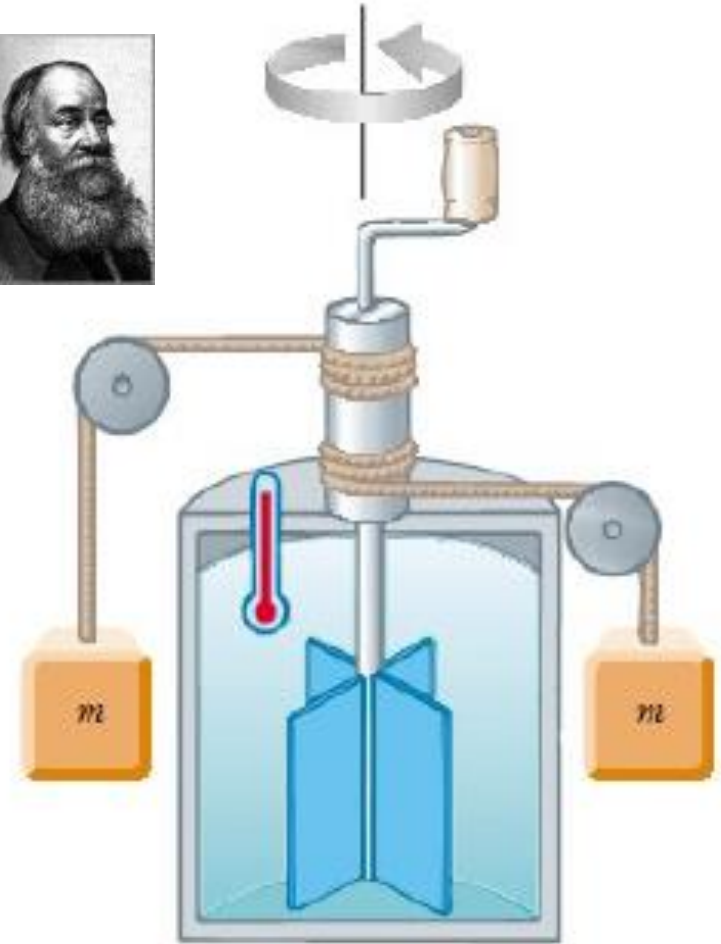
# Calor: fluido ou energia?

- Séc. XVII: energia térmica como uma manifestação do movimento molecular (Galileu, Newton)
- Até meados do séc. XVIII: Teoria do calórico
  - Calórico: fluído invisível e inodoro, contido em todos os corpos. Quanto maior a temperatura de um corpo, maior seria a sua quantidade de calórico. Quando dois corpos fossem colocados em contato, o corpo com mais calórico cederia parte dele para o corpo com menos calórico, até que ambos tivessem a mesma quantidade de calórico.
- 1798: o alemão Benjamim Thompson publica o artigo “Uma investigação experimental sobre a fonte de calor gerado por atrito”
  - Serviço militar: no processo de fabricação de canhões, observou que o latão aquecia quando perfurado por brocas
  - Se tanto o latão quanto a broca aqueciam, como explicar esse fenômeno através da troca de um fluido (calórico)?
  - Levantou a hipótese de que a energia que aquecia os materiais vinha da energia mecânica das brocas



# O experimento de Joule (1840)

- Recipiente com água termicamente isolado
- A queda dos blocos faz girar uma pá que agita a água
- A energia potencial gravitacional é convertida em energia térmica
- Observa-se um aumento na temperatura da água



Thermal insulator

Métodos experimentais aperfeiçoados ao longo de 35 anos (!)

# Conversão energia mecânica - energia térmica

- Joule observou que:
  - Quando os blocos (massa 772 libras) caíram de uma altura de 1 pé, 1 libra de água teve sua temperatura aumentada em 1 °F
  - Convertendo para unidades mais conhecidas: é preciso 4,184 J de energia mecânica para aquecer 1 g de água em 1 °C (equivalente mecânico do calor)
- Conservação da energia:

$$E_{pg} = Q$$

$$m_{bloco}gh = m_{\acute{a}gua}c\Delta T$$

**Trabalho mecânico  
pode ser convertido em  
calor, e vice-versa!**

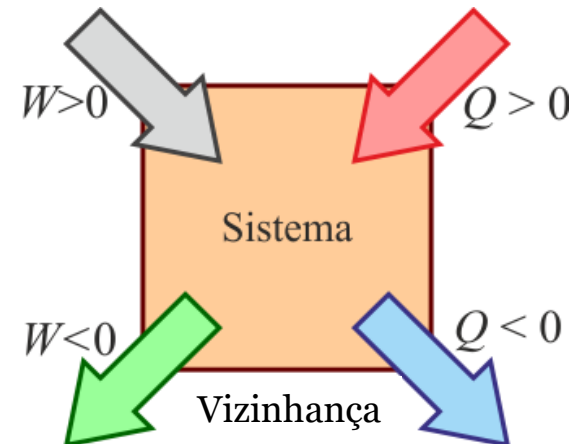
# O experimento de Joule



<https://www.youtube.com/watch?v=ZpmupMlgp24>

# Contribuições da experiência de Joule para o desenvolvimento da termodinâmica

- O calor é uma forma de energia (energia térmica)
- Conservação da energia: energia mecânica pode ser convertida em energia térmica
- Podemos aumentar a temperatura (energia interna) de um sistema de duas formas:
  - Fornecendo calor
  - Realizando trabalho sobre ele



# Unidades de Calor:

- SI: J = joule (mesma unidade de trabalho e de energia)
- Outras: cal (caloria), Btu (British Thermal Unit)
- Conversão:  $1\text{J} = 0,239\text{ cal} = 9,48 \times 10^{-4}\text{ Btu}$ .  
 $1\text{ cal} = 4,184\text{ J}$

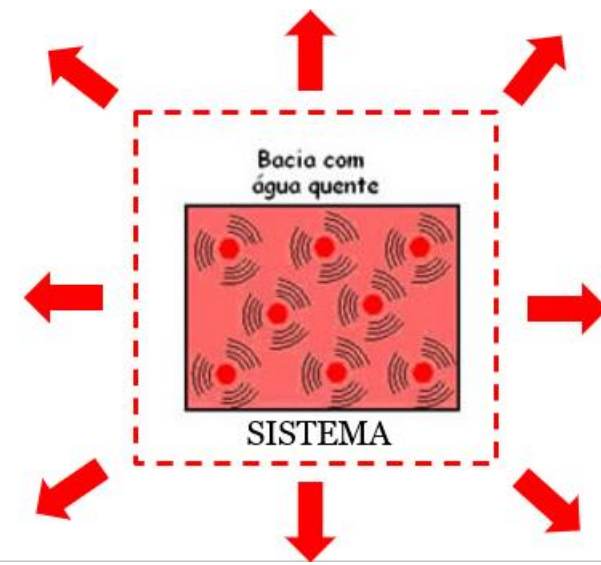
Definição histórica de caloria: quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de 1 g de água em 1°C.

Cuidado: a unidade usada para medir o equivalente energético de alimentos, conhecida como “caloria”, fisicamente corresponde a kilo calorias (kcal).

# Fontes de calor

Transferência de calor (energia térmica) do sistema para a vizinhança.

- Combustão (energia química -> térmica)
- Compressão de gases (energia mecânica -> térmica)
- Atrito (energia mecânica -> térmica)
- Choques mecânicos (energia mecânica -> térmica)
- Resistores elétricos (energia elétrica -> térmica)
- Sol (energia fusão nuclear -> térmica)
- Condensação (liberação de calor latente)
- Solidificação (liberação de calor latente)

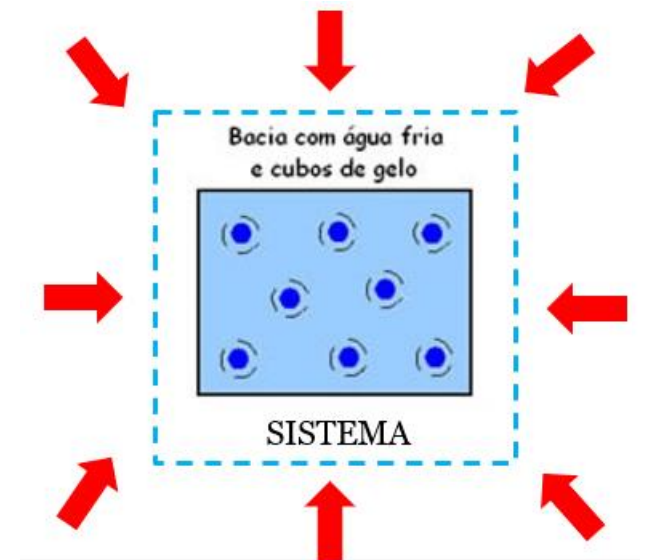




# Sumidouros de calor

Transferência de calor (energia térmica) da vizinhança para o sistema.

- Expansão de um gás (energia mecânica -> térmica)
- Evaporação (energia mecânica -> térmica)
- Ebulição (absorção de calor latente)
- Fusão (absorção de calor latente)

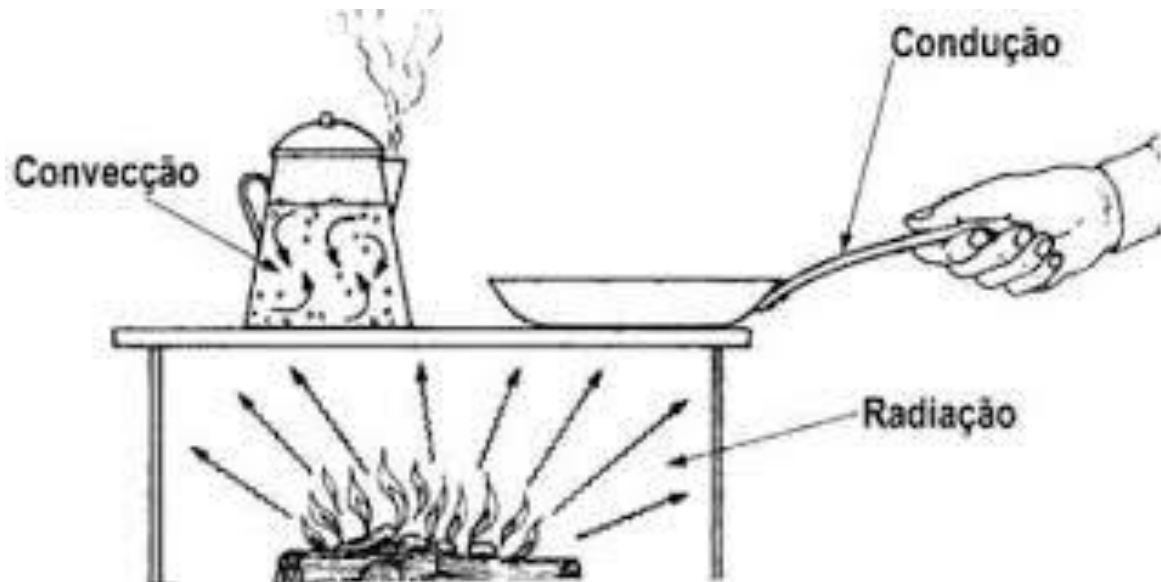


# Mecanismos de transferência de calor



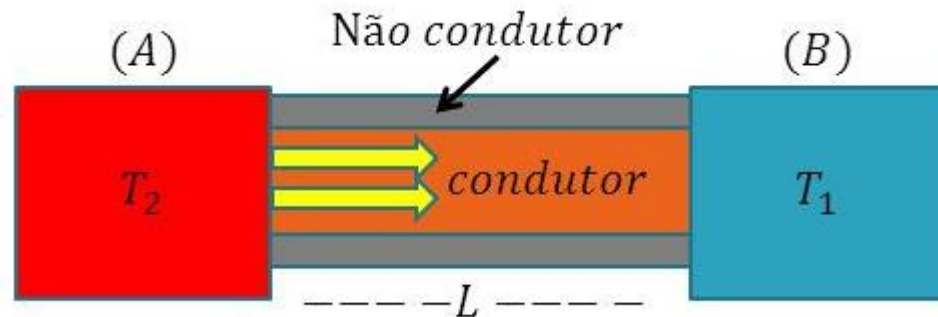
# Transferência de calor

- Transferência de energia térmica devida a uma diferença de temperatura
- Três mecanismos de transferência:
  - Condução
  - Convecção
  - Radiação



# Condução

- Energia é transferida através de interações entre partículas (átomos ou moléculas); não há transporte de massa.



- Gradiente de temperatura ao longo do condutor:  $\frac{dT}{dx}$

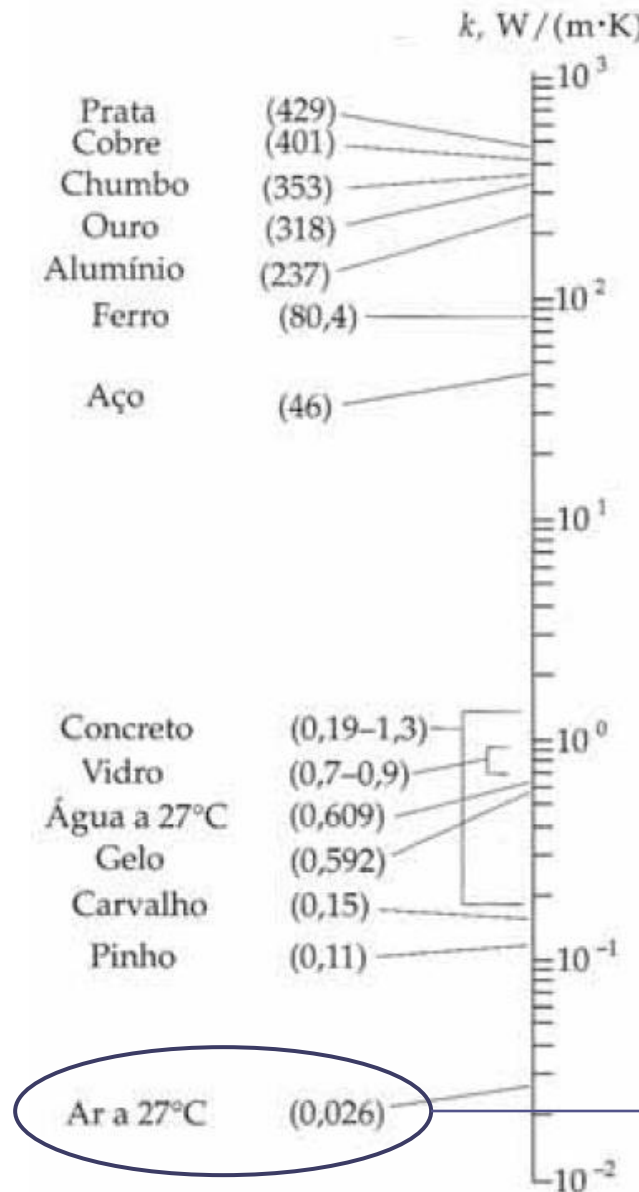
- Corrente térmica:  $I = \frac{dQ}{dt}$

$$I = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Conductividade  
térmica

Área da secção transversal  
do condutor

# Valores aproximados de condutividade térmica a 20°C e 1 atm



$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$



Ar a 27°C (0,026)

Bom isolante térmico

# Exemplo

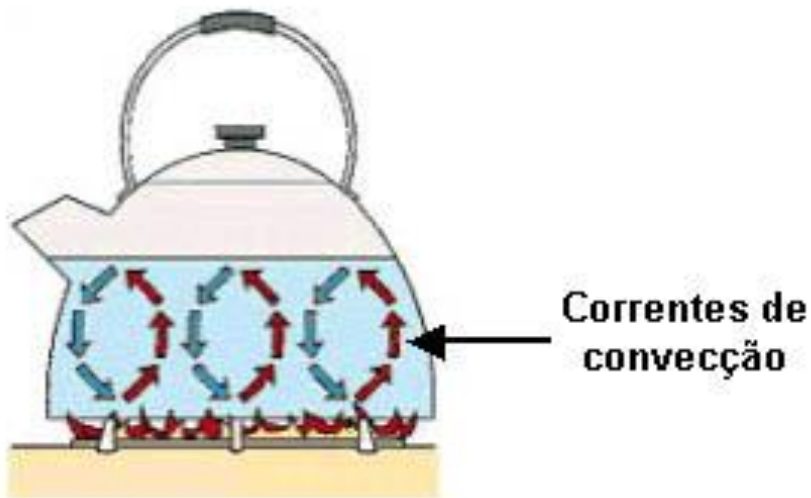
Suponha que você pise com um pé em um piso de alumínio, e com outro pé em um piso de madeira pinho. Seu corpo está a 37°C, e ambos os pisos estão a 15 °C. Suponha que a área de contato entre pé e piso seja de 100 cm<sup>2</sup>, e a pele sob o seu pé tem espessura de 1 mm. Aproxime os diferenciais da equação abaixo por deltas, e calcule **quantas calorias por segundo** são transferidas de cada pé para cada piso. Dados: condutividade térmica do alumínio 237 W/(m.K); condutividade térmica do pinho 0,11 W/(m.K).

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Resposta aproximada:  
-12000 cal/s (alumínio)  
-6 cal/s (pinho)

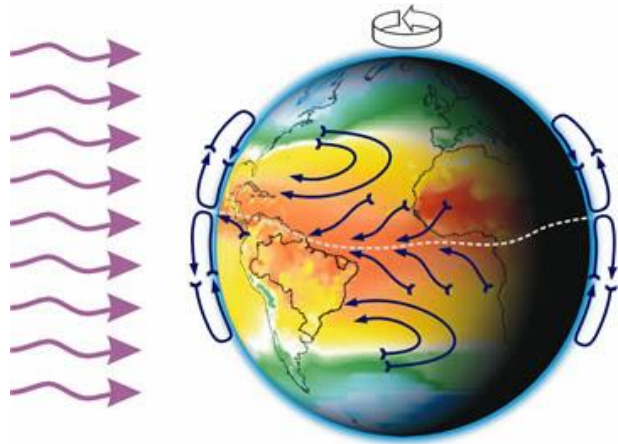
# Convecção

- O calor é transferido através do transporte de matéria, causado pela diferença de densidades do meio em função da temperatura (empuxo).
- Só ocorre em meios fluidos (gases e líquidos)
- A troca de calor depende da diferença de temperatura entre duas parcelas do fluido

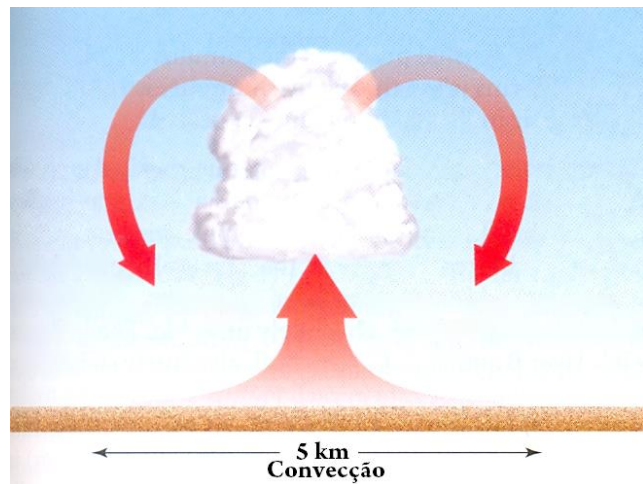


Uma parcela do fluido com temperatura maior do que a da sua vizinhança tende a subir, pois apresenta menor densidade (empuxo).

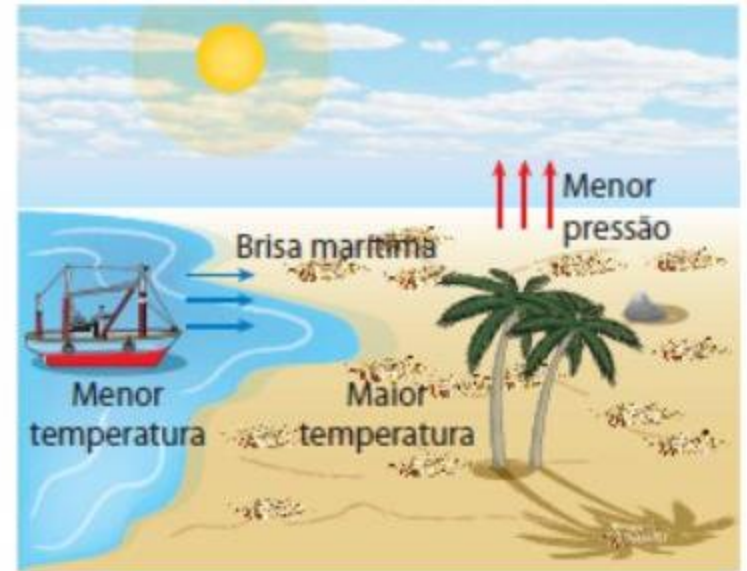
# Convecção - exemplos



Circulação atmosférica  
Célula de Hadley



Formação de nuvens convectivas



Maior temperatura  
(maior capacidade térmica)  
Menor temperatura  
(menor capacidade térmica)



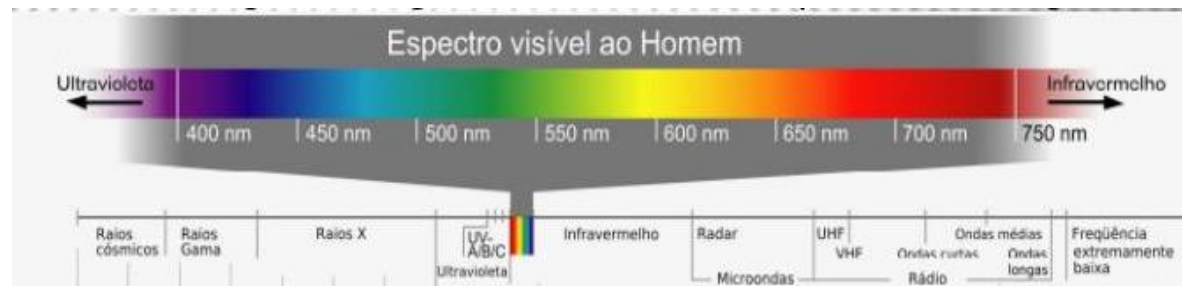
# Radiação

- Propagação de energia por emissão e absorção de ondas eletromagnéticas, produzidas pela vibração de moléculas



Todo corpo emite e absorve radiação eletromagnética. No equilíbrio térmico com a sua vizinhança, um corpo emite e absorve radiação na mesma taxa.

- Radiação térmica ou irradiação: radiação eletromagnética na faixa do infravermelho

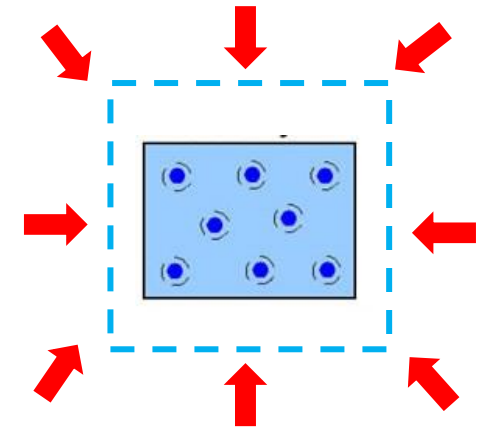
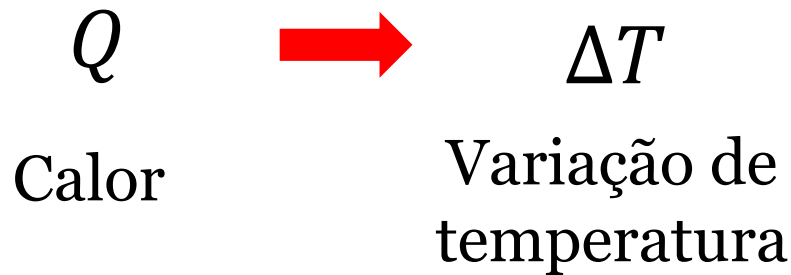


# Calorimetria



# O que acontece com uma substância que recebe calor sem mudar de fase?

- Sua temperatura aumenta



- Se  $Q > 0$  (sistema recebe calor),  $\Delta T > 0$
- Relação linear entre  $Q$  e  $\Delta T$ :

$$Q = C \Delta T$$

Capacidade térmica



# Calor específico

- Calor específico ( $c$ , J/kg.K no SI): capacidade térmica por unidade de massa

$$c = \frac{C}{m}$$

- Calor específico molar ( $c'$ , J/mol.K no SI): capacidade térmica por mol

$$c' = \frac{C}{n}$$

$$c' = \frac{C}{n} = \frac{mc}{n} = Mc$$

↓  
Massa molar

$$Q = mc\Delta T$$

Calor específico do gelo: 0,50 cal/g°C

Calor específico da água líquida: 1,00 cal/g°C.

Calor específico do vapor d'água: 0,48 cal/g°C.

Substância	$c$ , kJ/kg · K	$c'$ , J/mol · K
Água	4,18	75,2
Alcool (etílico)	2,4	111
Alumínio	0,900	24,3
Bismuto	0,123	25,7
Chumbo	0,128	26,4
Cobre	0,386	24,5
Gelo (−10°C)	2,05	36,9
Mercurio	0,140	28,3
Ouro	0,126	25,6
Prata	0,233	24,9
Tungstênio	0,134	24,8
Vapor (a 1 atm)	2,02	36,4
Vidro	0,840	—
Zinco	0,387	25,2

O calor específico da água líquida é relativamente grande



a água pode absorver ou liberar grandes quantidades de calor sofrendo variações muito pequenas de temperatura



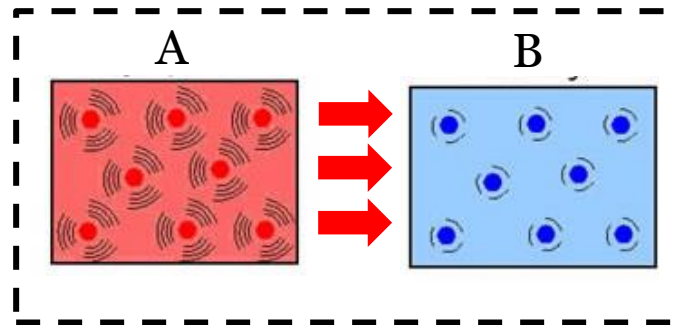
É um bom material para armazenar energia térmica

# Trocas de calor em um sistema isolado

- Sistema isolado: não há trocas com a vizinhança
- Conservação da energia do sistema:

$$Q_q + Q_f = 0$$

(ou seja, o calor que é fornecido por A é igual ao calor recebido por B se eles estiverem em um sistema isolado)



# Exemplo - calorimetria

Misturando 400 g de água a 70°C com 700 g de água a 10°C em um sistema isolado, qual será a temperatura de equilíbrio? Dado:  $c_{\text{água}} = 1,0 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$

$$Q_q + Q_f = 0$$

$$Q = mc\Delta T$$

$$\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}$$

$$\Delta T = T_{\text{eq}} - T_{\text{inicial}}$$

$$400 \cdot 1 \cdot (T_{\text{eq}} - 70) + 700 \cdot 1 \cdot (T_{\text{eq}} - 10) = 0$$

$$400 \cdot T_{\text{eq}} - 28000 + 700 \cdot T_{\text{eq}} - 7000 = 0$$

$$1100 \cdot T_{\text{eq}} = 35000$$

$$T_{\text{eq}} \cong 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

# Mudanças de fase



A temperatura em que ocorre uma mudança de fase é característica para cada substância pura.

(1 atm)

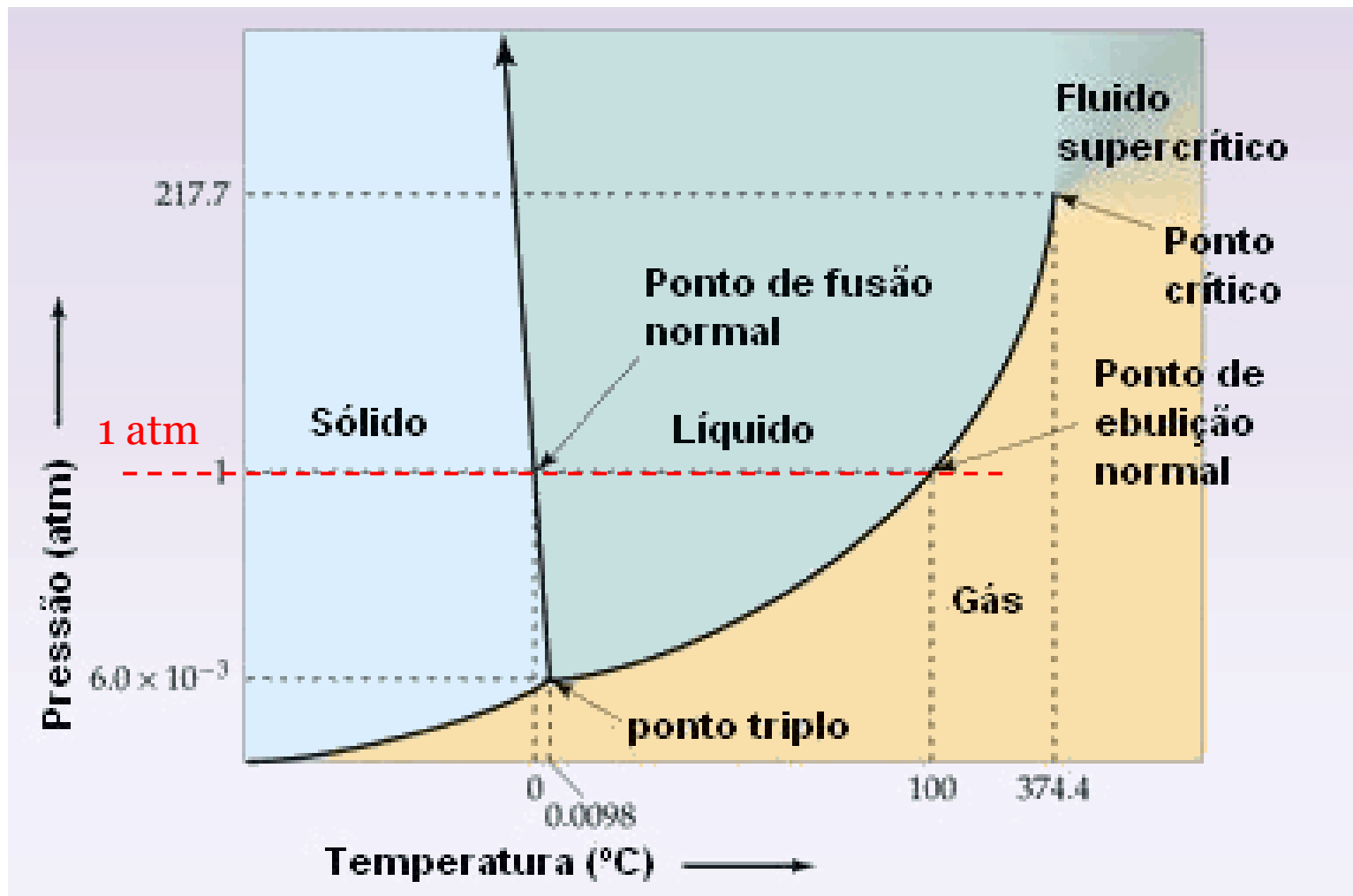
(1 atm)

<b>Substância</b>	<b>Ponto de fusão °C</b>	<b>Ponto de ebulição °C</b>
Metano	-183	-162
Mercúrio	-38,8	356,6
Álcool	-114	78
Água	0	100
Chumbo	327	1749
Ácido acético	16,6	118



# Diagrama de fases da água

- Pressão e Temperatura: variáveis de estado



# Calor Latente

- Energia necessária para que ocorra fusão:

$$Q_f = mL_f$$

Calor latente de fusão (J/kg no SI)

- Energia necessária para que ocorra vaporização ou ebulição:

$$Q_v = mL_v$$

Calor latente de vaporização (J/kg no SI)

# Calor latente de fusão e de vaporização

Energia necessária para que ocorra a mudança de fase

Tabela 18-4 Alguns Calores de Transformação

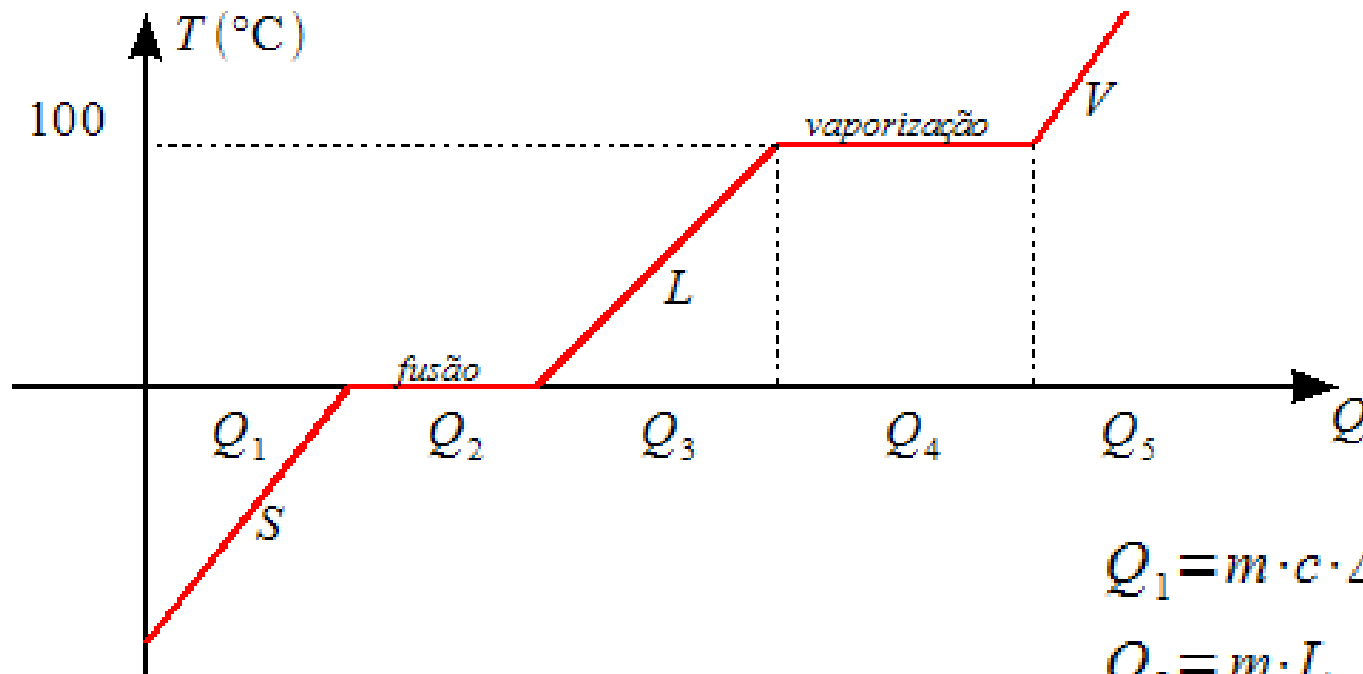
Substância	Fusão		Ebulição	
	Ponto de Fusão (K)	Calor de Fusão $L_f$ (kJ/kg)	Ponto de Ebulição (K)	Calor de Vaporização $L_v$ (kJ/kg)
Hidrogênio	14,0	58,0	20,3	455
Oxigênio	54,8	13,9	90,2	213
Mercúrio	234	11,4	630	296
Água	273	333	373	2256
Chumbo	601	23,2	2017	858
Prata	1235	105	2323	2336
Cobre	1356	207	2868	4730

(Halliday, Resnick, Walker, 2016)

Calor latente de fusão da água:  $333,5 \text{ kJ/kg} = 79,7 \text{ cal/g}$

Calor latente de vaporização da água:  $2,26 \text{ MJ/kg} = 540 \text{ cal/g}$

# Calor sensível X Calor latente



$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Sensível})$$

$$Q_2 = m \cdot L \quad (\text{Latente})$$

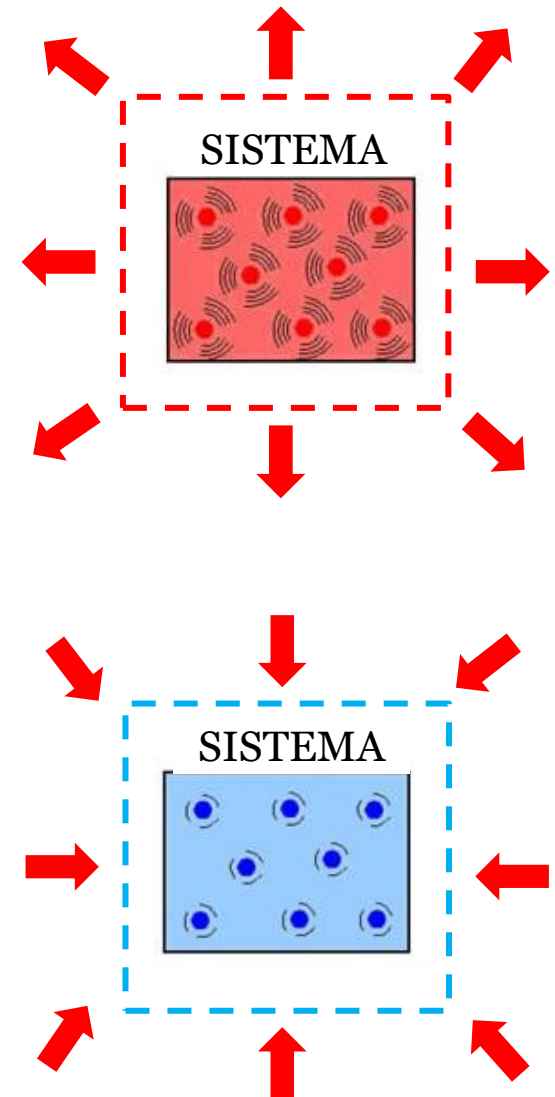
$$Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Sensível})$$

$$Q_4 = m \cdot L \quad (\text{Latente})$$

$$Q_5 = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Sensível})$$

# Mudanças de fase como fontes e sumidouros de calor

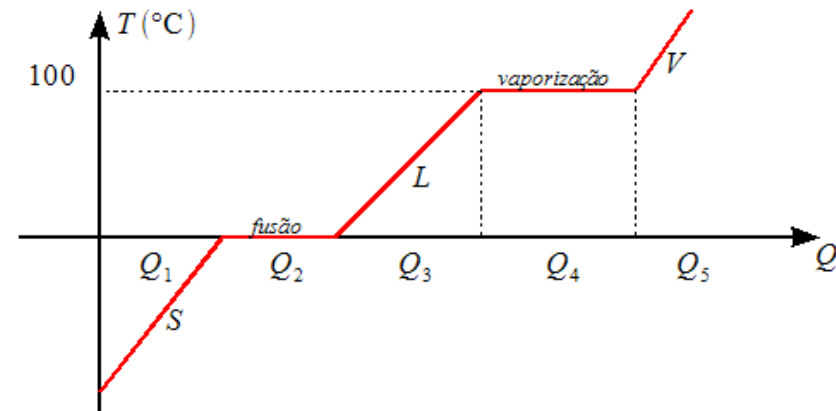
- Fontes (liberação de calor para a vizinhança):
  - Condensação
  - Solidificação
- Sumidouros (absorção de calor da vizinhança):
  - Ebulição ou vaporização
  - Fusão



# Exemplo

Quanto calor deve ser absorvido por 60 g de gelo a  $-10^{\circ}\text{C}$  para transformá-lo em 60 g de água líquida a  $40^{\circ}\text{C}$ ?

Dados: Calor latente de fusão da água:  $79,7 \text{ cal/g}$ . Calor específico da água:  $1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ . Calor específico do gelo:  $0,50 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$ .



Resposta:  $7482 \text{ cal}$

# Exemplo

Quanto calor deve ser liberado por 0,100 kg de vapor a 150°C para que se transforme em 0,100 kg de gelo a 0,0°C?

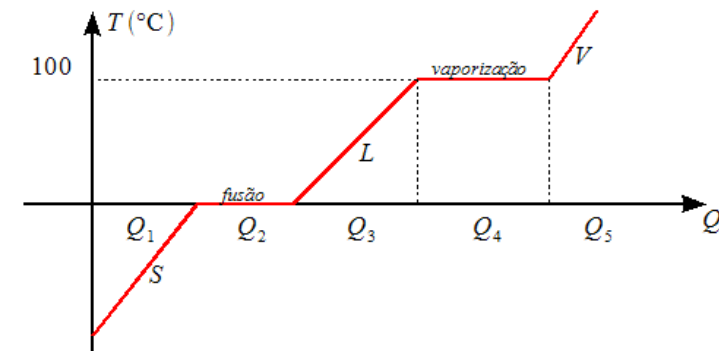
Dados: Calor latente de fusão da água: 79,7 cal/g.

Calor latente de vaporização da água: 540 cal/g.

Calor específico do vapor d'água: 0,48 cal/g°C.

Calor específico da água: 1 cal/g°C.

Calor específico do gelo: 0,50 cal/g°C.



$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Sensível})$$

$$Q_2 = m \cdot L \quad (\text{Latente})$$

Resposta:  
74370 cal

# Exemplo

Um pedaço de gelo de 200 g, a  $0^{\circ}\text{C}$ , é colocado em 500 g de água a  $20^{\circ}\text{C}$ . Este sistema está em um recipiente com capacidade térmica desprezível e isolado da vizinhança (ou seja, não há trocas de calor com o recipiente nem com a vizinhança).

a) quanto calor é necessário para derreter todo o gelo? **16000 cal**

b) quanto calor a água líquida pode fornecer? **10000 cal**

c) qual é a temperatura de equilíbrio?  **$T_{eq} = 0^{\circ}\text{C}$ .**

d) qual é a massa de gelo que derrete?  **$m = 125\text{ g}$**

Dados:  $c_{\text{água}} = 1,0\text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$   
 $L_{\text{fusão}} = 80\text{ cal/g}$