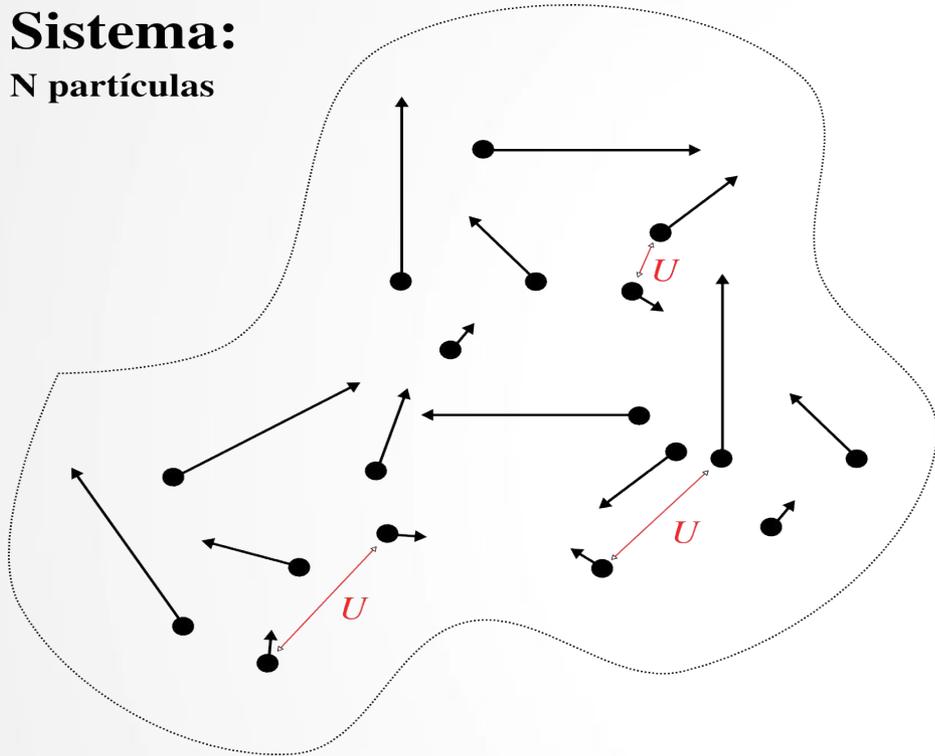


# ***Cap 17: 1ª Lei da Termodinâmica***

# Recordando: conservação da energia (Fis I)

**Sistema:**

N partículas



Para qualquer sistema de partículas, a energia cinética total  $K$  sofre uma variação igual ao trabalho de todas as forças que agem sobre as partículas

$$\Delta K = W_{cons} + W_{diss} + W_{ext}$$

# Recordando: conservação da energia (Fis I)

$$\Delta K = W_{cons} + W_{diss} + W_{ext}$$

Reescrevendo:

$$W_{cons} = -\Delta U$$

Ex: trabalho de forças eletrostáticas ou gravitacionais entre constituintes do sistema

$$W_{diss} = -\Delta E^{term}$$

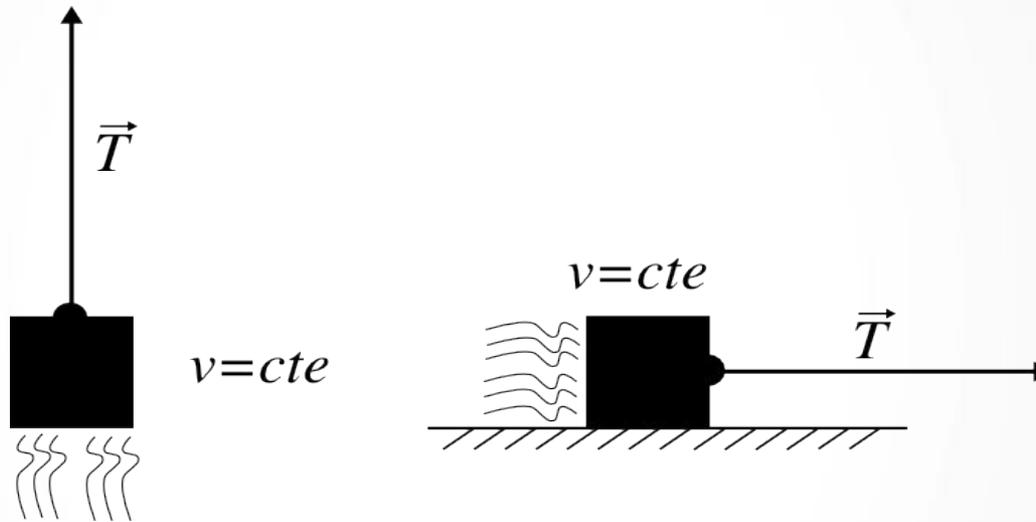
Ex: trabalho das forças de atrito dentro do sistema.  
Obs: atenção p/ sinal errado no livro!

$$\Delta E_{mec} + \Delta E_{micro} = W_{ext}$$

$\Delta K + \Delta U$  +  $\Delta E_{term}$

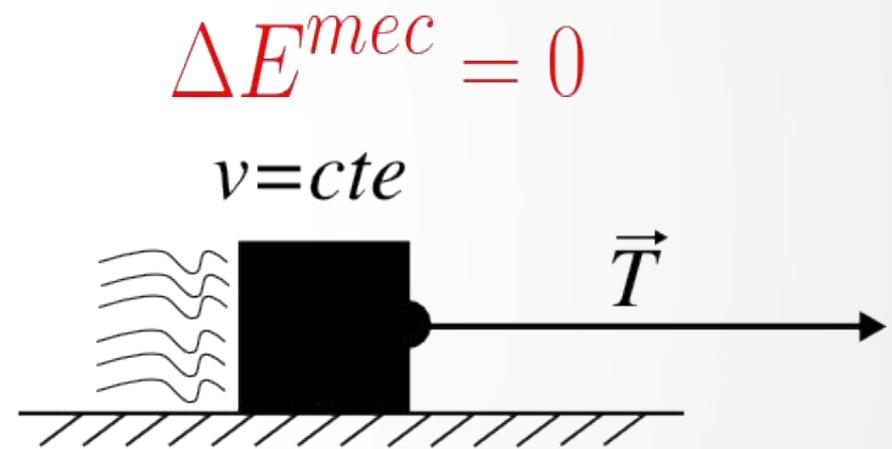
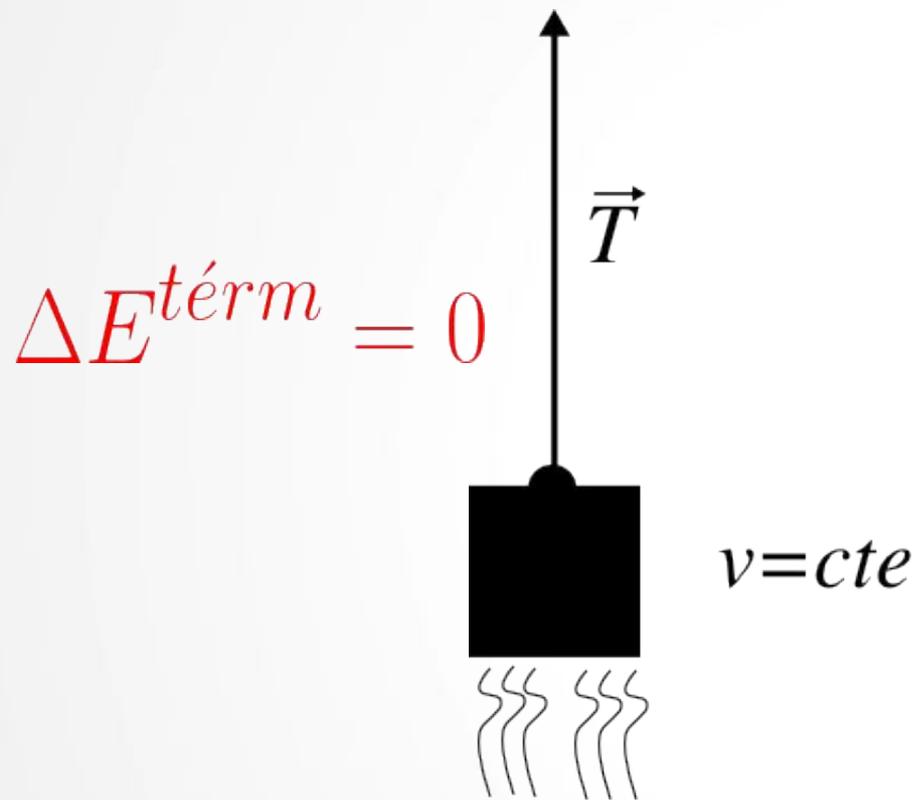
## Teste conceitual 0

Uma tração externa é aplicada a um bloco de duas formas diferentes: na vertical, ou na horizontal ao longo de uma mesa áspera. Em ambos os casos o bloco se move com velocidade constante. O que podemos dizer sobre  $\Delta E^{\text{mec}}$  e  $\Delta E^{\text{term}}$  em cada caso?



	Caso vertical	Caso horizontal
A)	$\Delta E^{\text{mec}} \neq 0, \Delta E^{\text{term}} = 0$	$\Delta E^{\text{mec}}$ e $\Delta E^{\text{term}}$ ambos $\neq 0$
B)	$\Delta E^{\text{mec}} \neq 0, \Delta E^{\text{term}} = 0$	$\Delta E^{\text{mec}} = 0, \Delta E^{\text{term}} \neq 0$
C)	$\Delta E^{\text{mec}}, \Delta E^{\text{term}}$ ambos $= 0$	$\Delta E^{\text{mec}} = 0, \Delta E^{\text{term}} \neq 0$
D)	$\Delta E^{\text{mec}}, \Delta E^{\text{term}}$ ambos $= 0$	$\Delta E^{\text{mec}}$ e $\Delta E^{\text{term}}$ ambos $\neq 0$

**Obs: O mesmo trabalho externo pode te levar a consequências bem diferentes**

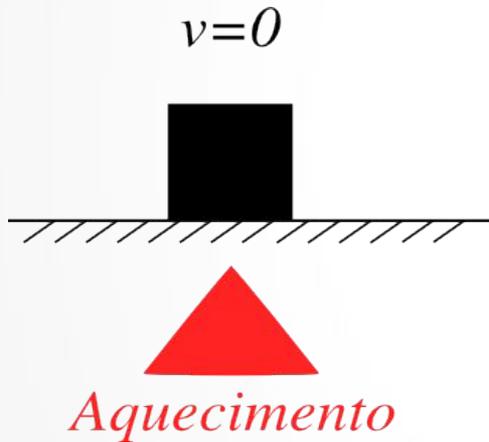


$$W_{ext} = W_T = \Delta E_{mec}$$

$$W_{ext} = W_T = \Delta E_{term}$$

# Problema com a formulação de Cons. Energia em Fis I

O trabalho externo não é a única forma de provocar uma variação na energia de um sistema. Podemos também **aquecê-lo**, pondo-o em contato térmico com outro corpo a uma  $T$  maior:



$$\Delta E_{mec} = W_{ext} = 0$$

$$\Delta E^{term} > 0$$

$$\cancel{\Delta K} + \cancel{\Delta U} + \Delta E_{term} = \cancel{W_{ext}} + ???$$

**Conclusão: a eq. de conserv. de energia que vimos em Fís I está **incompleta****

**podemos completá-la acrescentando mais um termo: **o calor****

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{term} = W_{ext} + Q$$

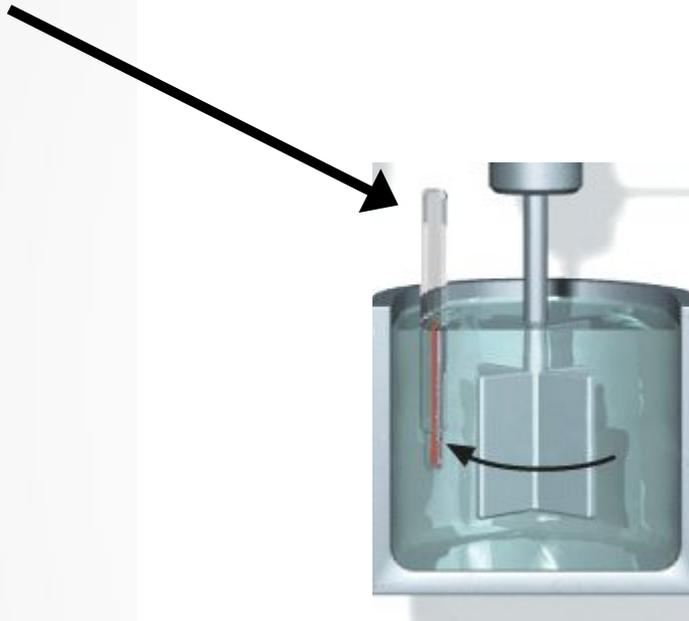
**Mas... o que exatamente é calor? Como medi-lo?**

Até meados do séc XIX, acreditava-se que o calor era uma substância.

Cada corpo conteria uma “reserva de calor”, que poderia ser passada de um corpo para o outro pelo atrito.... porém isto se revelou incorreto

## Experiência de Joule (~1840)

Termômetro

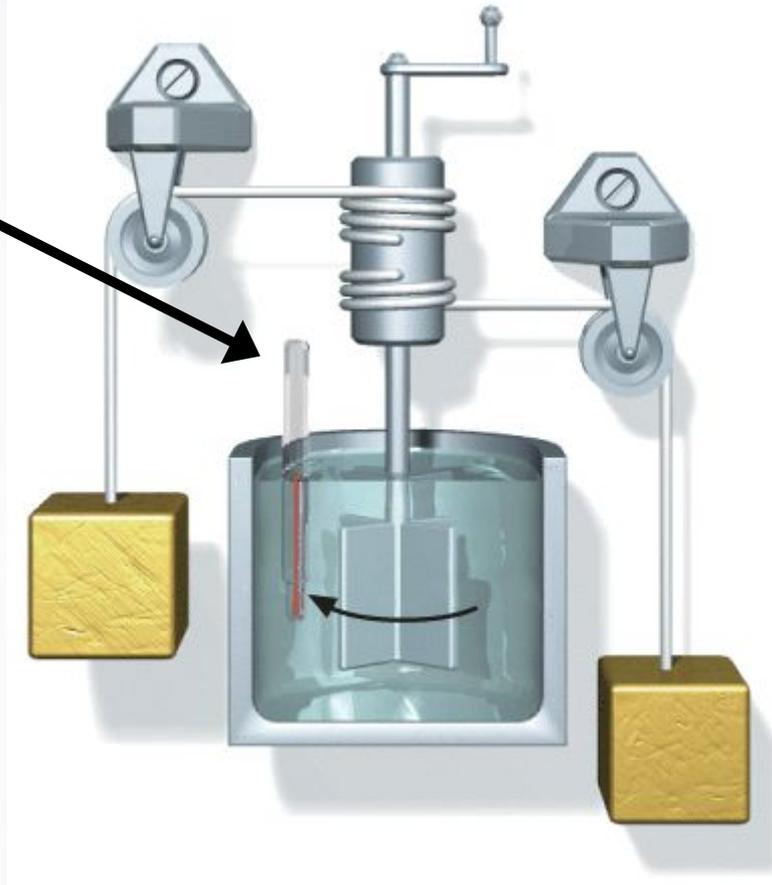


Sabemos que é possível aumentar a temperatura de um corpo (p. exemplo, água), colocando-a em contato com um corpo quente ( $T$  alta), ex: chama

Def: **1 caloria** é a qtde de calor capaz de aumentar a  $T$  de 1g de água em  $1^{\circ}\text{C}$

## Experiência de Joule (~1840)

Termômetro



- Ideia: fazer o mesmo porém de forma puramente mecânica (sem calor)
- os pesos caem, realizando uma qtd conhecida de trabalho  $W$  sobre a pá
- pá gira dentro da água até parar
- T da água aumenta!  
Especificamente, são necessários **4,186 J** de trabalho p/ aumentar a T de 1g de água em 1°C

**Conclusão:** trabalho e calor são duas maneiras equivalentes de aumentar a energia térmica  $E_{term}$  de um sistema. Especificamente, **1 caloria de calor equivale a 4,186 J de energia**

**Conclusão: a eq. de conserv. de energia que vimos em Fís I está **incompleta****

**podemos completá-la acrescentando mais um termo: **o calor****

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{term} = W_{ext} + Q$$

**Calor: energia transferida entre um sistema e seu ambiente como consequência de uma diferença de temperaturas entre eles**

**Atenção!**

**Q e W não são Variáveis de Estado do sistema !**

# 1ª Lei da Termodinâmica

Obs: na maioria dos casos neste curso, discutiremos situações em que o sistema como um todo está em repouso, e podemos tomar  $E_{mec} = 0$ .

*Neste caso:*

$$\Delta E^{sist} = \Delta E^{term} = W + Q$$

*Eq. da 1ª Lei da Termodinâmica*

# Teste Conceitual 1

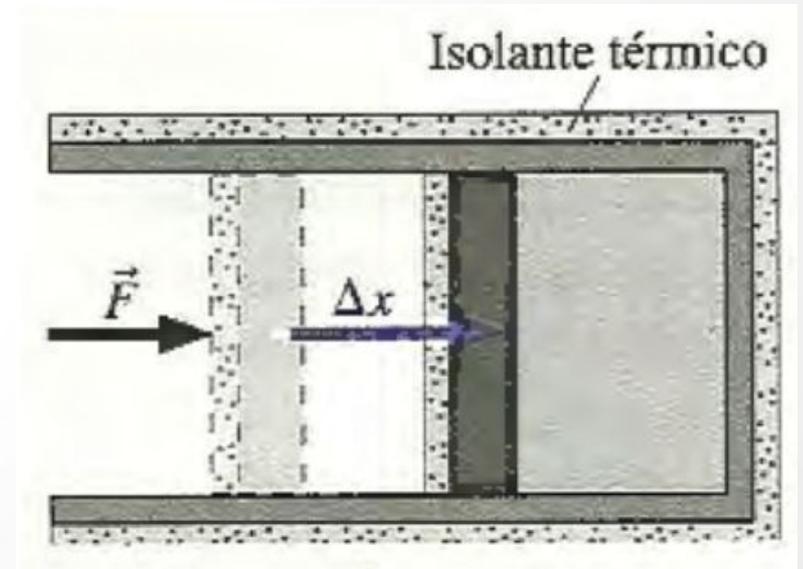
Quais dos seguintes processos não envolvem calor?

- (A) Você possui uma garrafa térmica que permite ler a temperatura interna, e que mantém líquidos gelados durante muito tempo. Você coloca água gelada no seu interior, depois sacode a garrafa vigorosamente durante alguns minutos. Ao final, você percebe que a temperatura da água aumentou um pouco.
- (B) Você coloca um cilindro metálico com gás dentro de água quente. O gás se expande empurrando o pistão para cima de forma a levantar um peso. A temperatura do gás não sofre variação.
- (C) um bloco de aço é mantido sobre a chama de uma vela.
- (D) Duas das alternativas acima não envolvem calor.

## Teste Conceitual 2

Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico (não permite a passagem de calor). O pistão é empurrado para dentro do cilindro, comprimindo o gás. Neste processo, a temperatura do gás

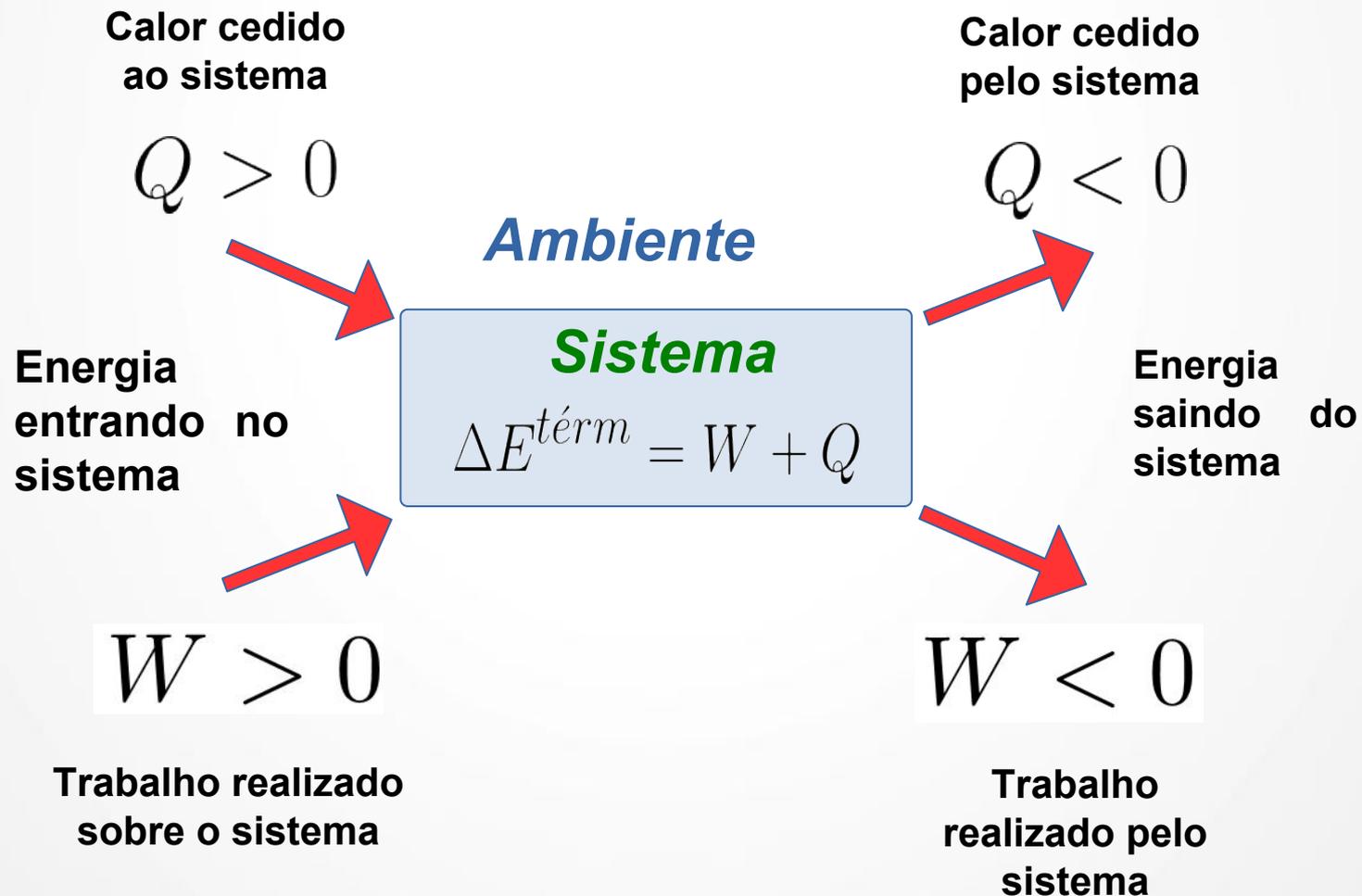
- A) Aumenta
- B) Diminui
- C) Não se altera
- D) Não há informações suficientes para saber



# Importante: Convenção de sinal

$Q$  ou  $W > 0 \rightarrow$  Energia é transferida do ambiente p/ o sistema.

$Q$  ou  $W < 0 \rightarrow$  Energia é transferida do sistema p/ o ambiente.



## Teste Conceitual 3

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{tér}} e \Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

Caso 1: Um bloco de aço repousa sobre uma chama durante alguns segundos

$W$

$Q$

$\Delta E_{\text{mec}}$

$\Delta E_{\text{tér}}$  e  $\Delta T$

## Teste Conceitual 3

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{tér}} e \Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

Caso 1: Um bloco de aço repousa sobre uma chama durante alguns segundos

$$W = 0$$

$$Q > 0$$

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

$$\Delta E_{\text{tér}} e \Delta T > 0$$

## Teste Conceitual 4

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{tér}}m$  e  $\Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

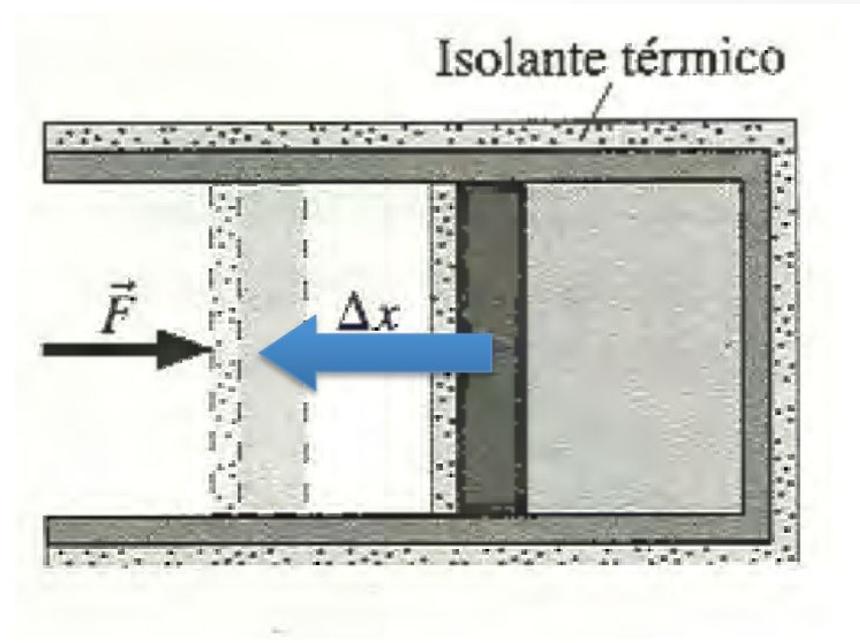
Caso 2: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico. O pistão vai sendo relaxado pouco a pouco, deixando o gás se expandir.

$W$

$Q$

$\Delta E_{\text{mec}}$

$\Delta E_{\text{tér}}m$  e  $\Delta T$



## Teste Conceitual 4

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{term}}$  e  $\Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

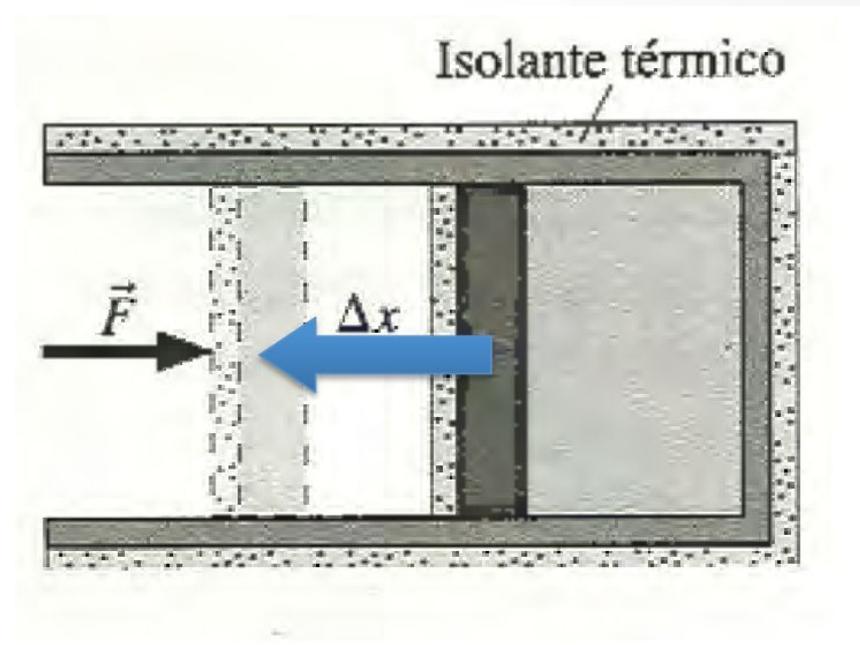
Caso 2: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico. O pistão vai sendo relaxado pouco a pouco, deixando o gás se expandir.

$$W < 0$$

$$Q = 0$$

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

$$\Delta E_{\text{term}} \text{ e } \Delta T < 0$$



## Teste Conceitual 5

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{tér}}m$  e  $\Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

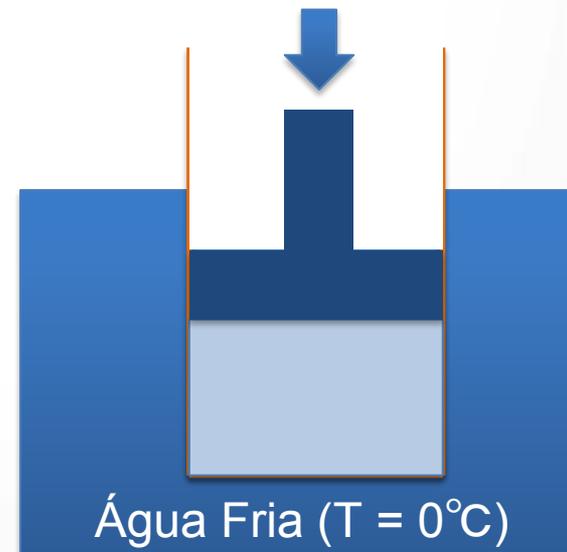
Caso 3: Um cilindro de gás feito de cobre é colocado em bom contato térmico com um grande tanque de água misturada com gelo, e deixado lá até o gás entrar em equilíbrio térmico a zero graus Celsius. Então um pistão é comprimido lentamente sobre o gás, mas de modo que a temperatura deste se mantém sempre constante durante todo o processo.

$\Delta E_{\text{tér}}m$  e  $\Delta T$

$\Delta E_{\text{mec}}$

$W$

$Q$



## Teste Conceitual 5

Considere a seguinte situação, e pense se  $W$ ,  $Q$ ,  $\Delta E_{\text{mec}}$ ,  $\Delta E_{\text{tér}} e \Delta T$  são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

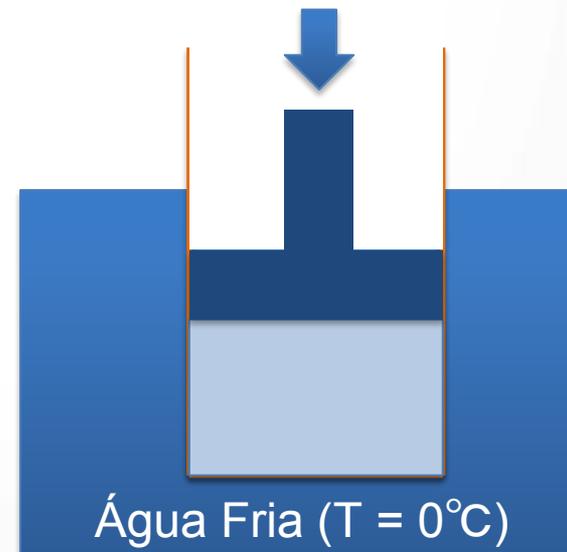
Caso 3: Um cilindro de gás feito de cobre é colocado em bom contato térmico com um grande tanque de água misturada com gelo, e deixado lá até o gás entrar em equilíbrio térmico a zero graus Celsius. Então um pistão é comprimido lentamente sobre o gás, mas de modo que a temperatura deste se mantém sempre constante durante todo o processo.

$$\Delta E_{\text{tér}} e \Delta T = 0$$

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

$$W > 0$$

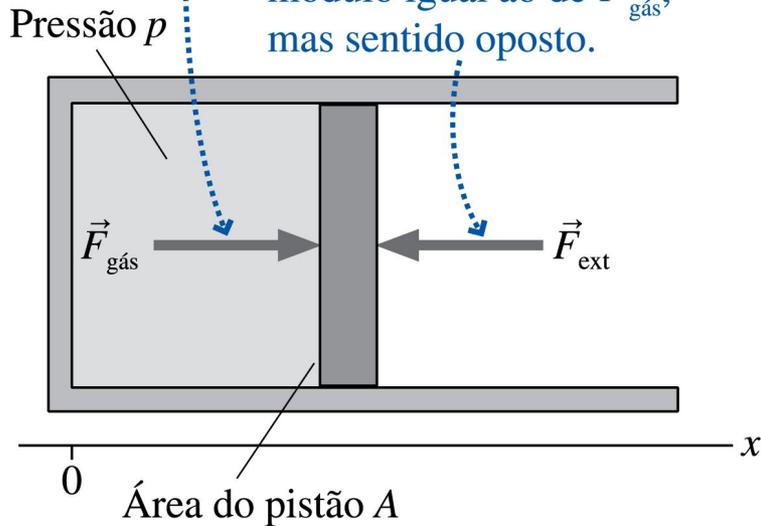
$$Q < 0$$



# Trabalho em processos quase-estáticos num gás ideal

(a) O gás empurra o pistão com a força  $\vec{F}_{\text{gás}}$ .

Para manter o pistão no lugar, uma força externa deve ter módulo igual ao de  $\vec{F}_{\text{gás}}$ , mas sentido oposto.



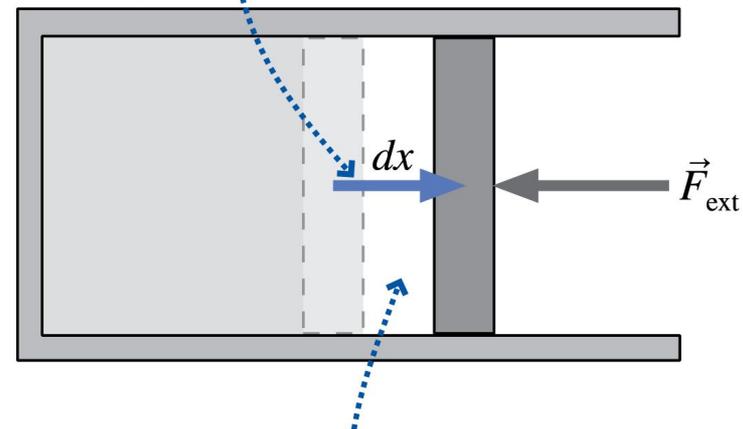
$$\rightarrow F_{\text{ext}} = P A$$

Trabalho das forças externas durante uma expansão (obs: válido tb p/ compressão):

$$W = - \int_i^f P(V) dV$$

(b)

À medida que o pistão efetua o deslocamento  $dx$ , a força externa realiza um trabalho  $(F_{\text{ext}}) dx$  sobre o gás.



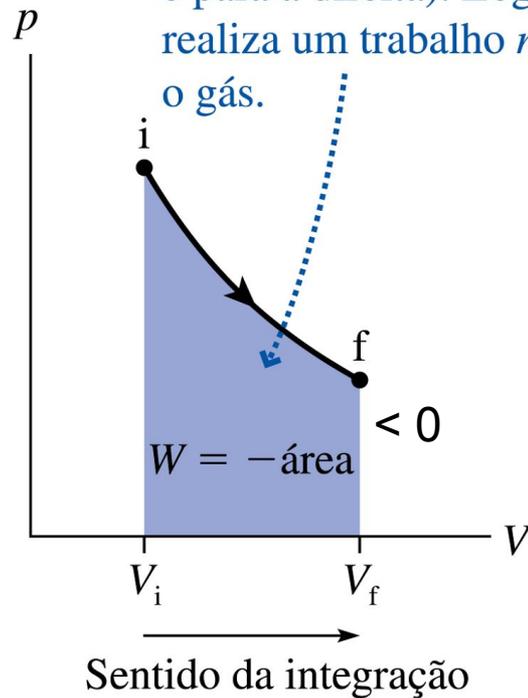
O volume varia em  $dV = A dx$  durante o deslocamento  $dx$  do pistão.

$$\text{Expansão: } dW_{\text{ext}} = - F_{\text{ext}} dx = - P A dx$$

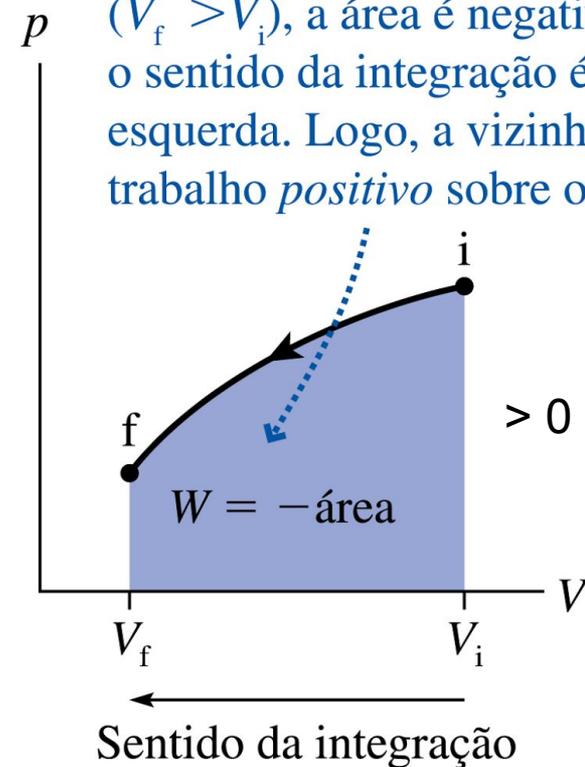
$$= - P dV$$

# Trabalho em processos quase-estáticos num gás ideal

(a) Para um gás que sofre *expansão* ( $V_f > V_i$ ), a área sob a curva  $pV$  é positiva (o sentido da integração é para a direita). Logo, a vizinhança realiza um trabalho *negativo* sobre o gás.



(b) Para um gás que sofre *compressão* ( $V_f < V_i$ ), a área é negativa porque o sentido da integração é para a esquerda. Logo, a vizinhança realiza trabalho *positivo* sobre o gás.



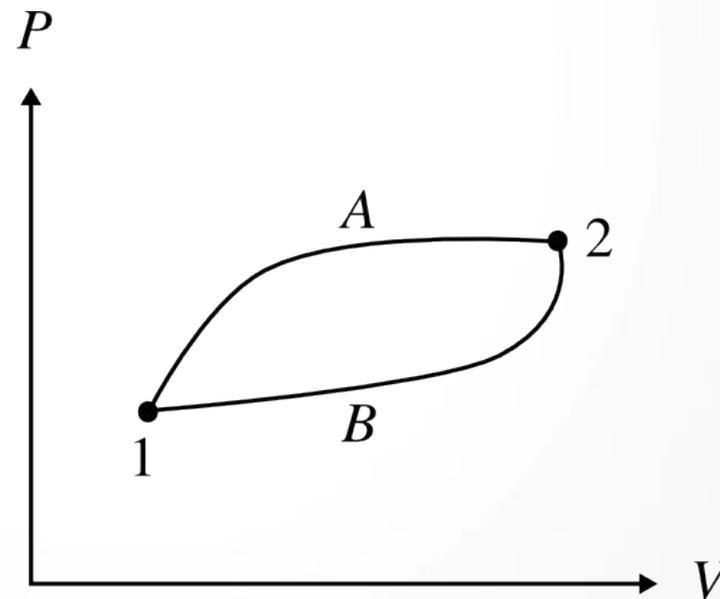
Trabalho das forças externas durante uma expansão (obs: válido tb p/ compressão):

$$W = - \int_i^f P(V) dV$$

## Teste Conceitual 6

Dois processos A e B podem levar o gás do estado 1 para o estado 2. Compare os trabalhos nos dois processos

- (A)  $W_A > W_B > 0$
- (B)  $W_B > W_A > 0$
- (C)  $0 > W_A > W_B$
- (D)  $0 > W_B > W_A$

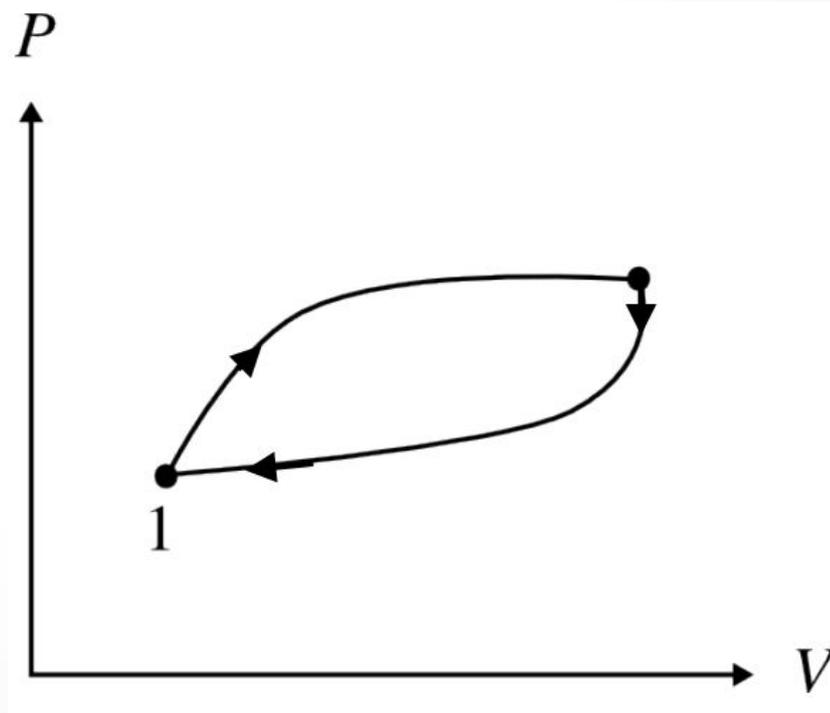


## Teste Conceitual 7

Um processo começa com o gás no estado 1 e percorre a trajetória indicada na figura, terminando de volta no mesmo estado inicial (um **ciclo**).

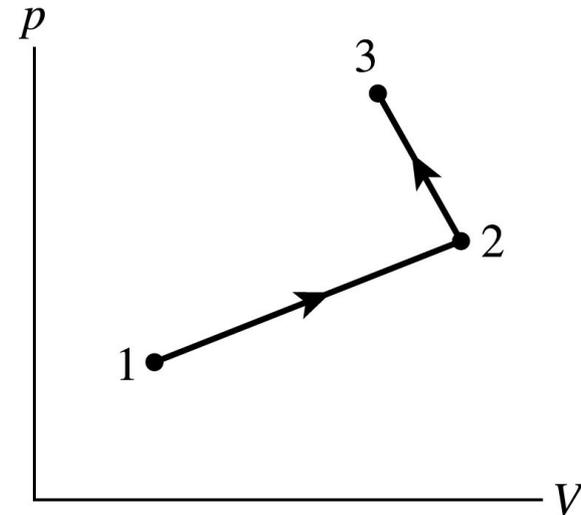
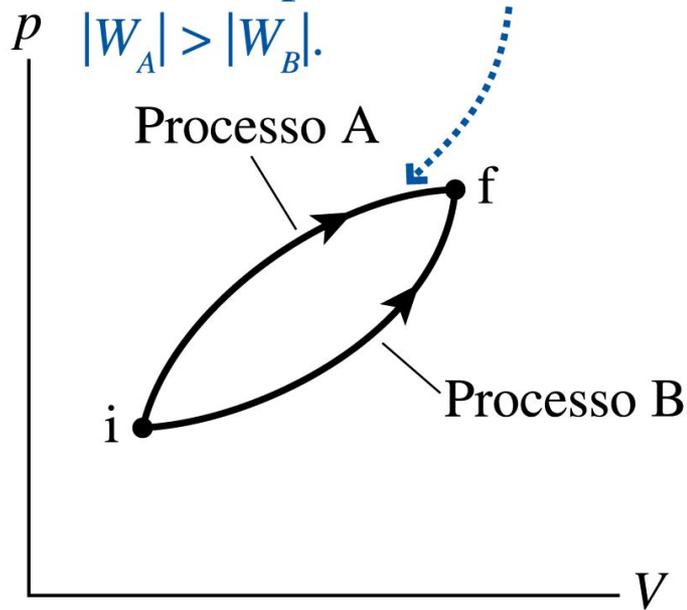
Considerando o ciclo inteiro, podemos dizer que o trabalho externo sobre o gás foi

- (A)  $W > 0$
- (B)  $W = 0$
- (C)  $W < 0$



# O Trabalho depende do caminho a ser seguido!!!

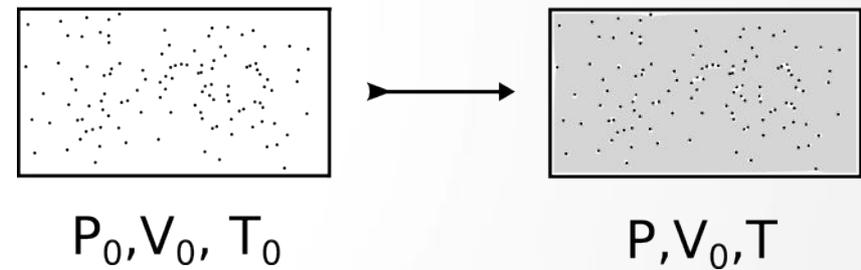
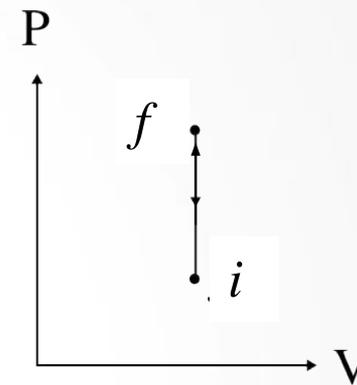
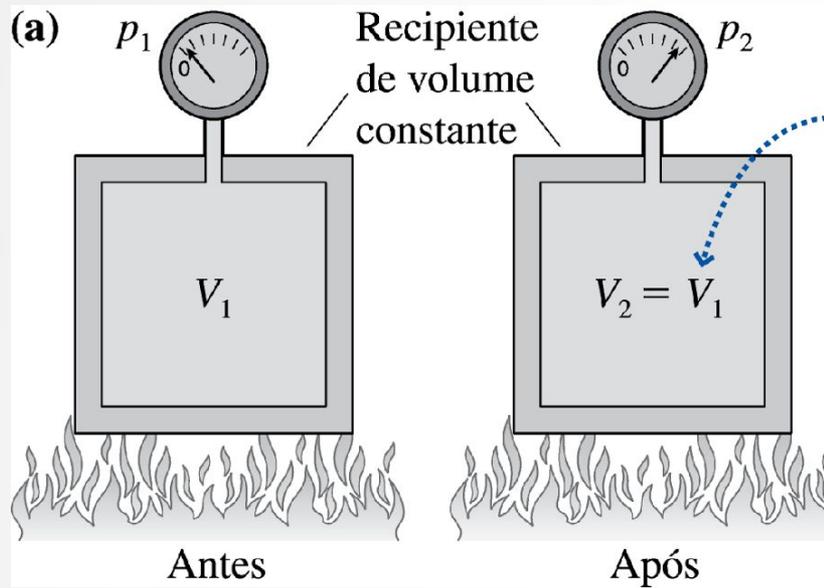
A área sob a curva do processo A é maior do que a área sob a curva do processo B. Portanto,  $|W_A| > |W_B|$ .



$$W_{1-3} = W_{1-2} + W_{2-3}$$

# Processo Isocórico ou Isovolumétrico

$V = \text{constante}$



$$W_{\text{isocórico}} = 0$$

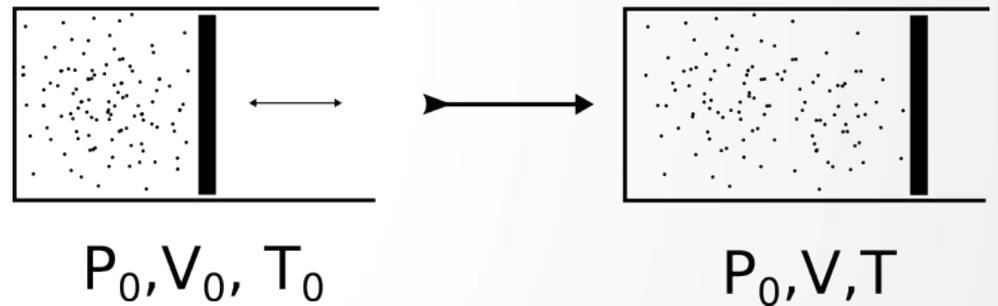
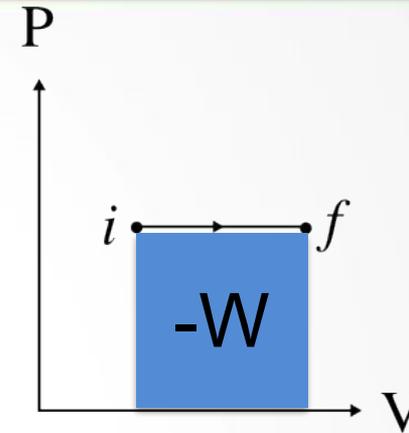
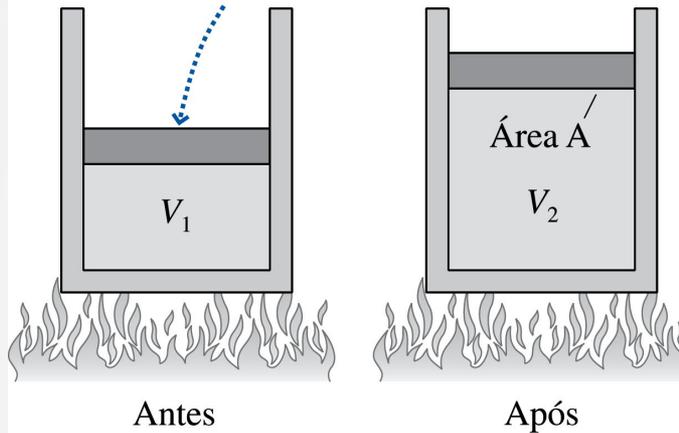
## Teste conceitual 8

Quando  $P_f - P_i > 0$  num processo isocórico, qual o sinal de  $Q$ ?

- A)  $Q > 0$
- B)  $Q < 0$
- C)  $Q=0$
- D) Depende

# Processo Isobárico $P = \text{constante}$

(a) A massa do pistão mantém uma pressão constante no cilindro.



$$W_{\text{isobárico}} = -P(V_f - V_i)$$

## Teste Conceitual 9

Num processo isobárico, quando  $V_f - V_i > 0$ , qual o sinal de  $Q$ ?

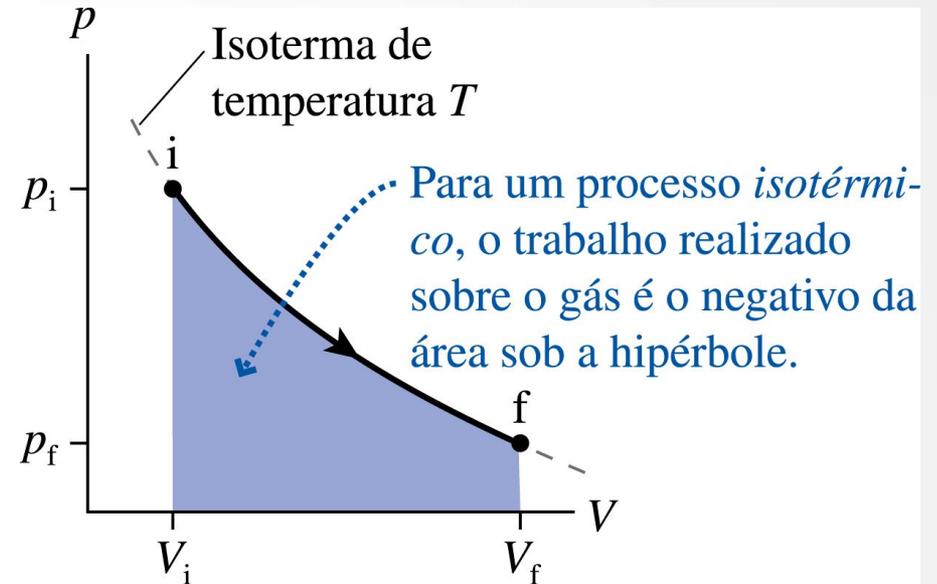
- A)  $Q > 0$
- B)  $Q < 0$
- C)  $Q = 0$
- D) Depende

# Processo Isotérmico

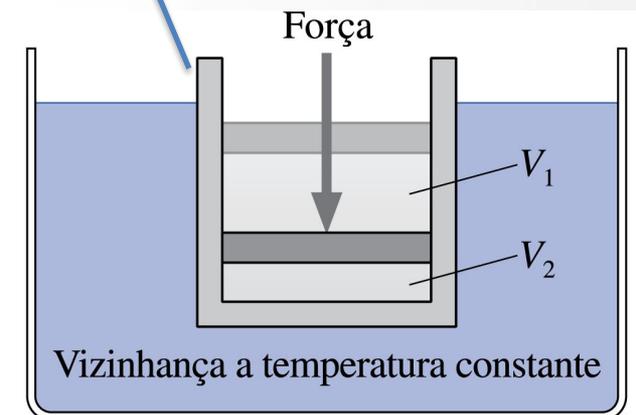
$$T = T_0 = \text{constante} \rightarrow P(V) = \frac{\text{const}}{V}$$

$$W = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V}$$

$$= -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$



parede boa condutora térmica



## Exercício

**2,0 moles de gás ideal, inicialmente a 30° C e a 1,5 atm, sofrem um processo no qual seu volume reduzido é a 1/3 do inicial.**

**Determine:**

- (a)  $W^{\text{isotérmico}}$**
- (b)  $W^{\text{isobárico}}$**

**e faça o gráfico representando cada um dos dois processos.**

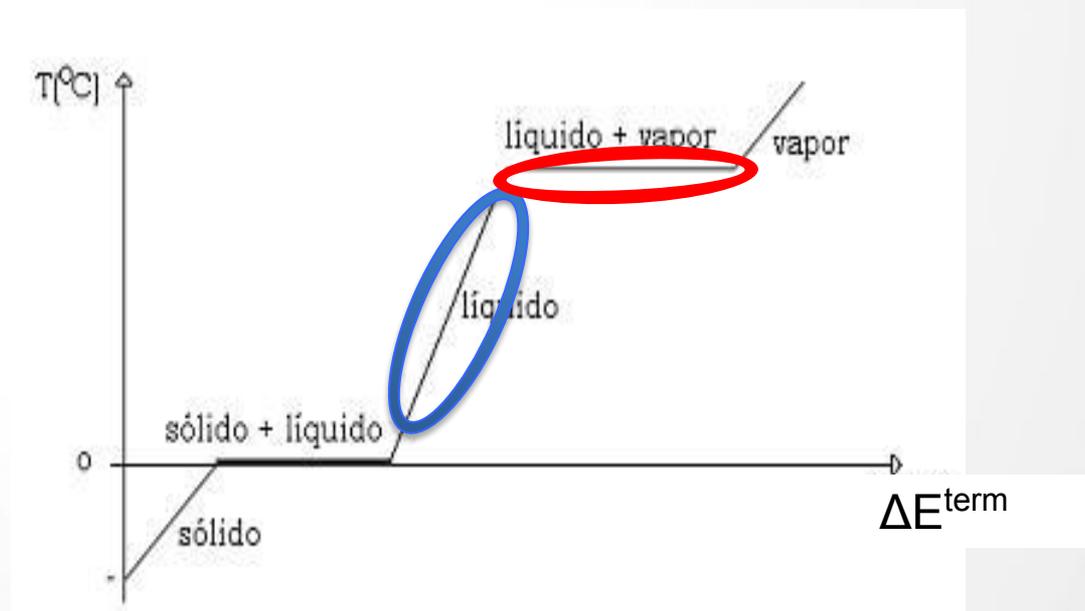
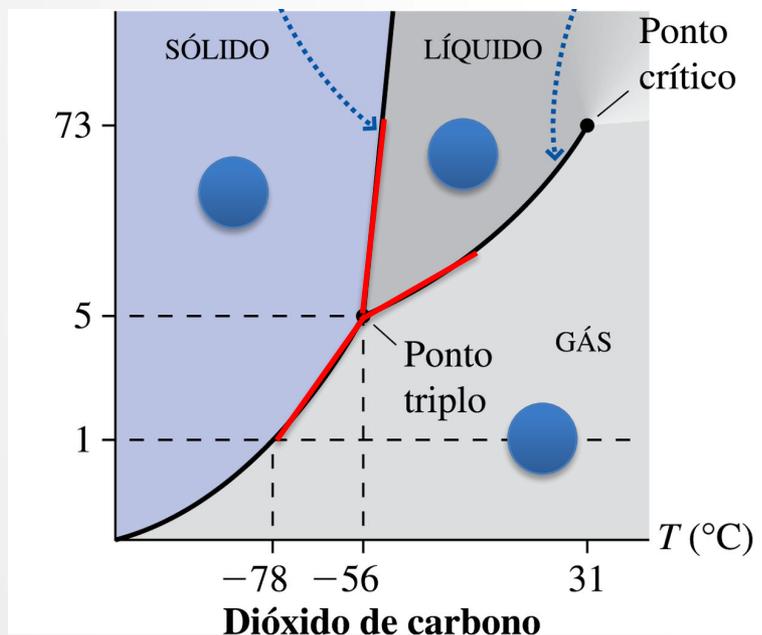
# Propriedades Térmicas da Matéria

P: Quais são os efeitos de uma variação da  $E^{\text{term}}$ ?

$\Delta E^{\text{term}}$

*em condições normais  $\rightarrow \Delta T$*

*nas linhas separatrizes do diagrama de fases  $\rightarrow$  Mudança de fase a  $T$  const.*



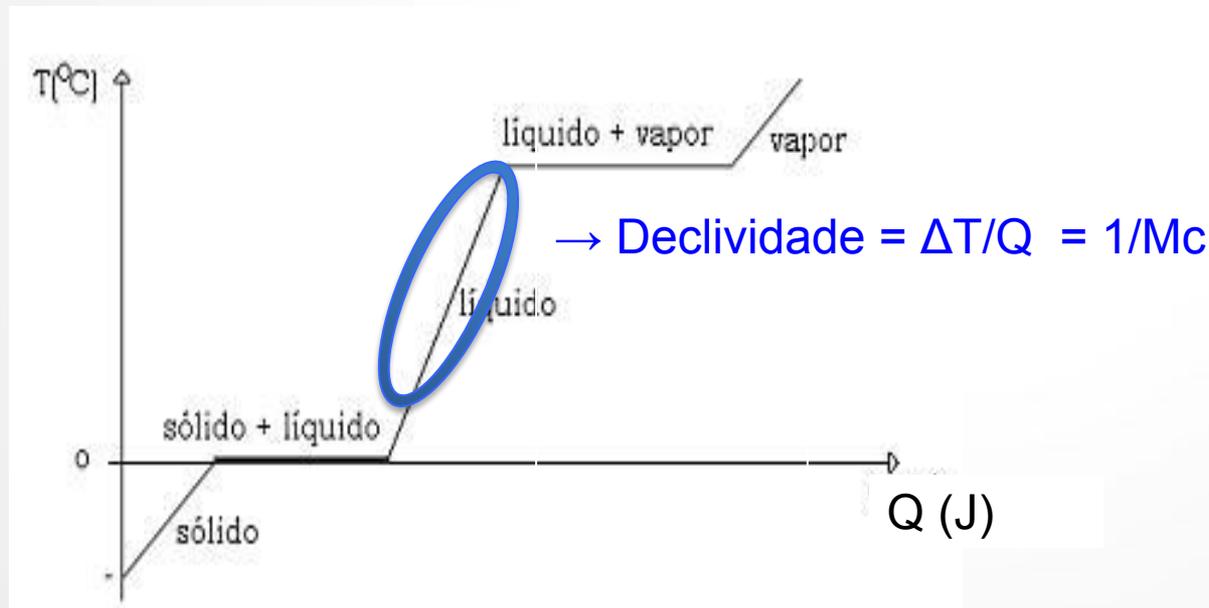
# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 1: longe das transições de fase

Empiricamente: esquentando uma substância verificamos

$$Q = Mc\Delta T$$

onde: **c** = **Calor Específico** (unid: J / kg K) = Qtde de calor absorvido que produz  $\Delta T=1K$  (ou  $1^\circ C$ ) em 1,0 kg da substância.



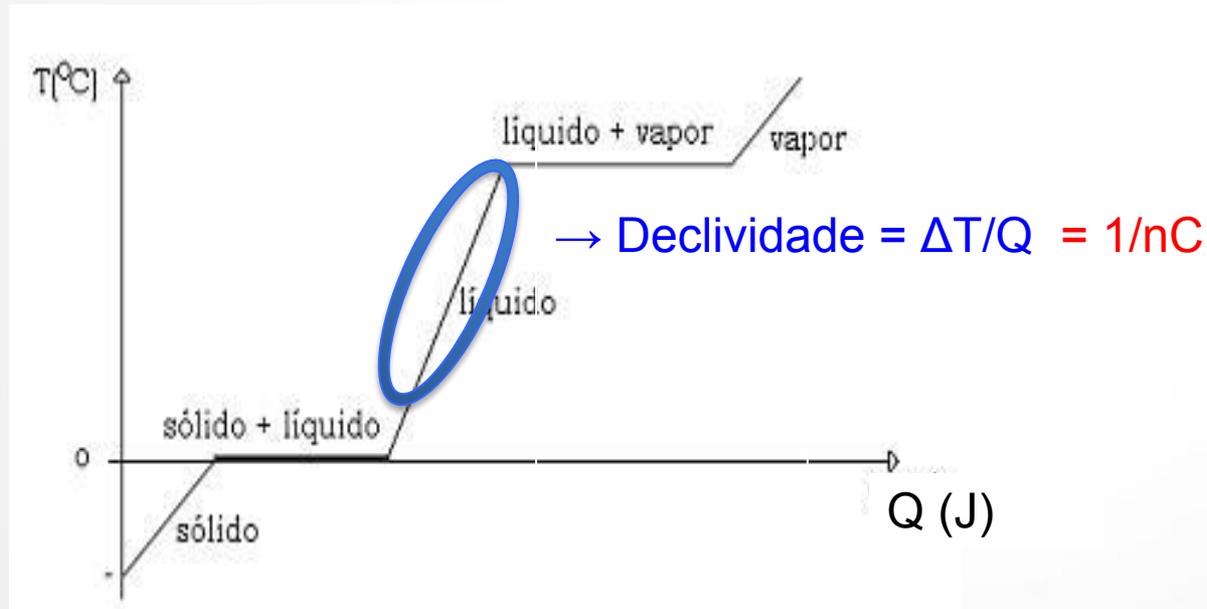
# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 1: longe das transições de fase

Empiricamente: esquentando uma substância verificamos

$$Q = Mc\Delta T = nC\Delta T$$

onde: **C** = **Calor Específico molar** (unid: J / mol K) = Qtde de calor absorvido que produz  $\Delta T=1\text{K}$  (ou  $1^\circ\text{C}$ ) em 1,0 **mol** da substância.



Para **sólidos e líquidos**, valores tabelados assumem um ambiente a pressão cte, e tb que estamos apenas aplicando  $Q$  (ie que não estamos tb realizando  $W$  dissipativo a la Joule). Nesse caso vale tb

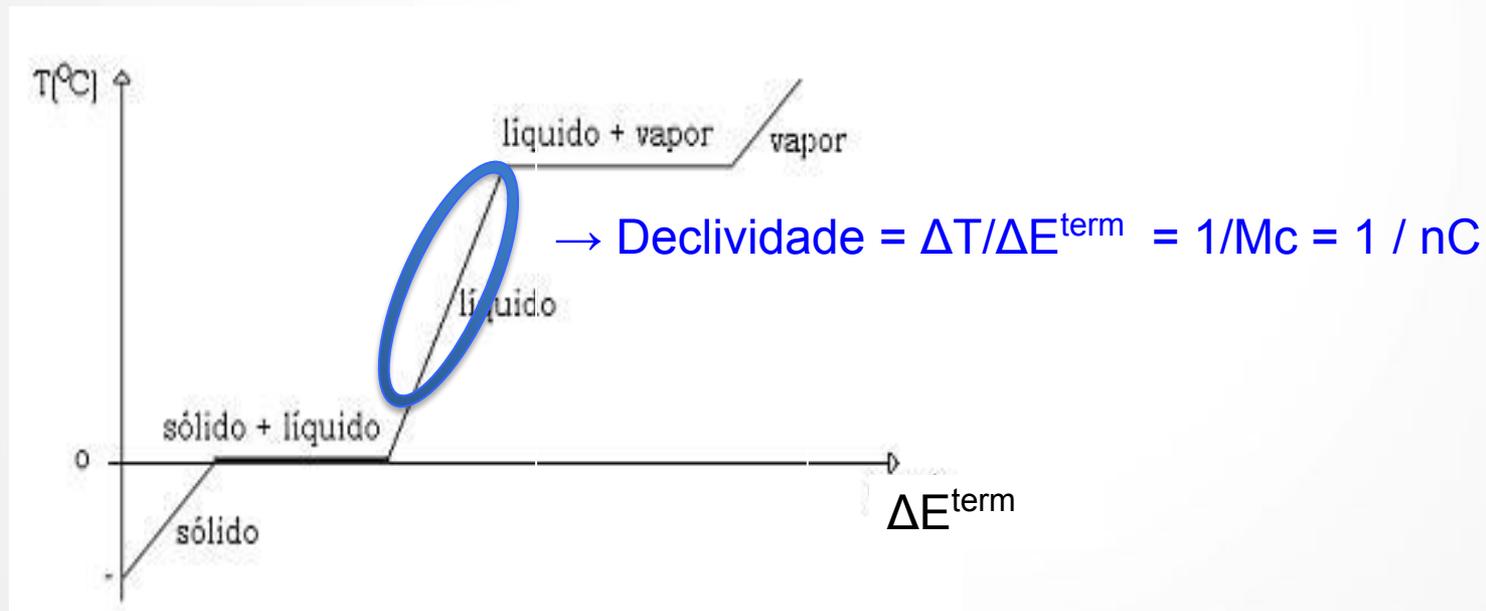
$$\Delta E^{\text{term}} = Mc\Delta T = nC\Delta T$$

# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 1: condições normais

Empiricamente:  $\Delta E^{term} = Mc\Delta T = nC\Delta T$

onde: **C** = **Calor Específico Molar** (unid: J / mol K)  
= Qtde de energia absorvida que produz  $\Delta T=1K$  (ou  $1^\circ C$ )  
em 1,0 **mol** de uma substância.



Obs: em situações onde  $W_{ext}$  é desprezível, escrevemos apenas  $Q = nC\Delta T$

# Propriedades Térmicas da Matéria

Substância	$c$ (J/kg K)	$C$ (J/mol K)
<b>Sólidos</b>		
Alumínio	900	24,3
Cobre	385	24,4
Ferro	449	25,1
Ouro	129	25,4
Chumbo	128	26,5
Gelo	2090	37,6
<b>Líquidos</b>		
Álcool etílico	2400	110,4
Mercúrio	140	28,1
Água	4190	75,4

notem a  
semelhança!  
Veremos o  
motivo no  
 próx. capítulo

muito grande!

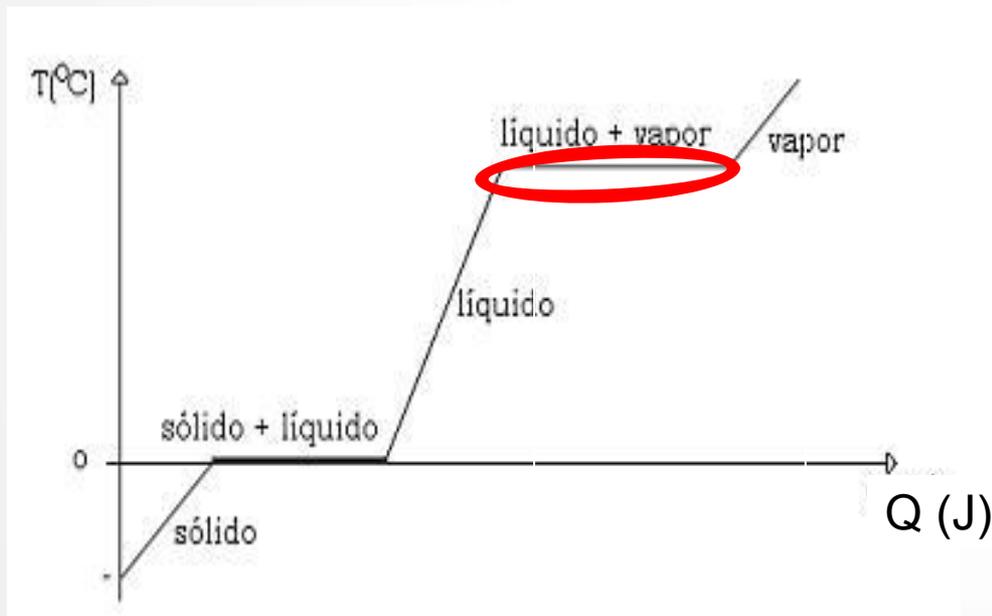
# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 2: mudança de fase

Empiricamente: aquecendo uma substância verificamos que  $T$  não muda, e

$$Q = \pm ML$$

onde:  $L$  = **Calor Latente** (unid: J / kg) = Qtde de calor adicionado ou retirado para 1 kg desta substância completar a sua transição de fase



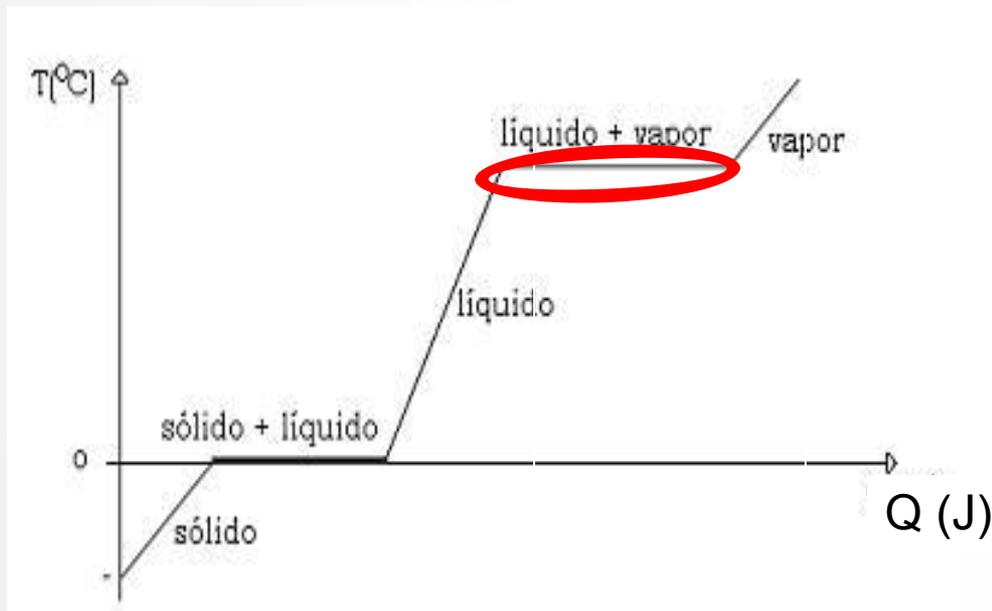
# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 2: mudança de fase

Empiricamente: esquentando uma substância verificamos que  $T$  não muda, e

$$Q = \pm ML$$

onde:  $L$  = **Calor Latente** (unid: J / kg) = Qtde de calor absorvido ou retirado para 1 kg desta substância completar a sua transição de fase



Obs: Novamente, aqui supomos que estamos apenas aplicando  $Q$  (ie que não estamos tb realizando  $W$  dissipativo a la Joule). Nesse caso vale tb

$$\Delta E^{\text{term}} = \pm ML$$

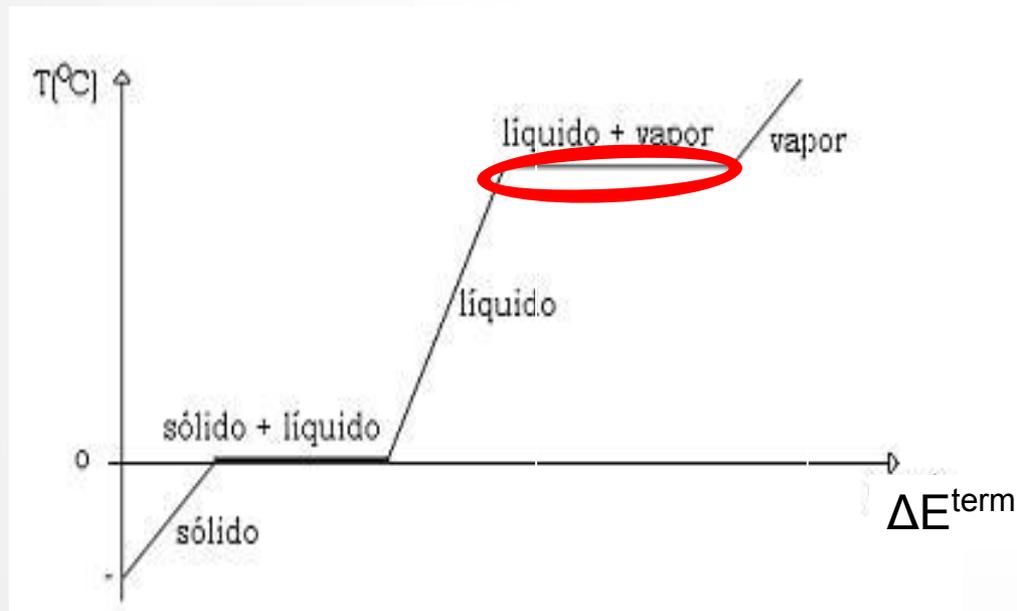
# Propriedades Térmicas da Matéria

## Caso 2: mudança de fase

Empiricamente:  $\Delta E_{term} = +ML$

onde:  $L = \text{Calor Latente}$  (unid: J / kg)

= Qtde de energia absorvida para que 1 kg desta substância complete a sua transição de fase



Obs: em situações onde  $W_{ext}$  é desprezível, escrevemos apenas  $Q = \pm ML$

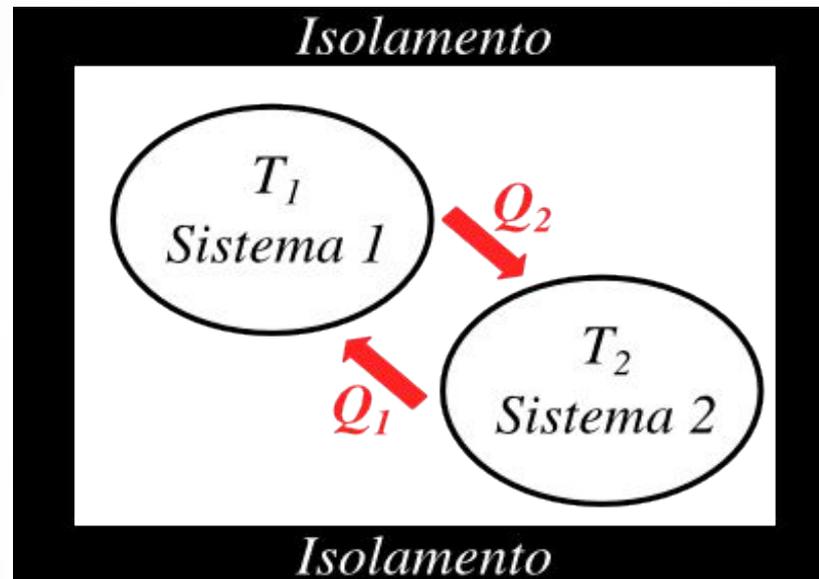
# Propriedades Térmicas da Matéria

**TABELA 17.3** Temperaturas de fusão/ebulição e calores latentes de algumas substâncias

Substância	$T_f$ (°C)	$L_f$ (J/kg)	$T_e$ (°C)	$L_v$ (J/kg)
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	-210	$0,26 \times 10^5$	-196	$1,99 \times 10^5$
Álcool etílico	-114	$1,09 \times 10^5$	78	$8,79 \times 10^5$
Mercúrio	-39	$0,11 \times 10^5$	357	$2,96 \times 10^5$
Água	0	$3,33 \times 10^5$	100	$22,6 \times 10^5$
Chumbo	328	$0,25 \times 10^5$	1750	$8,58 \times 10^5$

# Propriedades Térmicas da Matéria

## Sistemas em contato térmico (Calorimetria)



$Q_1 \rightarrow$  Quantidade de calor recebida pelo sistema 1

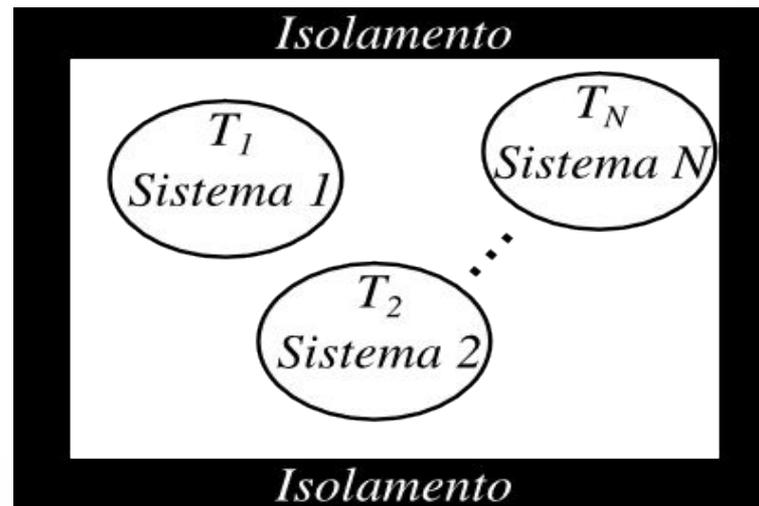
$Q_2 \rightarrow$  Quantidade de calor recebida pelo sistema 2

Como estão isolados:  $Q_{\text{resultante}} = Q_1 + Q_2 = 0$

# Propriedades Térmicas da Matéria

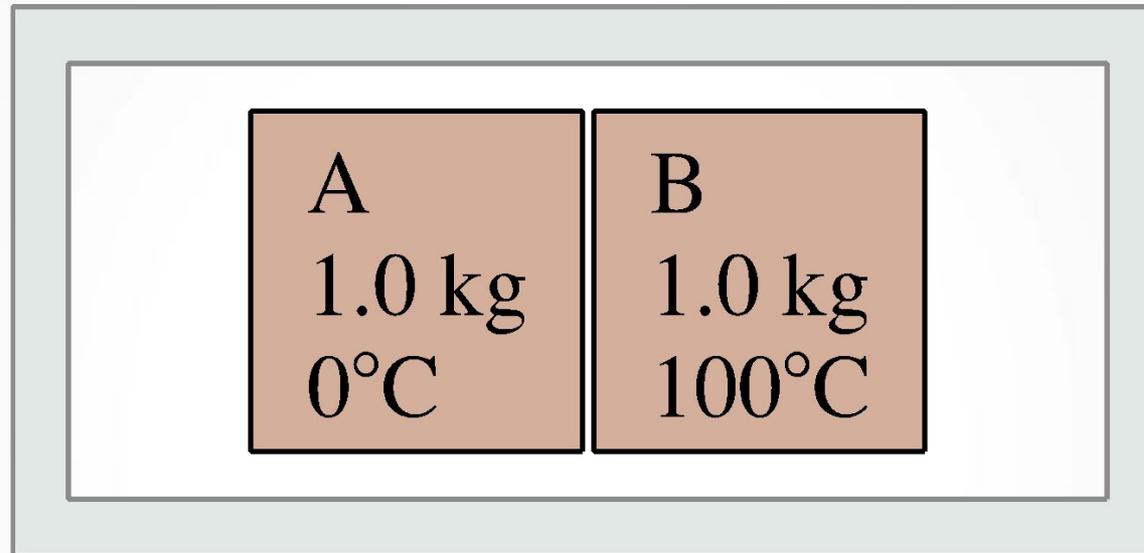
## Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

Se houver vários sistemas interagindo...



$$Q_{\text{resultante}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N = 0$$

# Teste Conceitual 10



Os dois blocos indicados, feitos de materiais diferentes, são colocados em contato em um recipiente isolado. A temperatura final de equilíbrio será

- A)  $> 50^{\circ}\text{C}$
- B)  $= 50^{\circ}\text{C}$
- C)  $< 50^{\circ}\text{C}$
- D) depende

## Teste Conceitual 11

Um termômetro de 50g é usado para medir a temperatura de 200mL de água. O calor específico do termômetro, basicamente feito de vidro, é de  $750 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ , e ele marca  $20^\circ\text{C}$ , enquanto repousa sobre uma mesa. Depois de ser completamente imerso na água, a temperatura estabiliza em  $71,2^\circ\text{C}$ .

Podemos concluir que a temperatura da água antes da medida era

- (A) menor que  $71,2^\circ\text{C}$ .
- (B) igual a  $71,2^\circ\text{C}$ .
- (C) maior que  $71,2^\circ\text{C}$ .
- (D) próxima de  $71,2^\circ\text{C}$ , mas podia ser maior, menor ou igual.

# Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

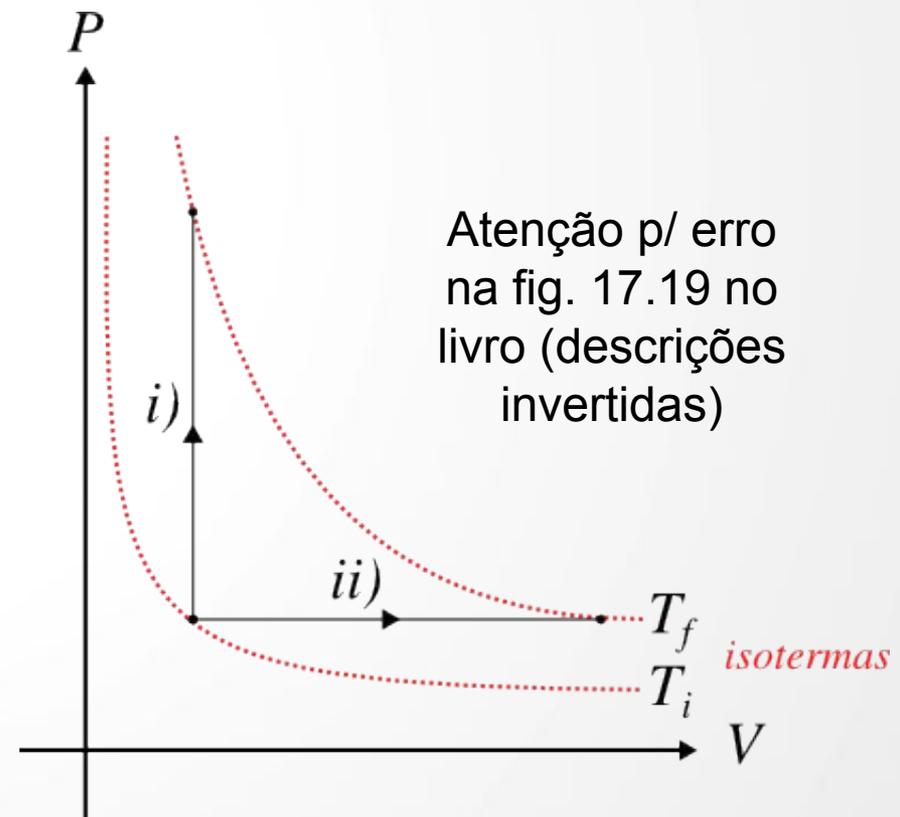
*O mesmo gás pode receber calores diferentes em processos que envolvem a mesma variação de temperatura*

Considere duas maneiras de variar a temperatura de um gás de  $T_i$  até  $T_f > T_i$ :

i) *Processo a V cte:* calor  $Q_{(i)} = n C_V \Delta T$

ii) *Processo a P cte:* calor  $Q_{(ii)} = n C_P \Delta T$

mesmo  $\Delta T \rightarrow$  mesmo  $\Delta E^{\text{term}} = Q + W$



# Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

O mesmo gás pode receber calores diferentes em processos que envolvem a mesma variação de temperatura

Considere duas maneiras de variar a temperatura de um gás de  $T_i$  até  $T_f > T_i$ :

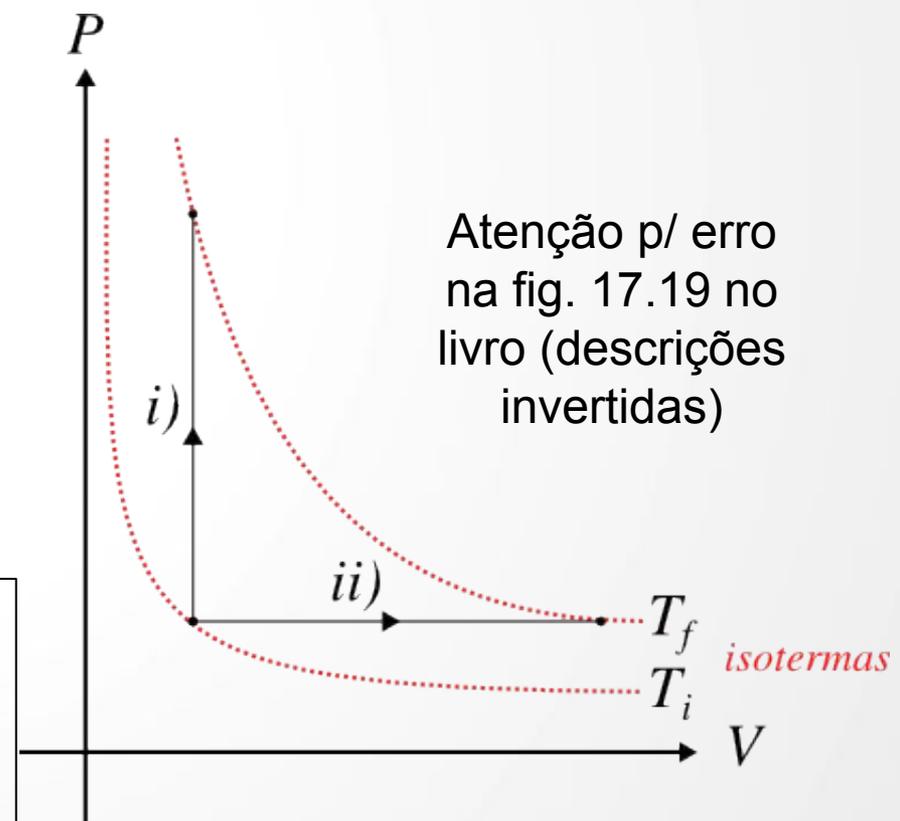
i) Processo a  $V$  cte: calor  $Q_{(i)} = n C_V \Delta T$

ii) Processo a  $P$  cte: calor  $Q_{(ii)} = n C_P \Delta T$

mesmo  $\Delta T \rightarrow$  mesmo  $\Delta E^{\text{term}} = Q + W$

mas no caso (i)  $W_{(i)} = 0$ , e no caso (ii)  $W_{(ii)} < 0$

portanto  $Q_{(ii)} > Q_{(i)} \rightarrow C_P > C_V !$



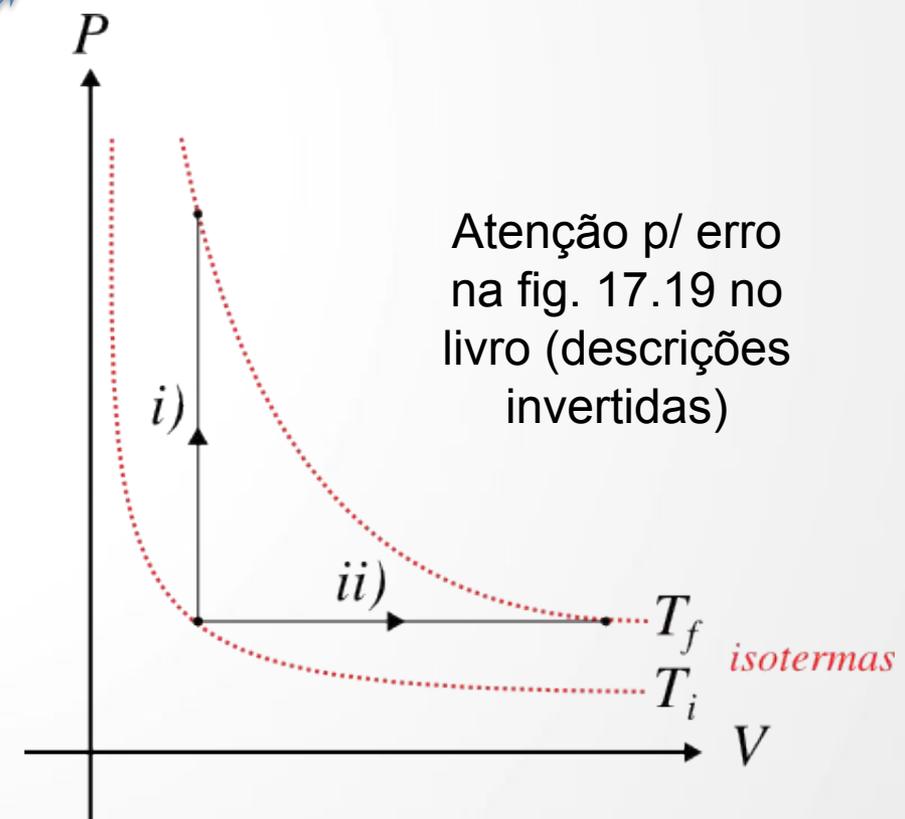
# Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

O mesmo gás pode receber calores diferentes em processos que envolvem a mesma variação de temperatura

**TABELA 17.4** Calores específicos molares de gases (J/mol K)

Gás	$C_P$	$C_V$	$C_P - C_V$
<b>Gases monoatômicos</b>			
He	20,8	12,5	8,3
Ne	20,8	12,5	8,3
Ar	20,8	12,5	8,3
<b>Gases diatômicos</b>			
H <sub>2</sub>	28,7	20,4	8,3
N <sub>2</sub>	29,1	20,8	8,3
O <sub>2</sub>	29,2	20,9	8,3

Atenção p/ erro no livro (ordem trocada!)



# Teste Conceitual 12

**TABELA 17.4** Calores específicos molares de gases (J/mol K)

Gás	$C_P$	$C_V$	$C_P - C_V$
<b>Gases monoatômicos</b>			
He	20,8	12,5	8,3
Ne	20,8	12,5	8,3
Ar	20,8	12,5	8,3
<b>Gases diatômicos</b>			
H <sub>2</sub>	28,7	20,4	8,3
N <sub>2</sub>	29,1	20,8	8,3
O <sub>2</sub>	29,2	20,9	8,3

Um mol de gás Hidrogênio e um mol de gás Nitrogênio estão em recipientes rígidos separados, ambos com o mesmo volume, e inicialmente à mesma temperatura de 30°C.

Adicionamos 1000 J de calor a cada gás. Ao final

- A)  $T_{H_2} < T_{N_2}$
- B)  $T_{H_2} = T_{N_2}$
- C)  $T_{H_2} > T_{N_2}$

# Teste conceitual 13

**TABELA 17.4** Calores específicos molares de gases (J/mol K)

Gás	$C_P$	$C_V$	$C_P - C_V$
<b>Gases monoatômicos</b>			
He	20,8	12,5	8,3
Ne	20,8	12,5	8,3
Ar	20,8	12,5	8,3
<b>Gases diatômicos</b>			
H <sub>2</sub>	28,7	20,4	8,3
N <sub>2</sub>	29,1	20,8	8,3
O <sub>2</sub>	29,2	20,9	8,3

28g de gás Hélio (<sup>4</sup>He) e 28g de gás Nitrogênio (<sup>14</sup>N)<sub>2</sub> estão em recipientes rígidos separados, ambos com o mesmo volume, e inicialmente à mesma temperatura de 30°C.

Adicionamos 1000 J de calor a cada gás. Ao final

- A)  $T_{\text{He}} < T_{\text{N}_2}$
- B)  $T_{\text{He}} = T_{\text{N}_2}$
- C)  $T_{\text{He}} > T_{\text{N}_2}$

## Teste conceitual 14

**TABELA 17.4** Calores específicos molares de gases (J/mol K)

Gás	$C_P$	$C_V$	$C_P - C_V$
<b>Gases monoatômicos</b>			
He	20,8	12,5	8,3
Ne	20,8	12,5	8,3
Ar	20,8	12,5	8,3
<b>Gases diatômicos</b>			
H <sub>2</sub>	28,7	20,4	8,3
N <sub>2</sub>	29,1	20,8	8,3
O <sub>2</sub>	29,2	20,9	8,3

Um mol de gás Hélio ( ${}^4\text{He}$ ) e um mol de gás Nitrogênio ( ${}^{14}\text{N}_2$ ) estão em recipientes separados, ambos com o mesmo volume, e inicialmente à mesma temperatura de  $30^\circ\text{C}$ . O recipiente contendo nitrogênio é rígido, mas aquele contendo hélio tem um pistão que se move de modo a manter a pressão constante.

Adicionamos 1000 J de calor a cada gás. Ao final

- A)  $T_{\text{He}} < T_{\text{N}_2}$
- B)  $T_{\text{He}} = T_{\text{N}_2}$
- C)  $T_{\text{He}} > T_{\text{N}_2}$

## Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

***Outra forma de ver:*** o mesmo calor  $Q$ , adicionado de formas diferentes ao gás, resulta em temperaturas finais diferentes. Quanto maior o  $C$  do processo, menor a variação em  $T$ .

$$\Delta T = \frac{Q}{nC}$$

### Teste Conceitual 15

3,0 moles de  $O_2$  a  $20^\circ\text{C}$  são aquecidos de modo a absorver 600J de calor em um processo isobárico. Em seguida são resfriados a volume constante, perdendo os mesmos 600J de calor. Neste processo:

- (A)  $\Delta T=0$ .
- (B)  $\Delta T>0$ .
- (C)  $\Delta T<0$ .
- (D) Nada se pode afirmar sobre  $\Delta T$ .

# Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

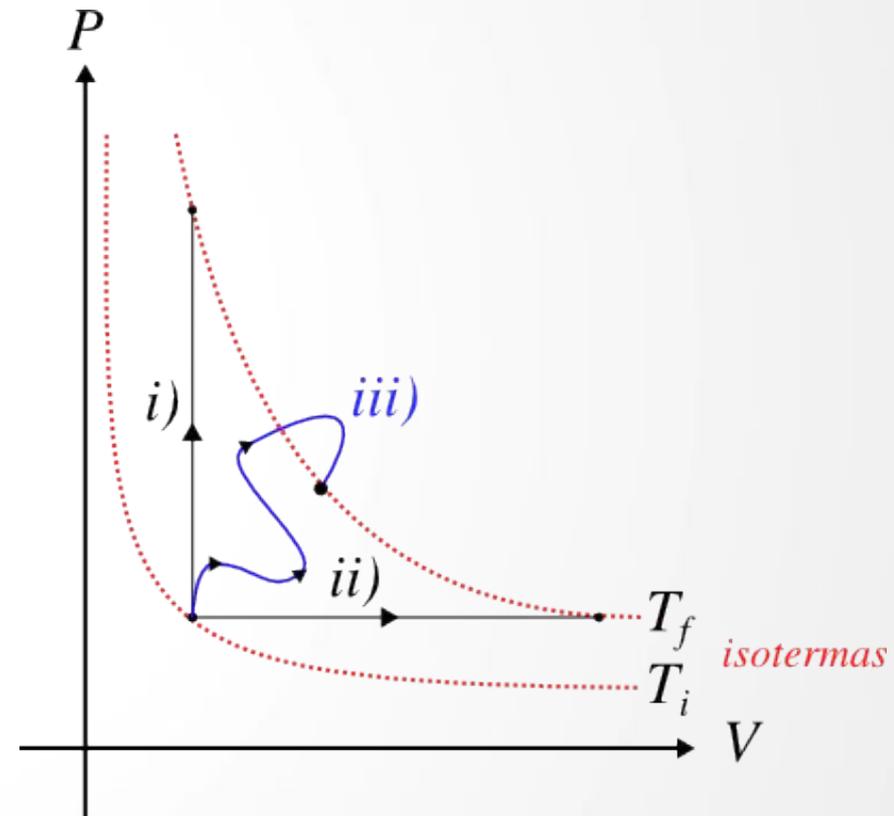
De modo geral, **Q (e tb C) dependerão do caminho.**

**P:** como calcular Q de um caminho geral, como (iii), no qual P e V podem variar simultaneamente?

**R:** utilizando a **1ª Lei da Termodinâmica**

$$Q = \Delta E^{term} - W$$

Já sabemos que  $W = - \int_i^f P(V) dV$  para o caminho;  
basta então descobrir como tb calcular  $\Delta E^{term}$



# Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

- Sabemos que  $\Delta E^{\text{term}}$  é o mesmo em qualquer processo que envolva o mesmo  $\Delta T$

Por ex: (i), (ii) e (iii) têm o mesmo  $\Delta E^{\text{term}}$

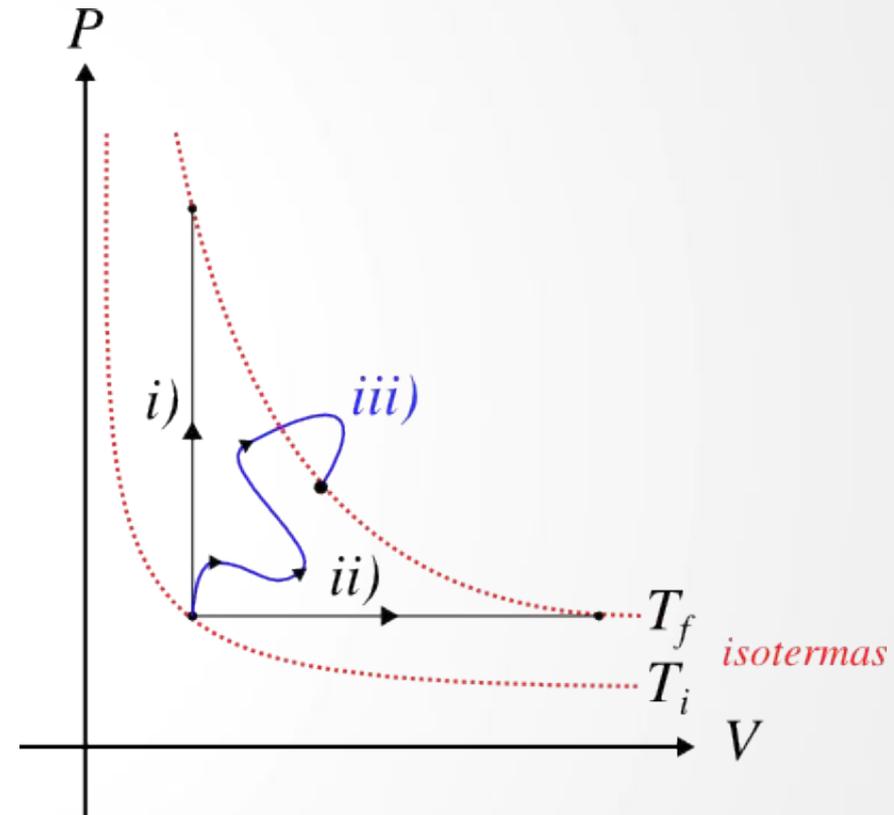
- Mas em (i), podemos escrever

$$\begin{aligned}\Delta E^{\text{term}} (i) &= Q_{(i)} + \cancel{W_{(i)}} \\ &= Q_{(i)} = n C_V \Delta T\end{aligned}$$

Conclusão

Para **qualquer processo**, mesmo que não seja a  $V$  constante, vale que

$$\Delta E^{\text{term}} = n C_V \Delta T$$



# Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

## Conclusão

Para **qualquer processo**, mesmo que não seja a V constante, vale que

$$Q = n C_V \Delta T + \int_i^f P(V) dV$$

# Aplicação: relação entre $C_p$ e $C_v$ - Quantitativo

- No processo a P constante (ii) :

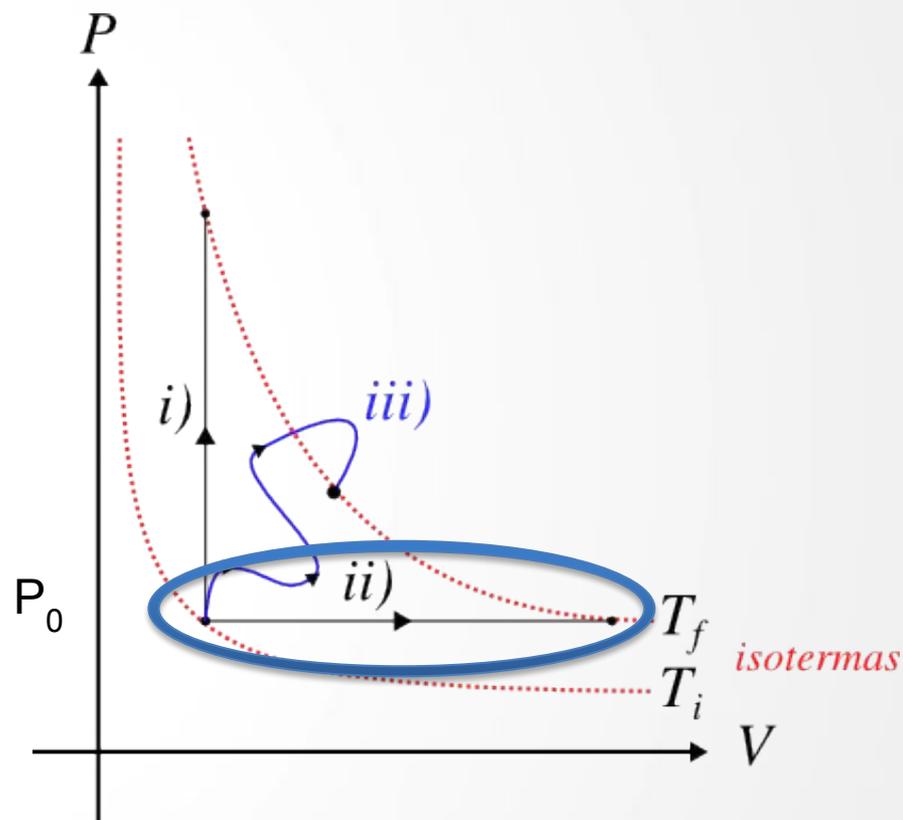
$$\begin{aligned}\Delta E^{\text{tér}} \text{ (ii)} &= Q_{\text{ii}} + W_{\text{ii}} \\ &= n C_p \Delta T - P_0 \Delta V\end{aligned}$$

$$\text{(Lei Gases ideais)} = n C_p \Delta T - nR\Delta T$$

$$= (C_p - R)n\Delta T$$

e como sempre vale  $\Delta E^{\text{tér}} = n C_v \Delta T$  :

$$C_p - C_v = R = 8,31 \text{ J/mol K}$$

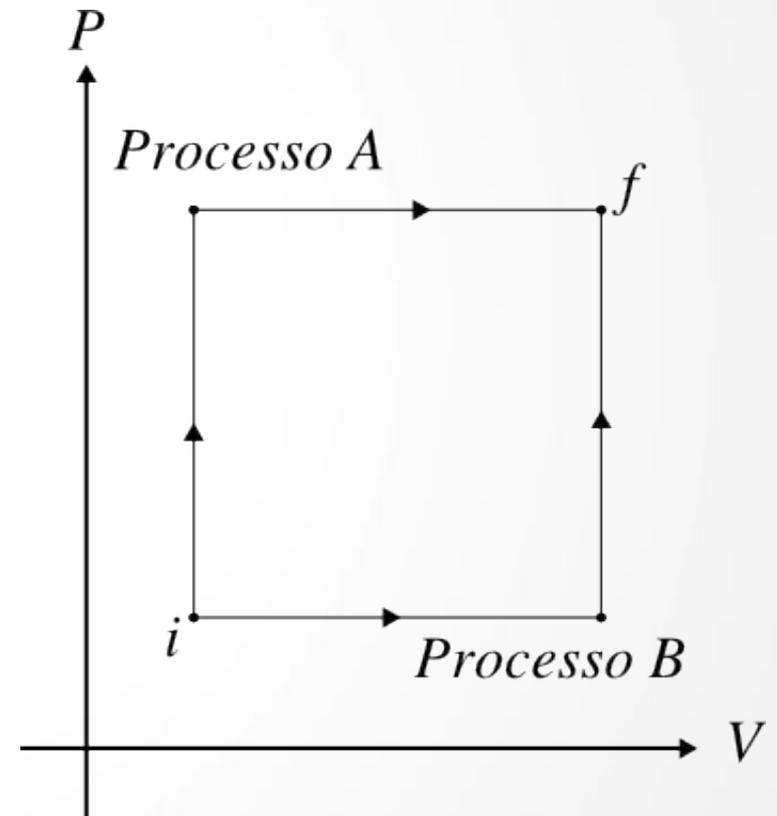


obs: veremos no cap 18 como calcular  $C_v$  (e portanto  $C_p$ ) para gases ideais, obtendo boa concordância com os dados experimentais

## Teste Conceitual 16

Com relação aos processos ao lado:

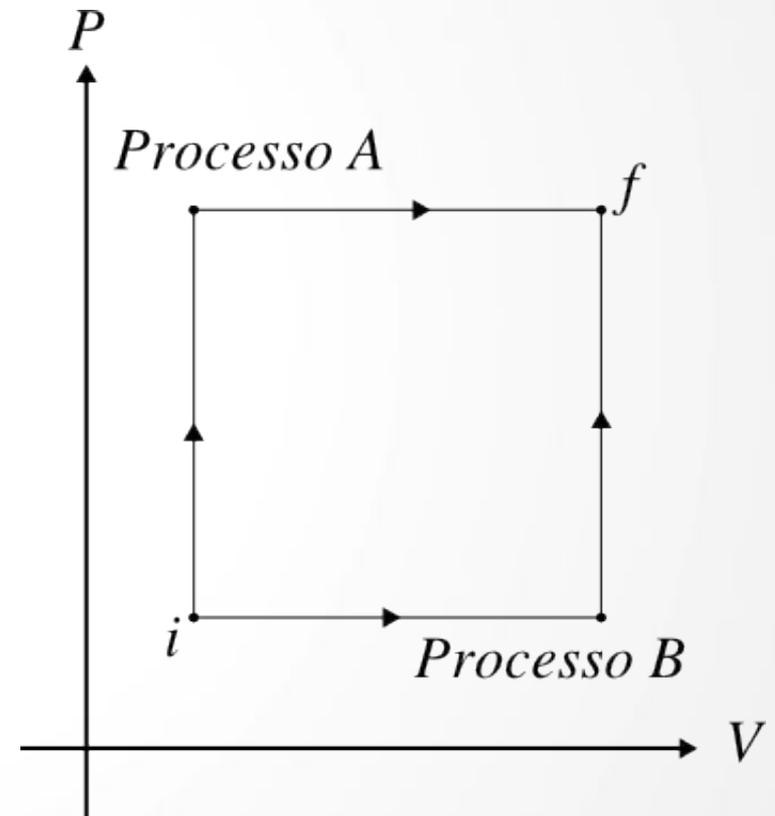
- (A)  $Q_A > Q_B$
- (B)  $Q_A < Q_B$
- (C)  $Q_A = Q_B$
- (D)  $Q_A \geq Q_B$



## Teste Conceitual 16

Com relação aos processos ao lado:

- (A)  $Q_A > Q_B$
- (B)  $Q_A < Q_B$
- (C)  $Q_A = Q_B$
- (D)  $Q_A \geq Q_B$

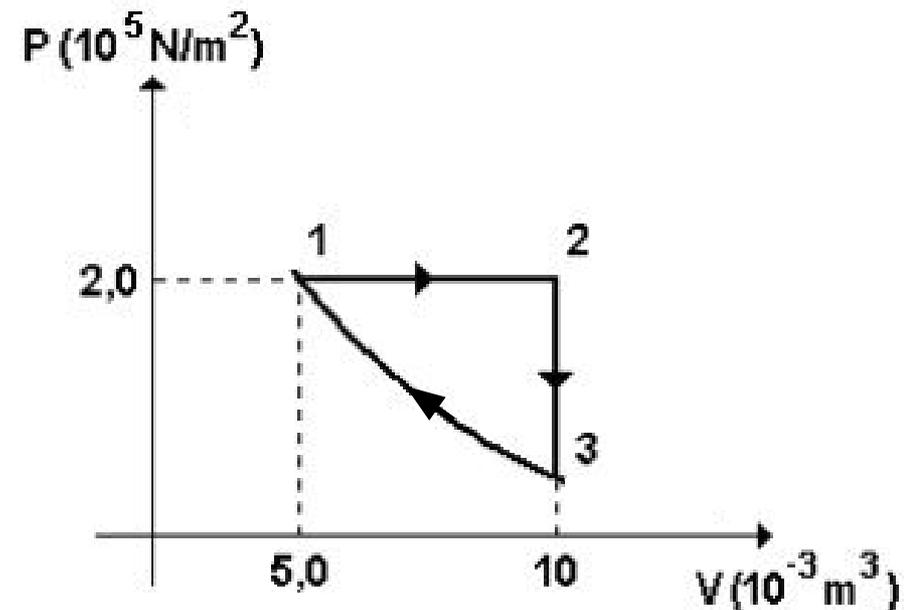


O calor depende do caminho!

## Teste Conceitual 17

Um gás ideal monoatômico é expandido isobaricamente até o ponto 2, em seguida resfriado a volume constante até o ponto 3 e retorna ao ponto 1 através de uma compressão isotérmica. A variação da energia térmica entre os pontos 3 e 1 é:

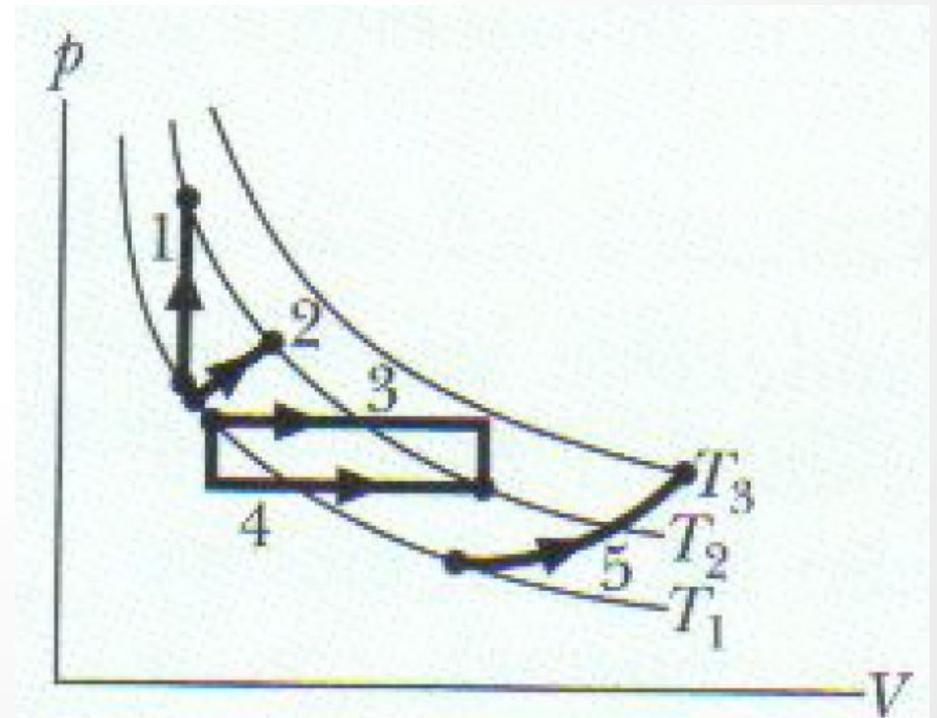
- (A) não é possível determinar sem saber qual é o gás.
- (B) igual a  $\Delta E^{\text{térm}}$  entre os pontos 1 e 2.
- (C) igual a  $\Delta E^{\text{térm}}$  entre os pontos 2 e 3.
- (D) igual a zero.



## Teste Conceitual 18

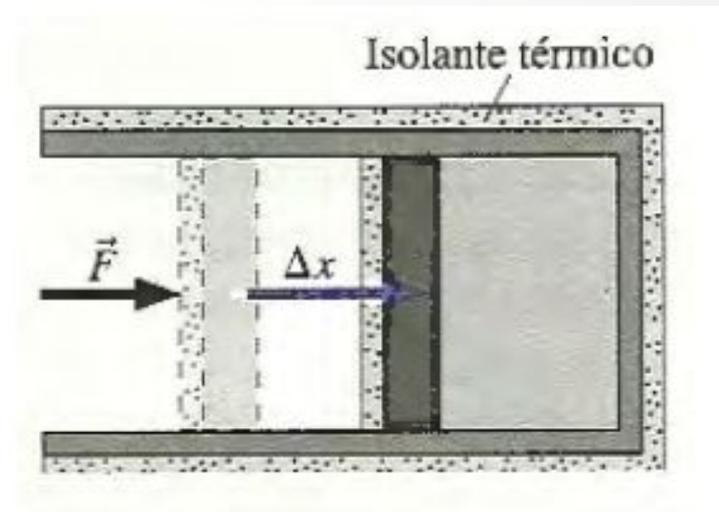
A figura mostra 5 trajetórias de um gás ideal em um diagrama PV. Ordene as variações da energia térmica do gás nos processos:

- (A)  $\Delta E^{\text{tér}} 5 > \Delta E^{\text{tér}} 1 = \Delta E^{\text{tér}} 2 = \Delta E^{\text{tér}} 3 = \Delta E^{\text{tér}} 4$   
(B)  $\Delta E^{\text{tér}} 5 = \Delta E^{\text{tér}} 3 > \Delta E^{\text{tér}} 1 = \Delta E^{\text{tér}} 2 = \Delta E^{\text{tér}} 4$   
(C)  $\Delta E^{\text{tér}} 5 > \Delta E^{\text{tér}} 4 > \Delta E^{\text{tér}} 3 > \Delta E^{\text{tér}} 2 > \Delta E^{\text{tér}} 1$   
(D)  $\Delta E^{\text{tér}} 5 = \Delta E^{\text{tér}} 1 = \Delta E^{\text{tér}} 2 = \Delta E^{\text{tér}} 3 = \Delta E^{\text{tér}} 4$



# Processos adiabáticos

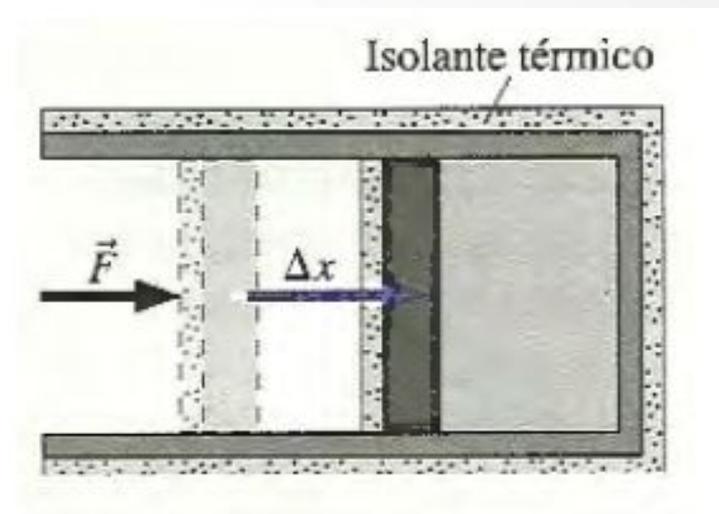
- São aqueles em que nenhum calor é trocado ( $Q=0$ )
- Situações onde ocorre:
  1. Quando o sistema está muito bem isolado termicamente
  2. Quando o tempo de interação do sistema com sua vizinhança é curto o suficiente para que não dê tempo de calor entrar ou sair



## Teste conceitual 19

Numa compressão volumétrica adiabática. A temperatura do gás:

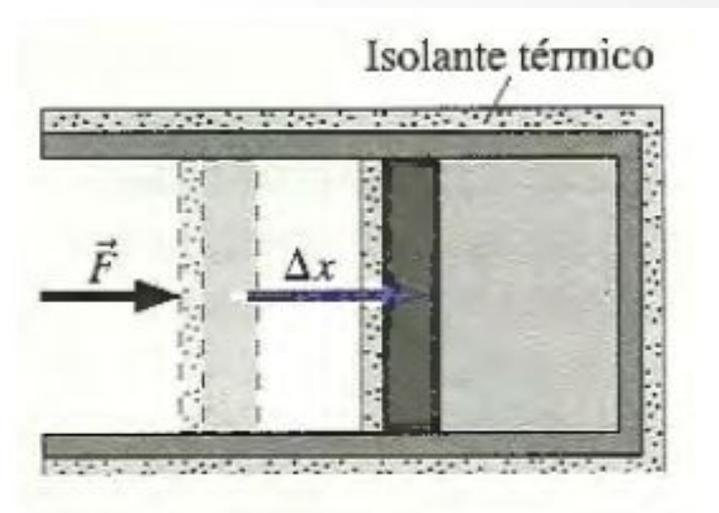
- A) aumenta
- B) diminui
- C) é zero
- D) nada se pode afirmar



## Teste conceitual 19

Numa compressão volumétrica adiabática. A temperatura do gás:

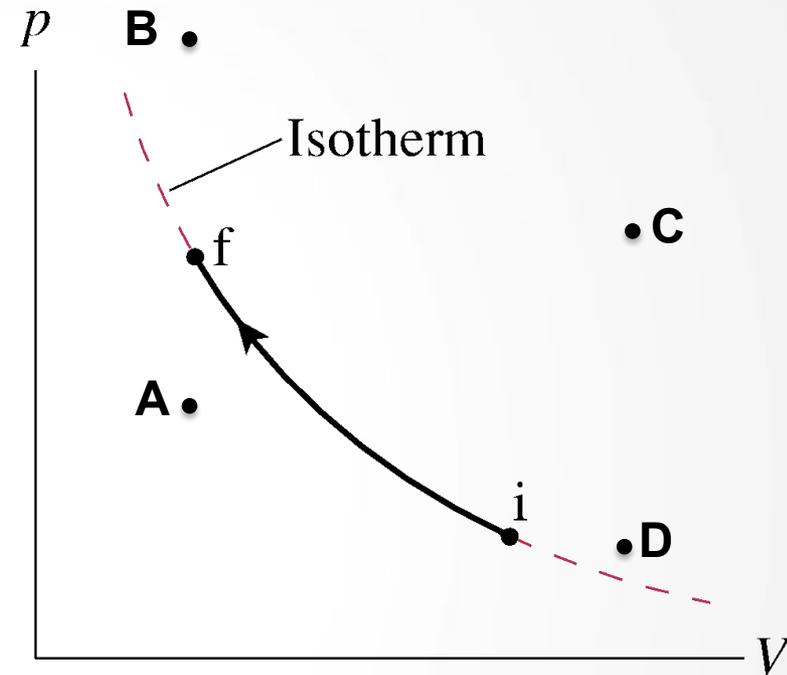
- A) aumenta
- B) diminui
- C) é zero
- D) nada se pode afirmar



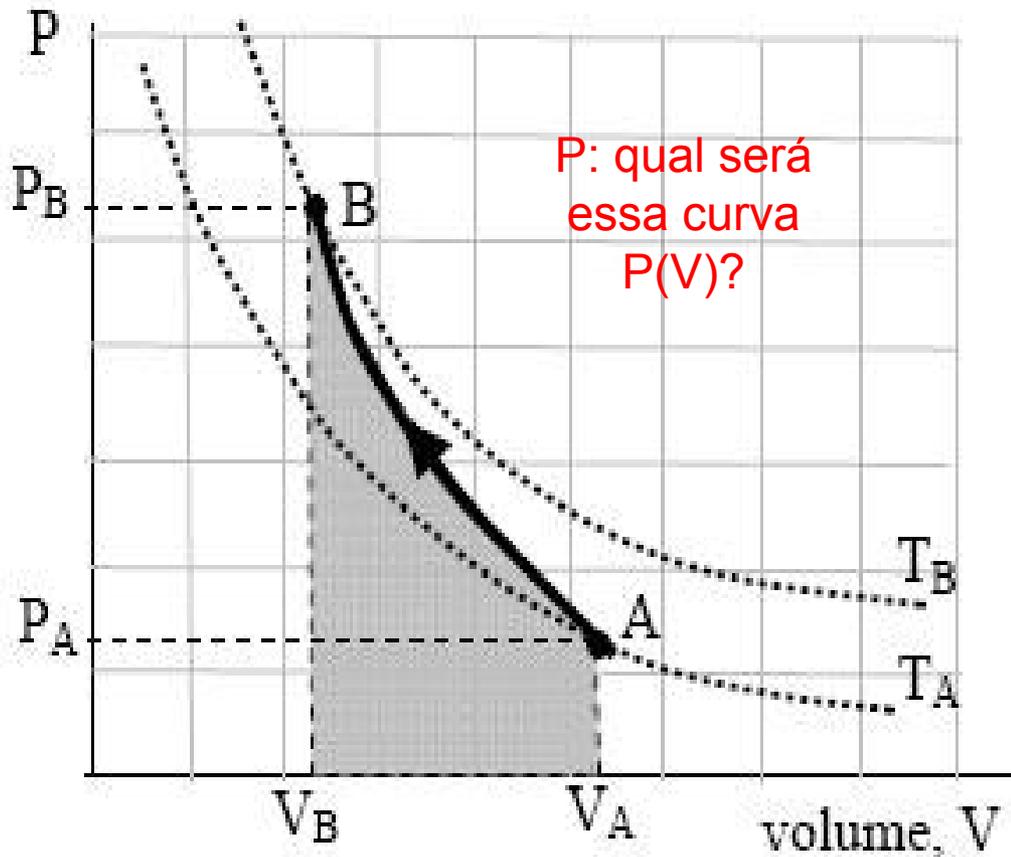
E se fosse uma expansão volumétrica adiabática?

## Processos adiabáticos ( $Q=0$ )

**Teste conceitual 20:** A figura mostra uma isoterma. Qual dos quatro pontos indicados pode ser alcançado partindo do ponto (i) através de um processo adiabático?



# Processos adiabáticos ( $Q=0$ )



Descrições equivalentes

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma$$



$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

onde:  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} > 1$

Obs: Deduziremos no cap. 18 que  $\gamma = \begin{cases} 5/3 = 1,67, & \text{para gases monoatômicos} \\ 7/5 = 1,4, & \text{para gases diatômicos} \end{cases}$

# Mecanismos de transferência de Calor

**Como o calor é transferido de um corpo mais quente para outro mais frio?**

# Mecanismos de transferência de Calor

**Como o calor é transferido de um corpo mais quente para outro mais frio?**

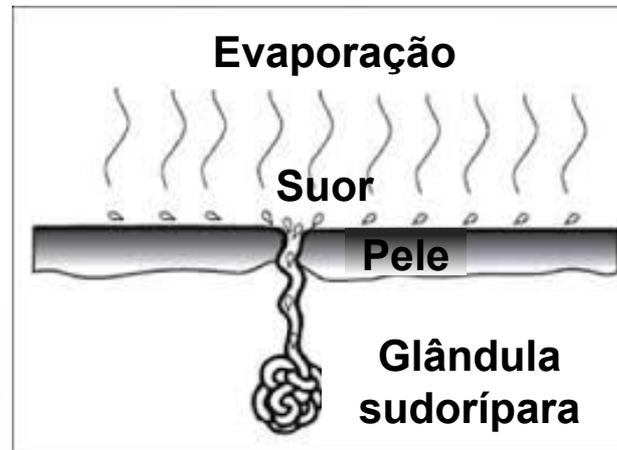
**4 Mecanismos:**

- **Evaporação**
- **Condução**
- **Convecção**
- **Irradiação**

# Mecanismos de transferência de Calor

## Evaporação

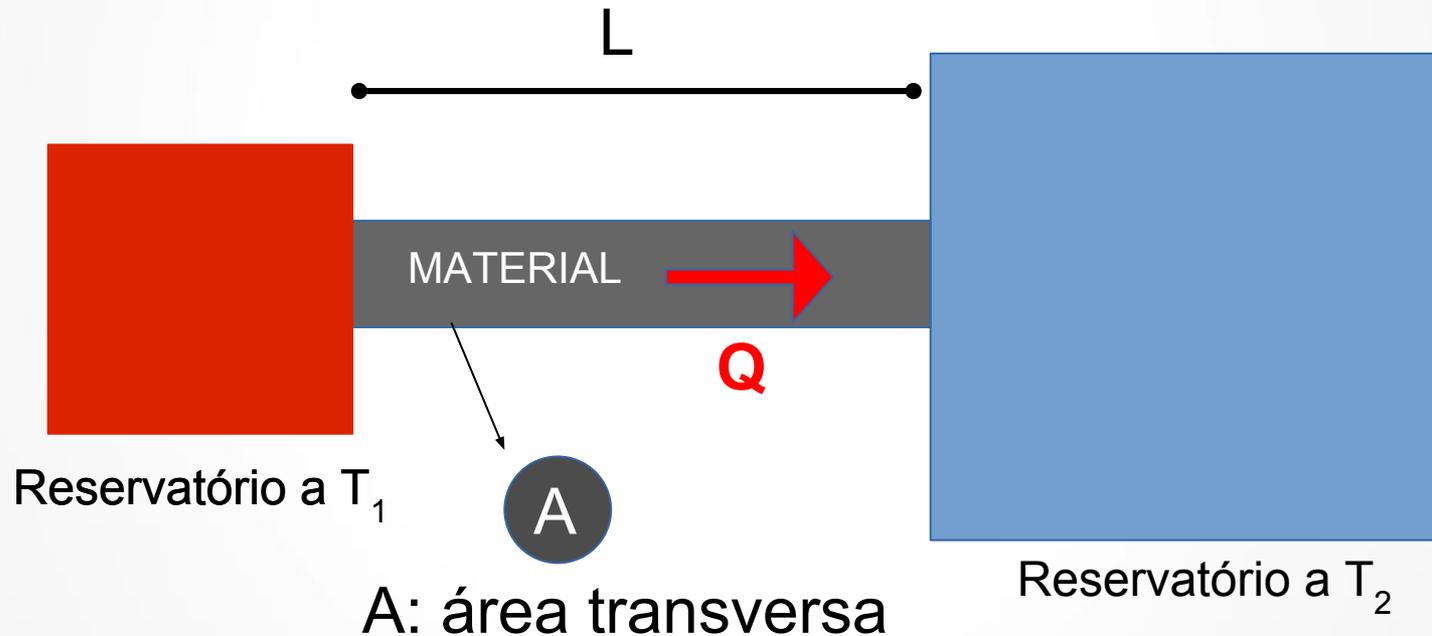
Transferência de calor através da mudança de fase de um líquido para vapor, o qual em seguida escapa, levando embora a energia absorvida. Também **envolve transporte de massa**.



# Mecanismos de transferência de Calor

## Condução

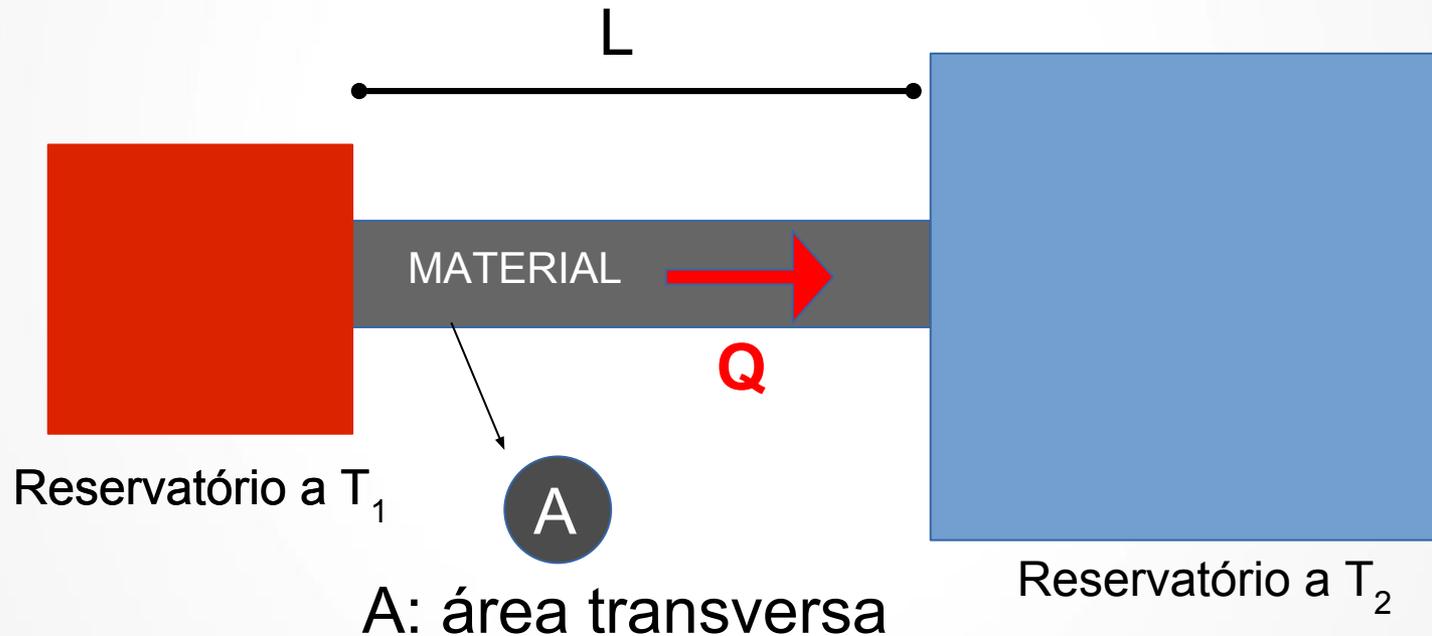
Transferência de calor através das vibrações de um meio material (**sem transporte de massa**) devido a uma  $\Delta T$ .



# Mecanismos de transferência de Calor

## Condução

Transferência de calor através das vibrações de um meio material (**sem transporte de massa**) devido a uma  $\Delta T$ .



Expressão (empírica) para o Fluxo de calor através do material:

$$\frac{Q}{\Delta t} = k \frac{A}{L} \Delta T$$

# Mecanismos de transferência de Calor

## Convecção

Transferência de calor através de um meio material (**com transporte de massa**) devido a uma  $\Delta T$ .

Ocorre somente nos fluidos!



Ex: o ar ou água são péssimos condutores de calor, porém transmitem facilmente o calor por convecção.

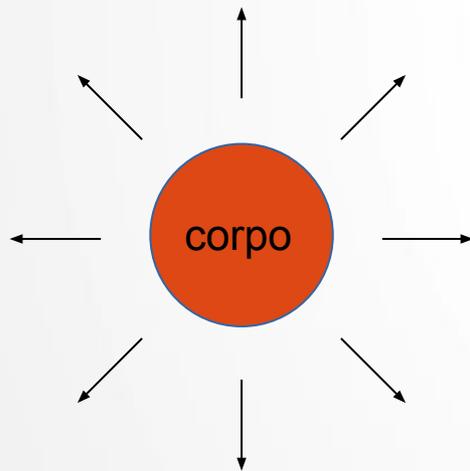
obs: análise quantitativa é muito complicada (turbulência...)

# Mecanismos de transferência de Calor

## Irradiação

Transferência de calor através das ondas eletromagnéticas (luz infravermelha, visível, ultravioleta etc.). Não há necessidade de meios materiais!

Todo corpo irradia o tempo todo!



As frequências (cores) irradiadas dependem da temperatura do corpo.

$T \sim 300\text{K}$ : infravermelho

$T \sim 800\text{K}$ : ainda principalmente infravermelho, mas já com emissão significativa no vermelho/laranja

$T \sim 5800\text{K}$  (Sol): máximo no amarelo visível, mas também UV e IR



## Teste Conceitual 21

Uma garrafa térmica é feita de paredes finas, espelhadas por dentro, e separadas por uma camada contendo vácuo. Ela funciona bem porque

- (A) as paredes finas reduzem a condução de calor.
- (B) a superfície espelhada, dentro da garrafa, reduz a convecção.
- (C) o vácuo reduz a irradiação de calor.
- (D) nenhuma das respostas acima.

## Teste Conceitual 21

Uma garrafa térmica é feita de paredes finas, espelhadas por dentro, e separadas por uma camada contendo vácuo. Ela funciona bem porque

- (A) as paredes finas reduzem a condução de calor.
- (B) a superfície espelhada, dentro da garrafa, reduz a convecção.
- (C) o vácuo reduz a irradiação de calor.
- (D) nenhuma das respostas acima.**

- as paredes em si bloqueiam a **convecção e a evaporação**

- o vácuo reduz a **condução**

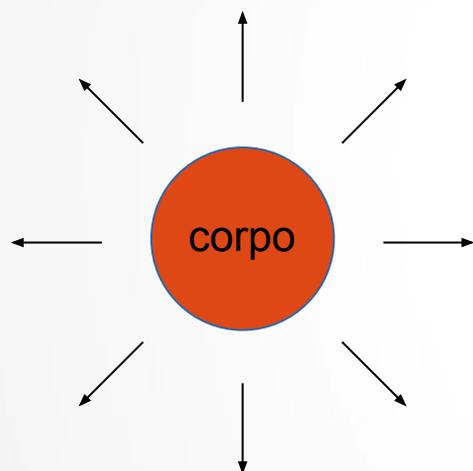
(obs: na prática ele nunca é perfeito, então sempre há alguma condução)

- a superfície espelhada reduz a **irradiação**

# Mecanismos de transferência de Calor

## Irradiação

Transferência de calor através das ondas eletromagnéticas (luz infravermelha, visível, ultravioleta etc.). Não há necessidade de meios materiais!



J. Stefan determinou empiricamente (1879) que um corpo à temperatura  $T$  (em Kelvin) irradia calor com a potência (energia/tempo):

$$\frac{Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$

$A$  = área superficial do corpo

$e$  = emissividade (Depende do material:  $0 \leq e \leq 1$ , sendo  $= 1$  para emissor /absorvedor perfeito)

$\sigma$  = cte de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Obs: Essa relação foi justificada teoricamente por L. Boltzmann (1884) usando termodinâmica mais avançada do que faremos neste curso. Mais tarde (1900) o valor exato de  $\sigma$  foi obtido como uma consequência da teoria quântica da luz por M. Planck

# Mecanismos de transferência de Calor

## Irradiação

Ex: emissão solar



$$\frac{Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Dados:

- Intensidade radiação solar que chega à Terra:  $1370 \text{ W/m}^2$
- $R_{\text{Sol}} = 7,0 \times 10^8 \text{ m}$      $R_{\text{Terra-Sol}} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}$      $R_{\text{Terra}} = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$

- Qual é a potência *total* da radiação emitida pelo Sol ?
  - Qual a temperatura da superfície do Sol, assumindo que ele é um emissor perfeito?
- R: a)  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$     b)  $5790 \text{ K}$  (v. exemplo 17.11 p/ cálculos)
- Qual é a potência de radiação solar incidente sobre a Terra num dado instante?
  - Qual seria a temperatura da superfície da Terra, se ela fosse uma superfície perfeitamente absorvedora, em equilíbrio térmico com a radiação recebida do Sol (ie, assumindo que a potência irradiada pela superfície terrestre é igual à recebida)?

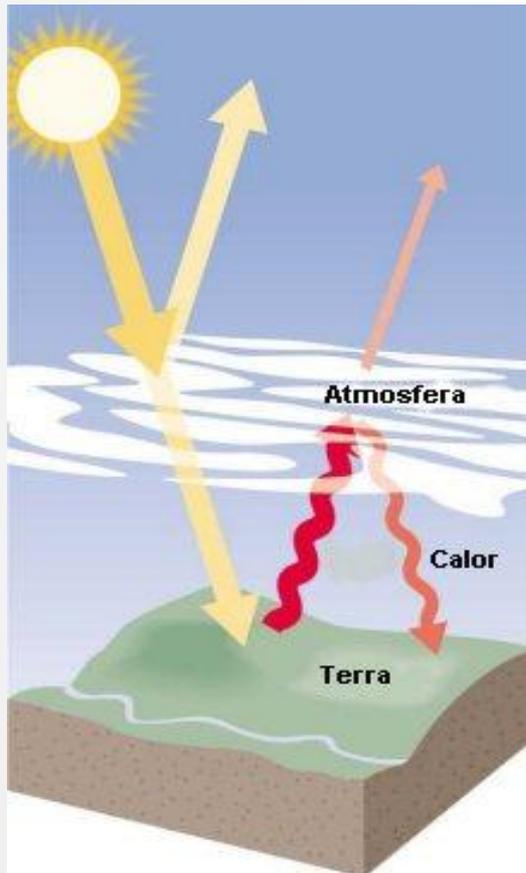
R: c)  $1,7 \times 10^{17} \text{ W}$     d) **277K !**

# Mecanismos de transferência de Calor

Mas a superfície da Terra é um pouco mais quente que isso ! (**T médio: 288K!**)

## Como isto ocorre?

R: efeito estufa !



- Gases na atmosfera ( $\text{CO}_2$ , metano..) absorvem e/ou refletem parte da radiação infravermelha emitida pela superfície
- Funcionam como um 'cobertor', mantendo a superfície a T maior que estaria normalmente
- Esse efeito é ainda mais pronunciado em Vênus ( $T = 730\text{K!}$ )
- obs: há tb outros efeitos a considerar
  - nuvens / gelo na superfície refletem parte da radiação incidente (tenderia a tornar a superfície ainda mais fria!)
  - a Terra tem um núcleo muito quente, que também ajuda a aquecer a superfície
  - a superfície tb não é um emissor perfeito... etc etc