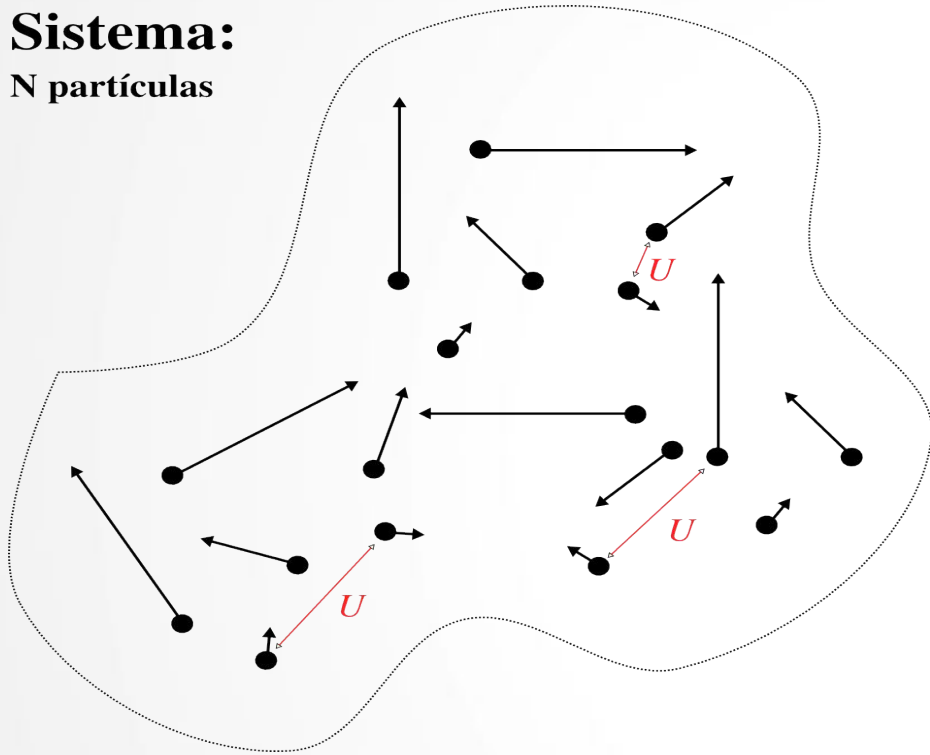


Cap 17: 1ª Lei da Termodinâmica

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:

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

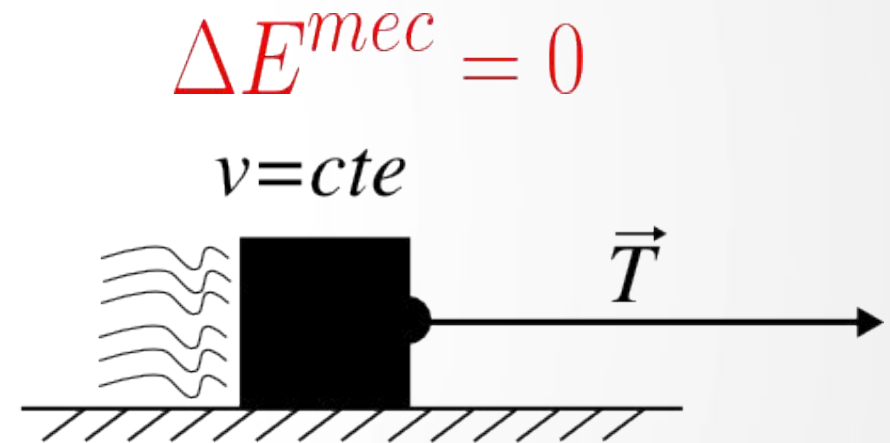
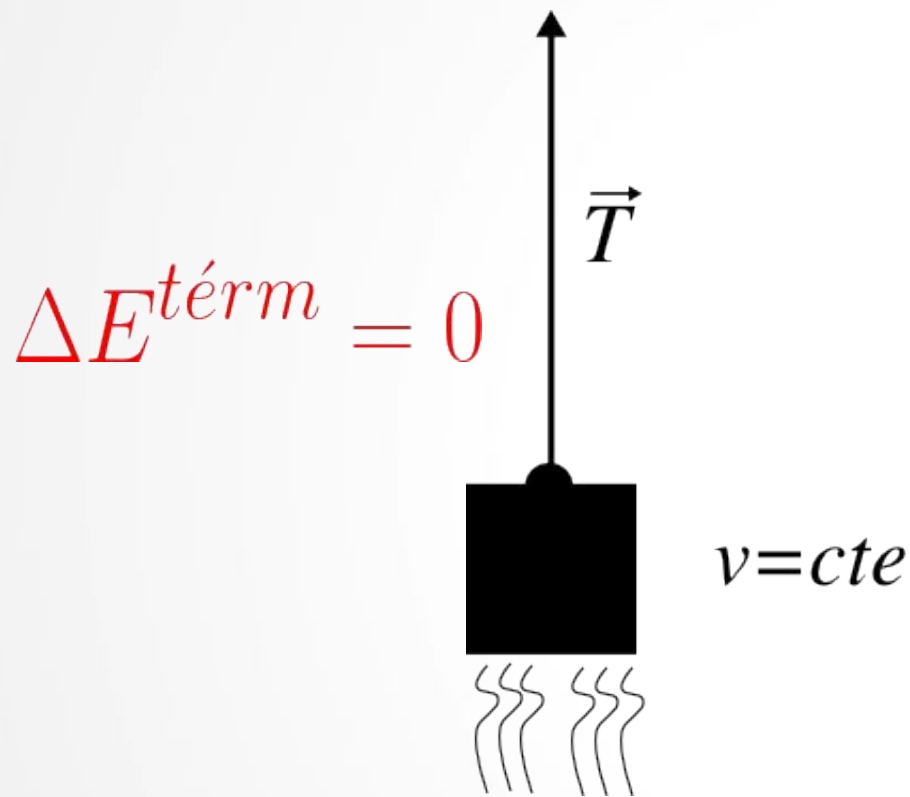
Ex: trabalho de forças eletrostáticas ou gravitacionais entre constituintes do sistema

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

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

$$\overbrace{\Delta E_{mec}}^{\Delta K + \Delta U} + \overbrace{\Delta E_{micro}}^{\Delta E_{term}} = W_{ext}$$

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

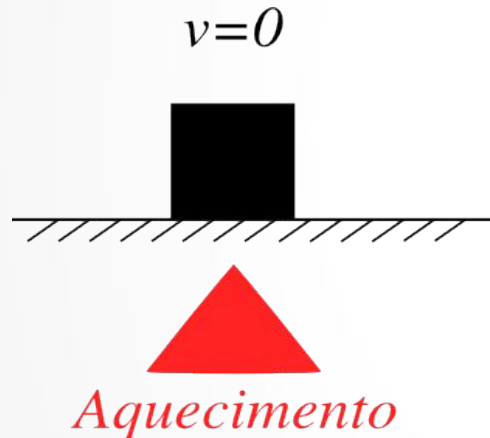


$$W_{ext} = W_T = \Delta E_{mec}$$

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

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**

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

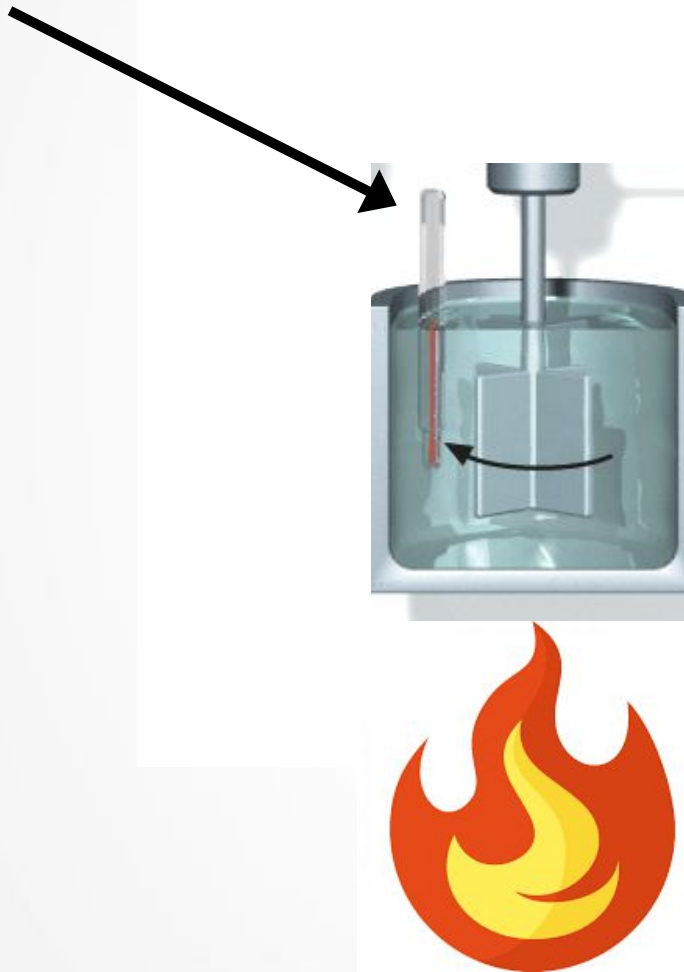
Mas... o que exatamente é calor? Como medi-lo?

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

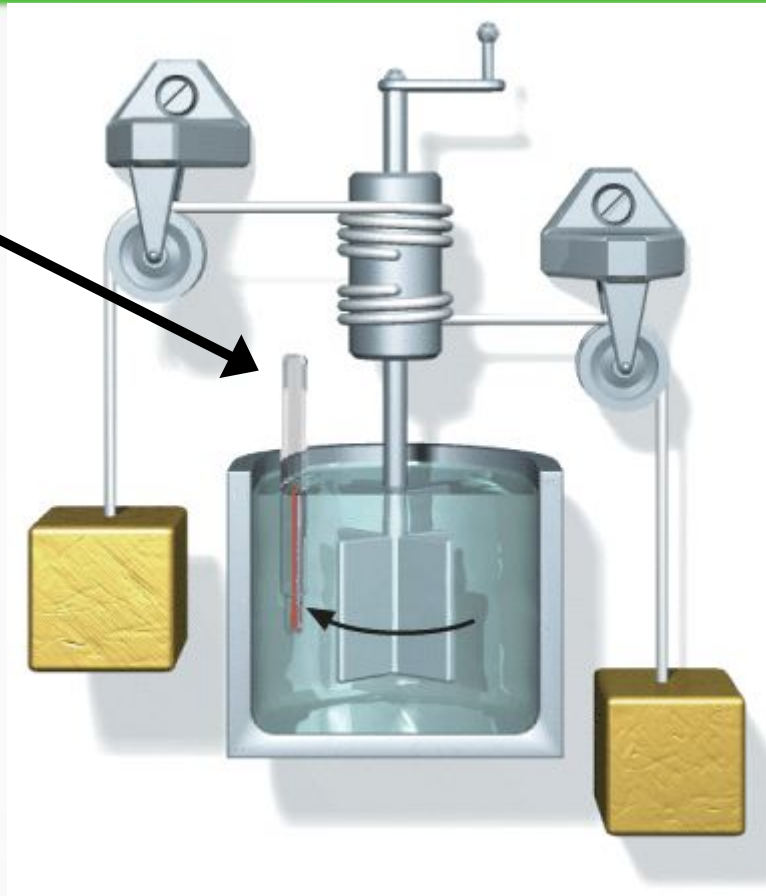


Sabemos que é possível aumentar a temperatura de um corpo (p. exemplo, água), colocando-a em contato com um corpo quente (T alta), ex: chama

Def: **1 caloria** é a qtd de calor capaz de aumentar a T de 1g de água em 1°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

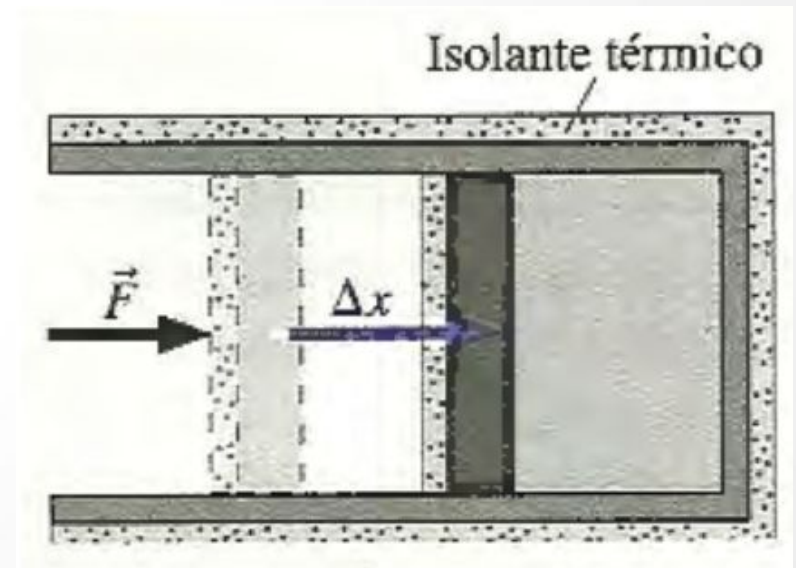
Quais dos seguintes processos não envolvem calor?

- (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

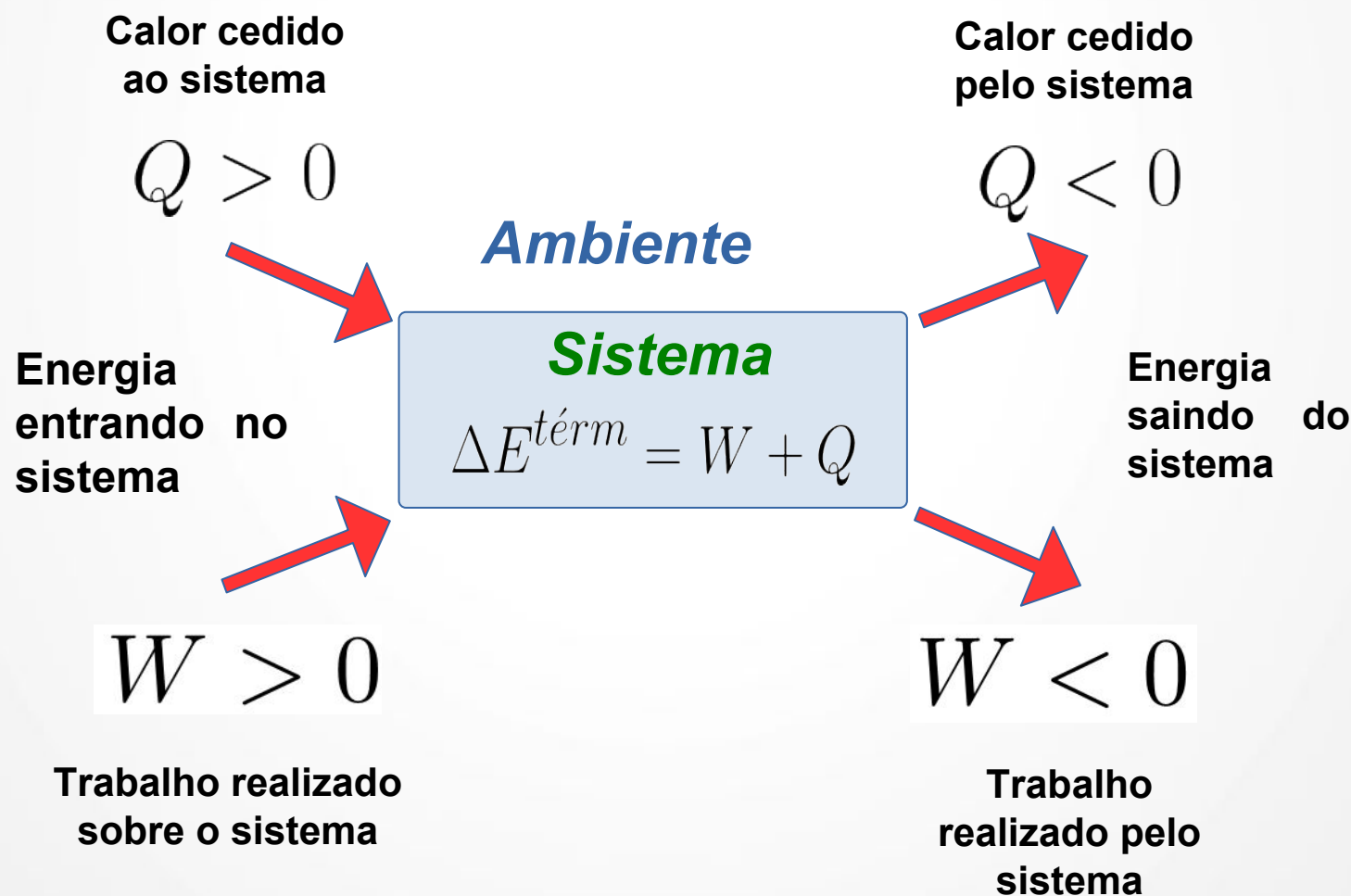
- A) Aumenta
- B) Diminui
- C) Não se altera
- D) Não há informações suficientes para saber



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 , ΔE_{mec} , $\Delta E_{\text{tér}}m$ e ΔT 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

ΔE_{mec}

$\Delta E_{\text{tér}}m$ e ΔT

Teste Conceitual 3

Considere a seguinte situação, e pense se W , Q , ΔE_{mec} , $\Delta E_{\text{tér}}m$ e ΔT 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

$$W = 0$$

$$Q > 0$$

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

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

Teste Conceitual 4

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

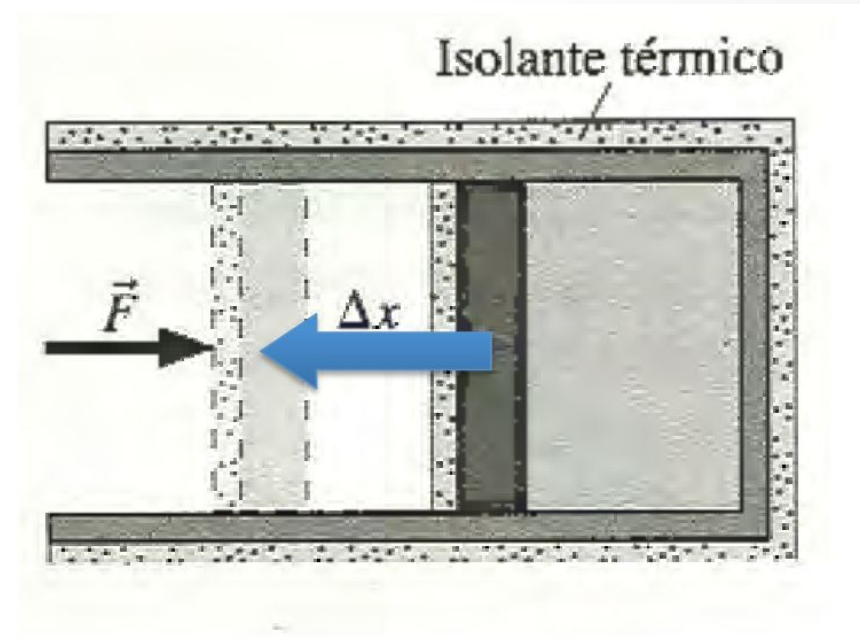
Caso 2: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico. O pistão vai sendo relaxado pouco a pouco, deixando o gás se expandir.

W

Q

ΔE_{mec}

$\Delta E_{\text{tér}}m$ e ΔT



Teste Conceitual 4

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

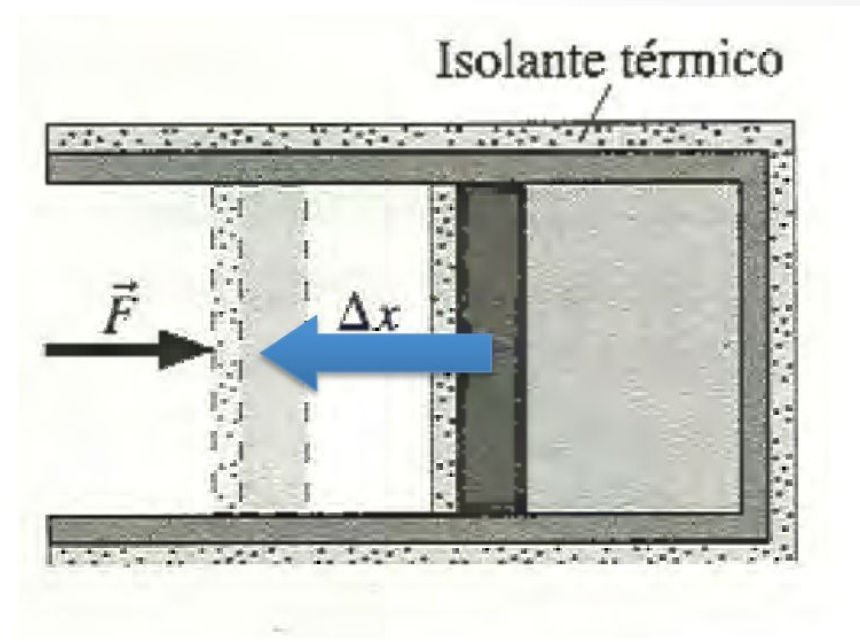
Caso 2: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico. O pistão vai sendo relaxado pouco a pouco, deixando o gás se expandir.

$$W < 0$$

$$Q = 0$$

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

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



Teste Conceitual 5

Considere a seguinte situação, e pense se W , Q , ΔE_{mec} , ΔE_{term} e ΔT são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

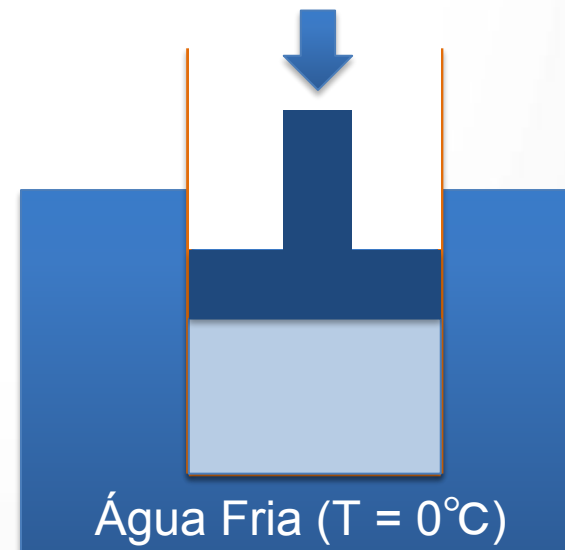
Caso 3: Um cilindro de gás feito de cobre é colocado em bom contato térmico com um grande tanque de água misturada com gelo, e deixado lá até o gás entrar em equilíbrio térmico a zero graus Celsius. Então um pistão é comprimido lentamente sobre o gás, mas de modo que a temperatura deste se mantém sempre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

ΔE_{term} e ΔT

ΔE_{mec}

W

Q



Teste Conceitual 5

Considere a seguinte situação, e pense se W , Q , ΔE_{mec} , ΔE_{term} e ΔT são cada um: A) positivo, B) negativo, C) zero ou D) não é possível determinar

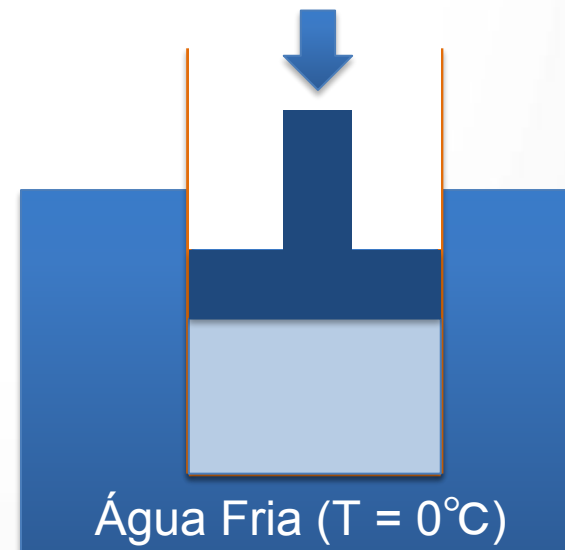
Caso 3: Um cilindro de gás feito de cobre é colocado em bom contato térmico com um grande tanque de água misturada com gelo, e deixado lá até o gás entrar em equilíbrio térmico a zero graus Celsius. Então um pistão é comprimido lentamente sobre o gás, mas de modo que a temperatura deste se mantém sempre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

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

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

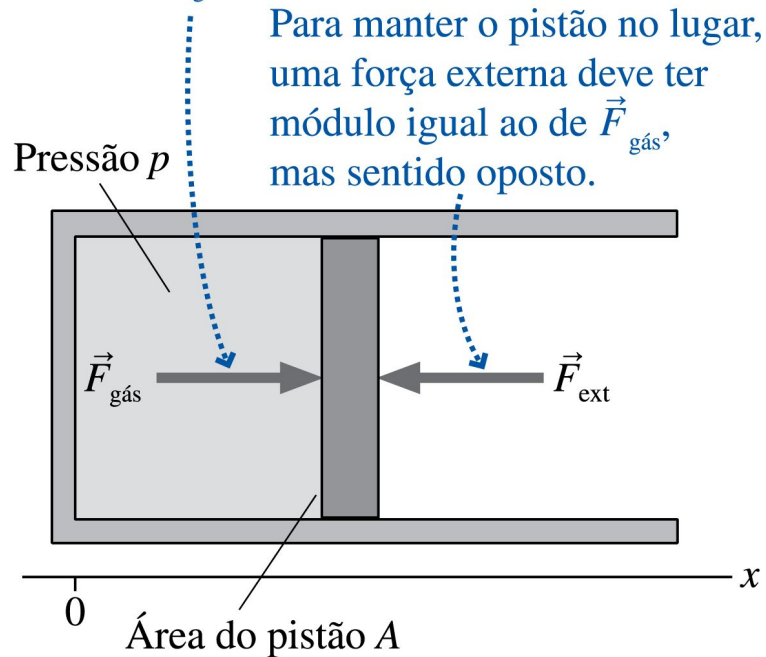
$$W > 0$$

$$Q < 0$$



Trabalho em processos quase-estáticos num gás ideal

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



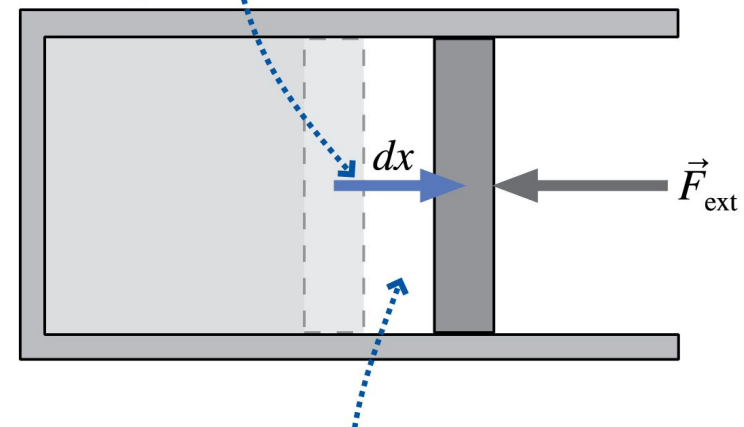
$$\rightarrow F_{\text{ext}} = P A$$

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 $(F_{\text{ext}})_x dx$ sobre o gás.



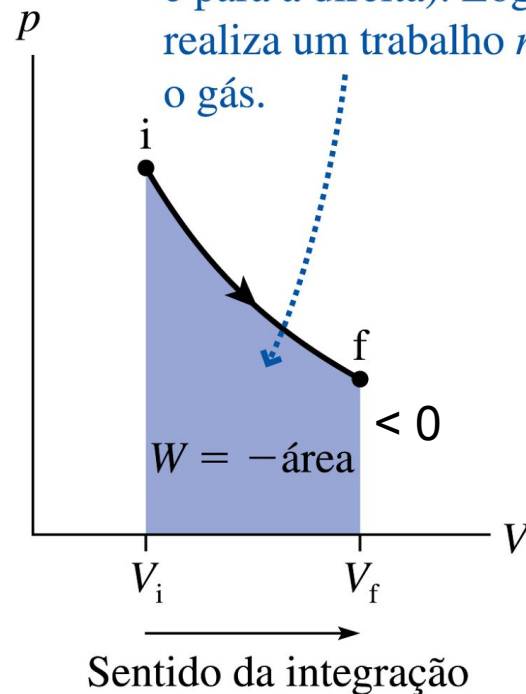
O volume varia em $dV = A dx$ durante o deslocamento dx do pistão.

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

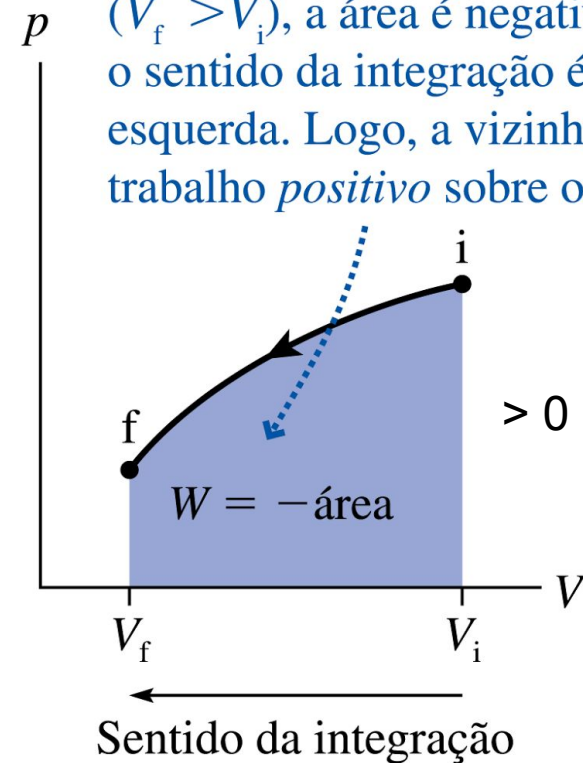
$$= - P dV$$

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.



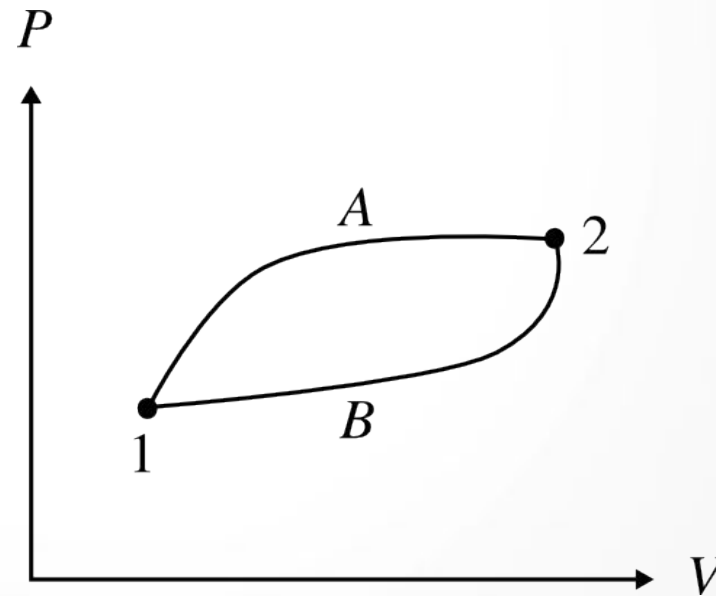
Trabalho das forças externas durante uma expansão (obs: válido tb p/ compressão):

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

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) $0 > W_B > W_A$

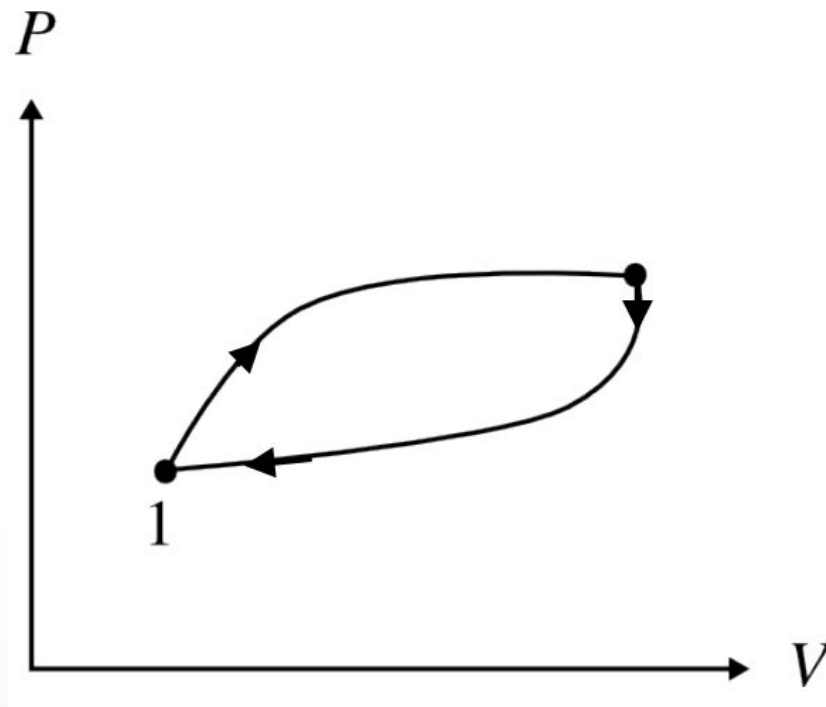


Teste Conceitual 7

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**).

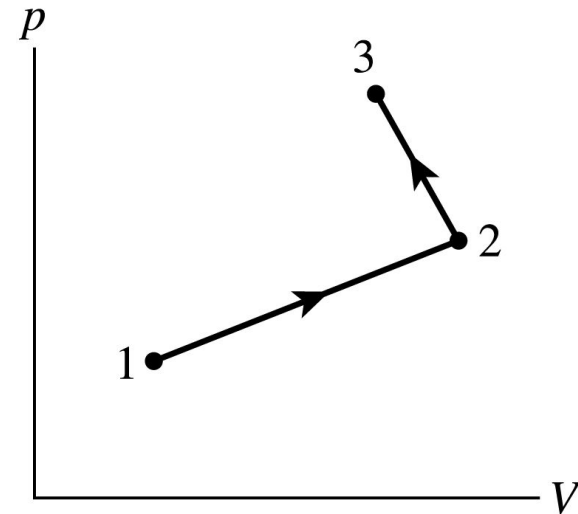
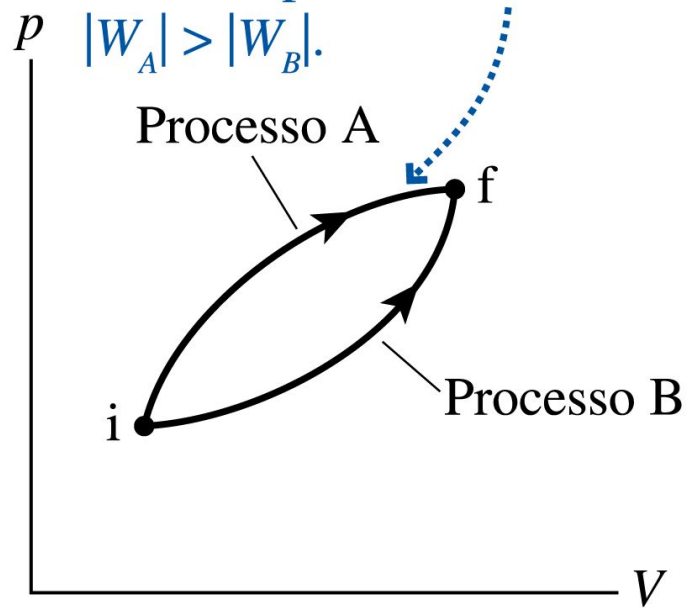
Considerando o ciclo inteiro, podemos dizer que o trabalho externo sobre o gás foi

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



O Trabalho depende do caminho a ser seguido!!!

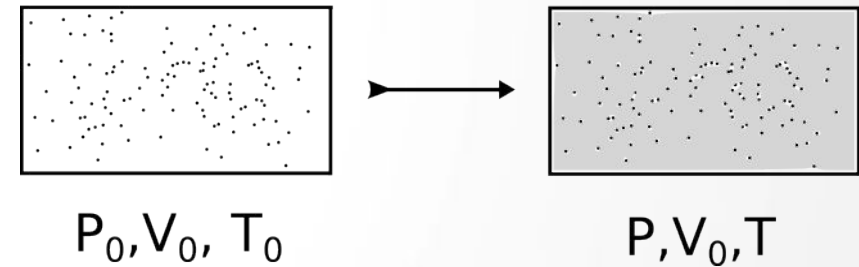
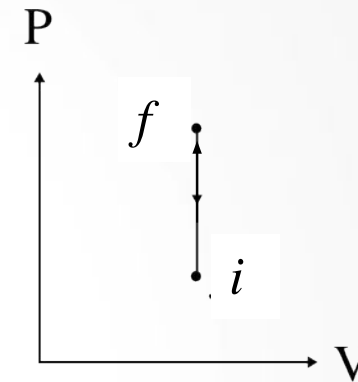
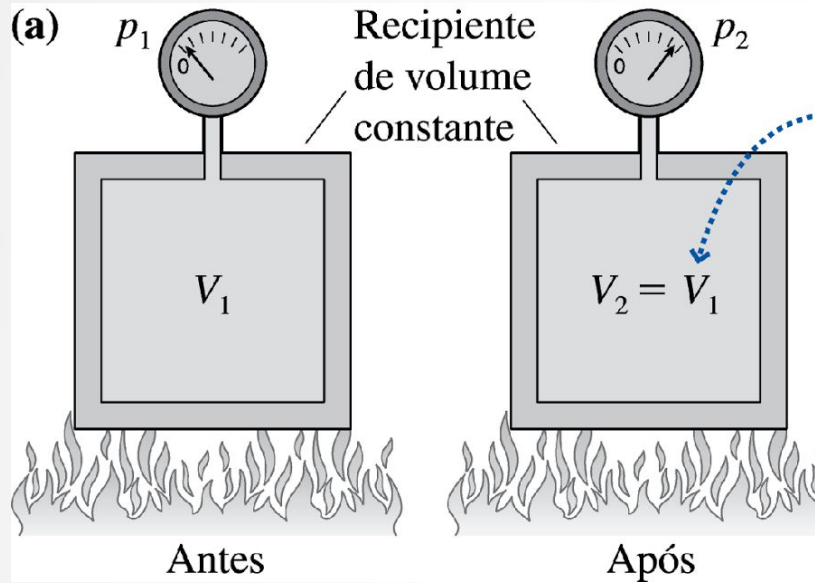
A área sob a curva do processo A é maior do que a área sob a curva do processo B. Portanto, $|W_A| > |W_B|$.



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

Processo Isocórico ou Isovolumétrico

$V = \text{constante}$



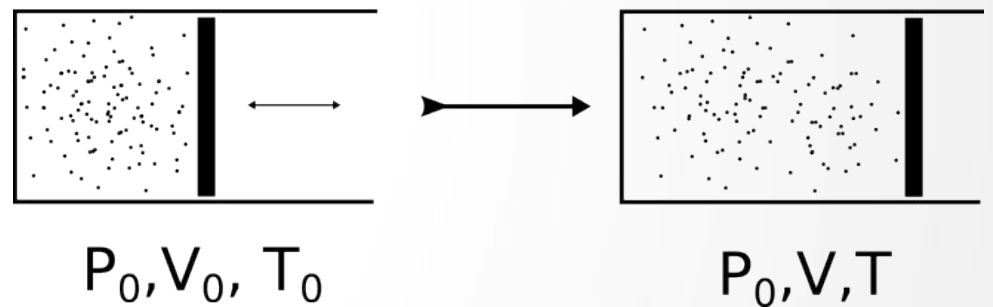
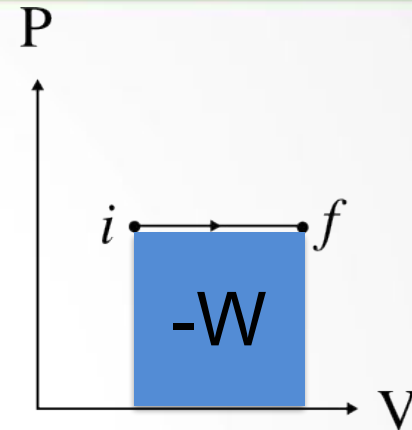
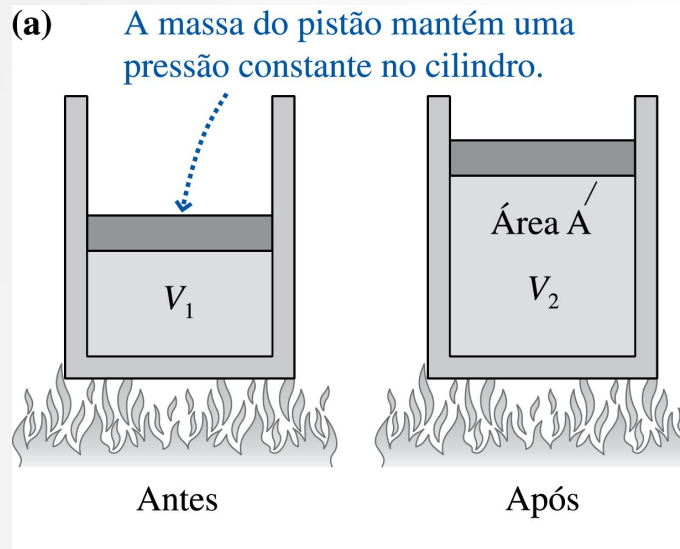
$$W_{\text{isocórico}} = 0$$

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 $P = \text{constante}$



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

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

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

Resp: $PV = nRT$: como P cte, então

$$\Delta V > 0 \longleftrightarrow \Delta T > 0 \longleftrightarrow 0 < \Delta E_{\text{term}} = W + Q$$

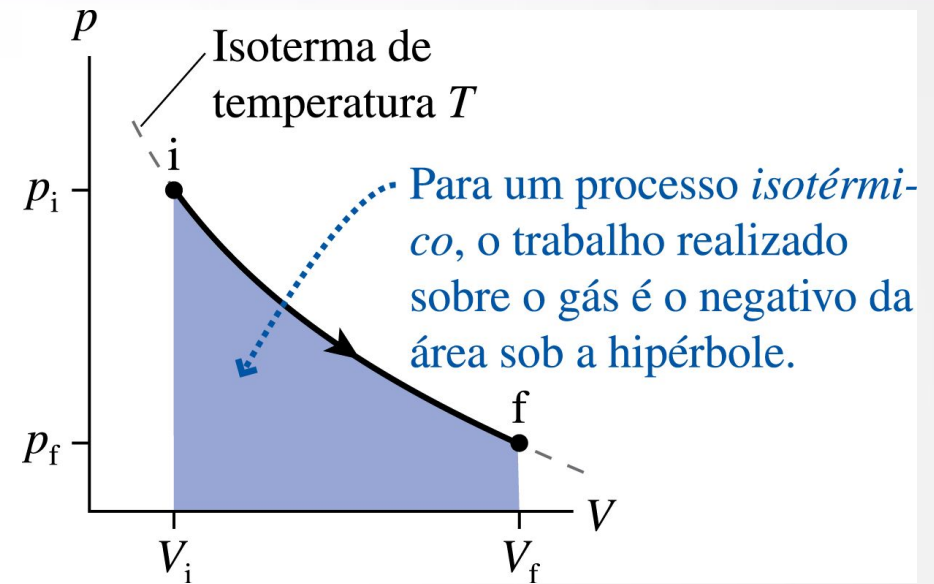
mas $W < 0$! Portanto $Q > 0$

Processo Isotérmico

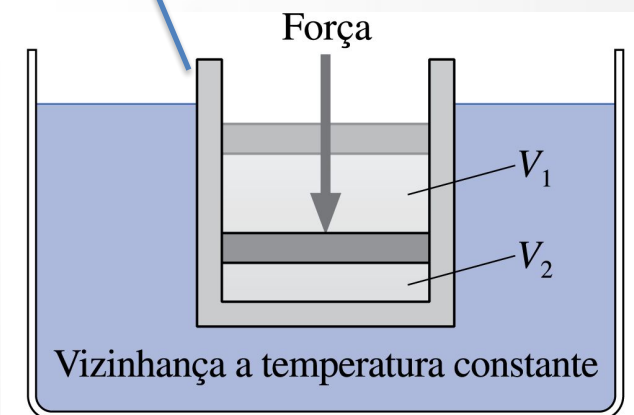
$$T = T_0 = \text{constante} \rightarrow P(V) = \frac{\text{const}}{V}$$

$$W = -nRT \int_i^f \frac{dV}{V}$$

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



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.

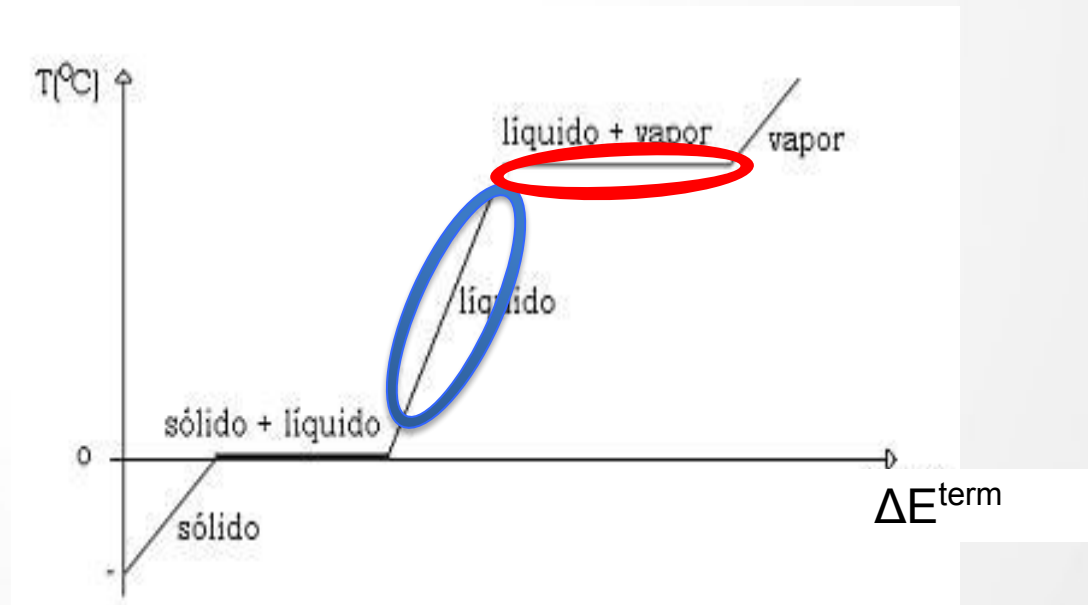
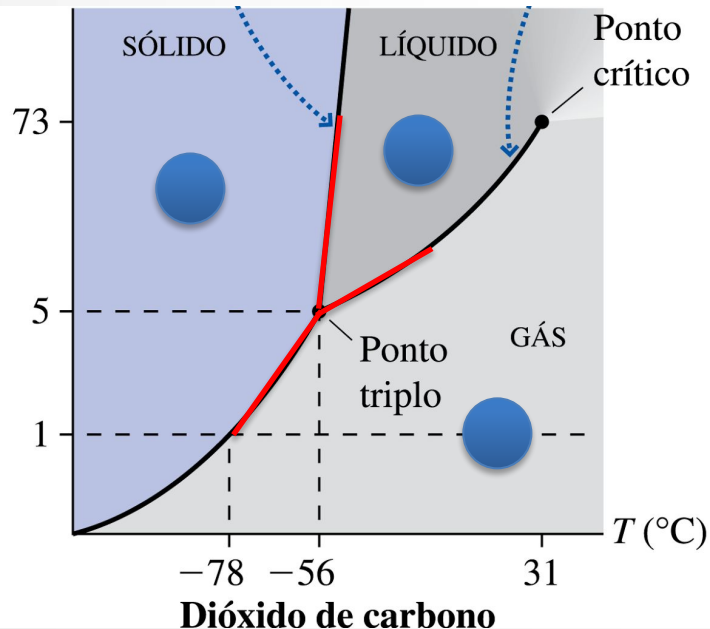
Propriedades Térmicas da Matéria

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

ΔE^{term}

em condições normais $\rightarrow \Delta T$

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



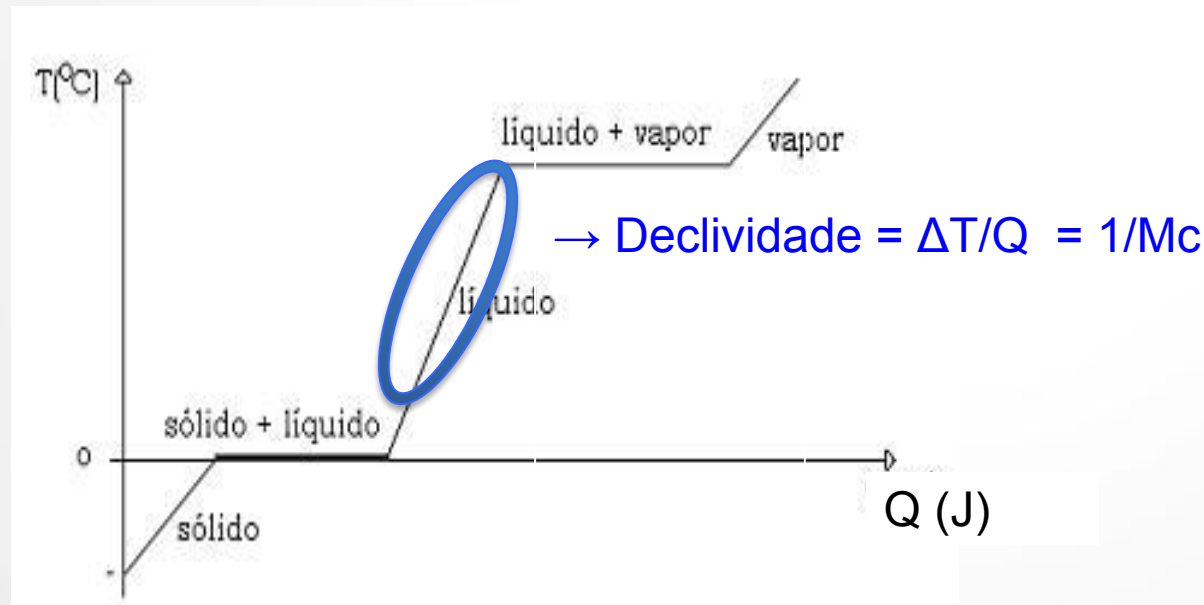
Propriedades Térmicas da Matéria

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 $\Delta T = 1\text{K}$ (ou 1°C) em 1,0 **kg** da substância.



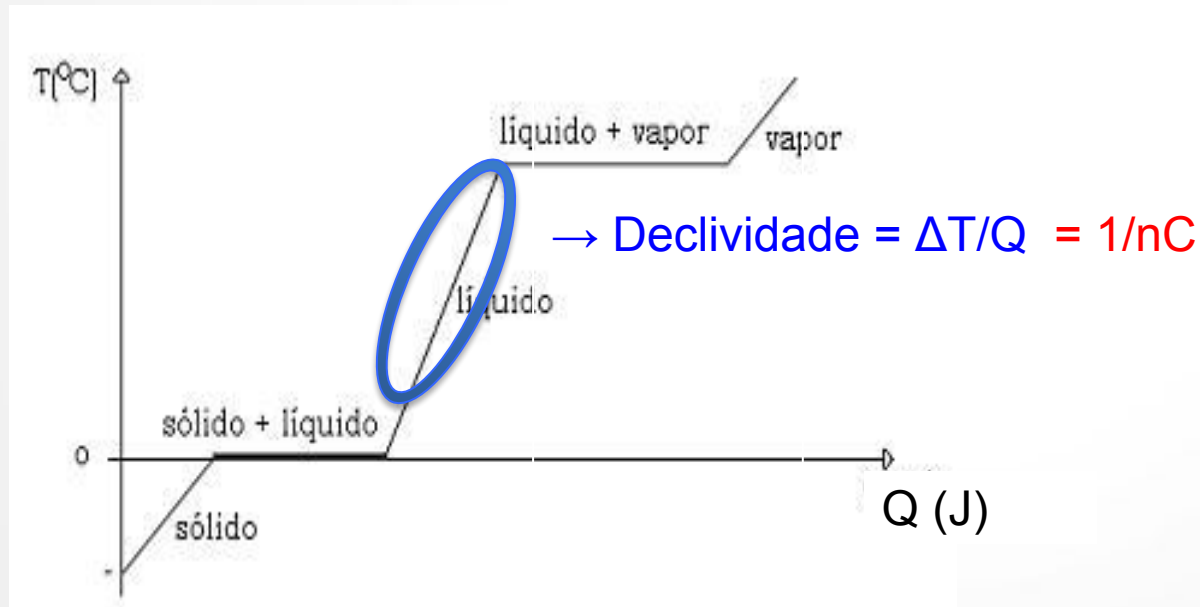
Propriedades Térmicas da Matéria

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°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

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

notem a
semelhança!
Veremos o
motivo no
 próx. capítulo

muito grande!

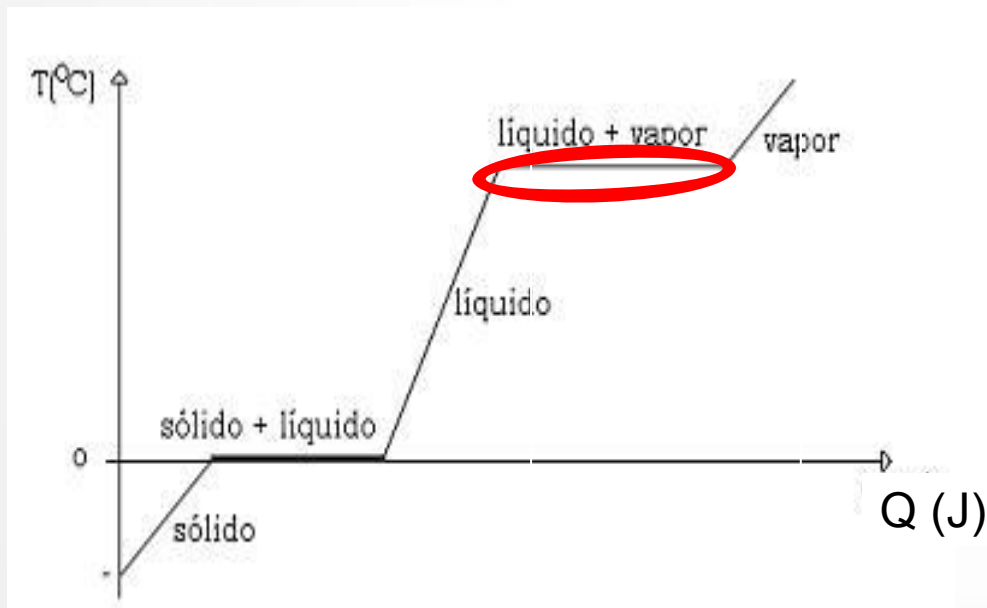
Propriedades Térmicas da Matéria

Caso 2: mudança de fase

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

$$Q = \pm ML$$

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



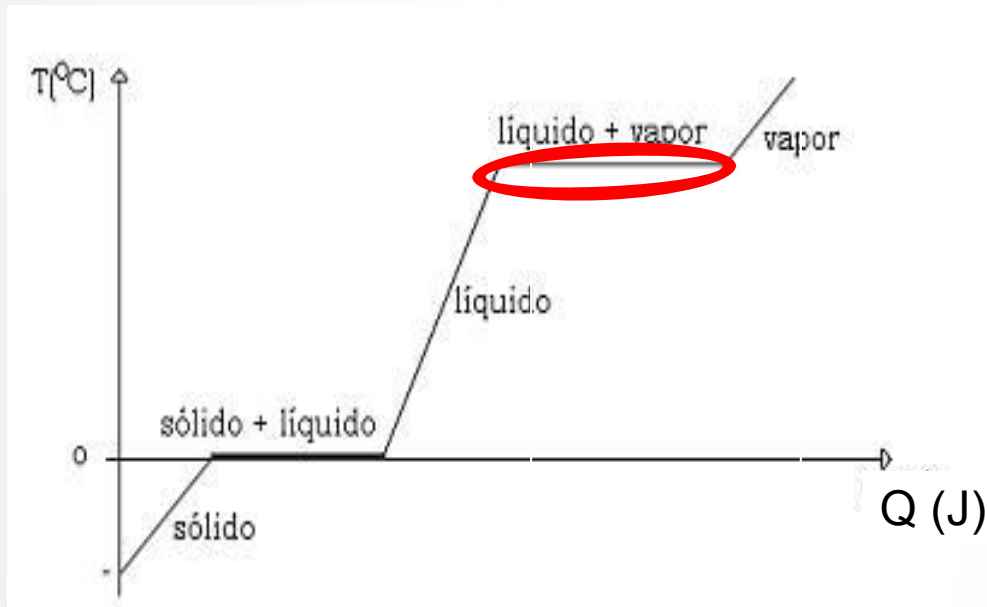
Propriedades Térmicas da Matéria

Caso 2: mudança de fase

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

$$Q = \pm ML$$

onde: **L = Calor Latente** (unid: J / mol 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

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

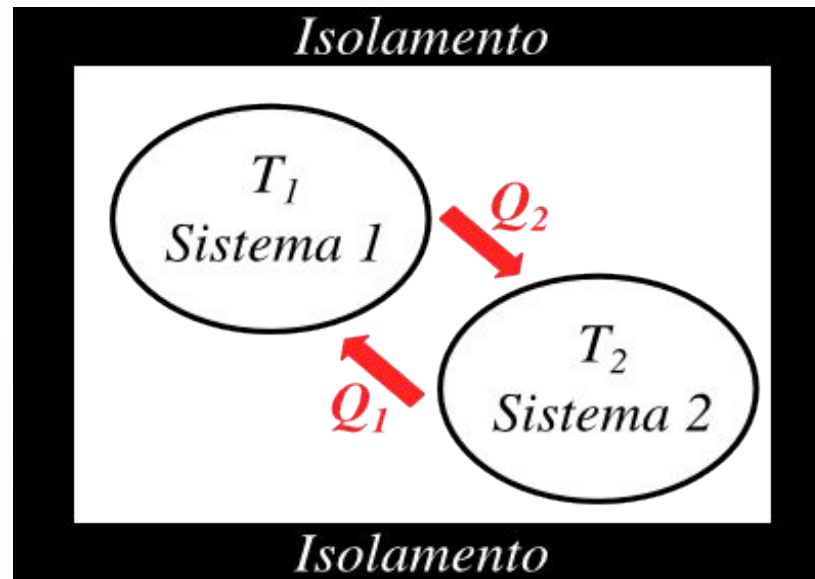
Propriedades Térmicas da Matéria

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 ₂)	−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)



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

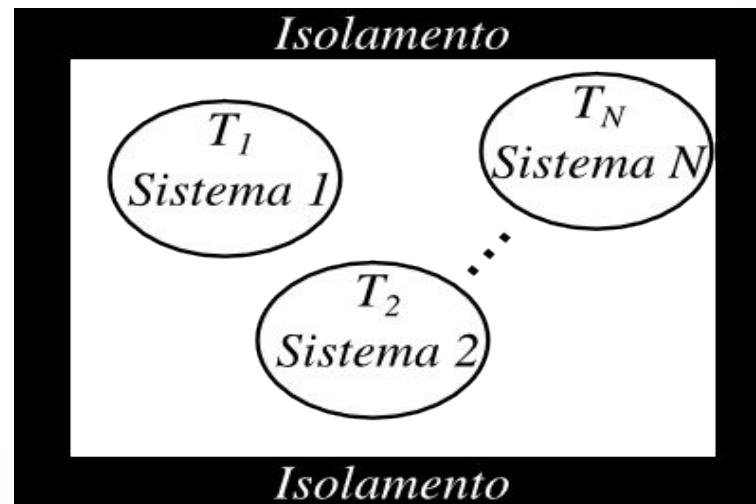
$Q_2 \rightarrow$ Qtdade de calor recebida pelo sistema 2

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

Propriedades Térmicas da Matéria

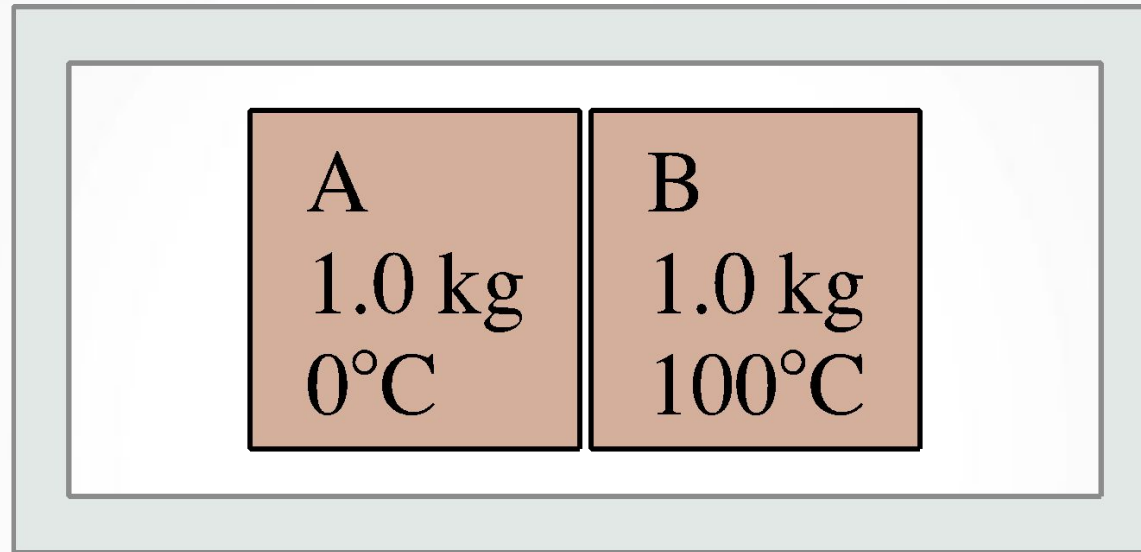
Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

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°C , enquanto repousa sobre uma mesa. Depois de ser completamente imerso na água, a temperatura estabiliza em $71,2^\circ\text{C}$.

- (A) A temperatura da água antes da medida era maior que $71,2^\circ\text{C}$.
- (B) A temperatura da água antes da medida era menor que $71,2^\circ\text{C}$.
- (C) A temperatura da água antes da medida era igual a $71,2^\circ\text{C}$.
- (D) impossível prever.

Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

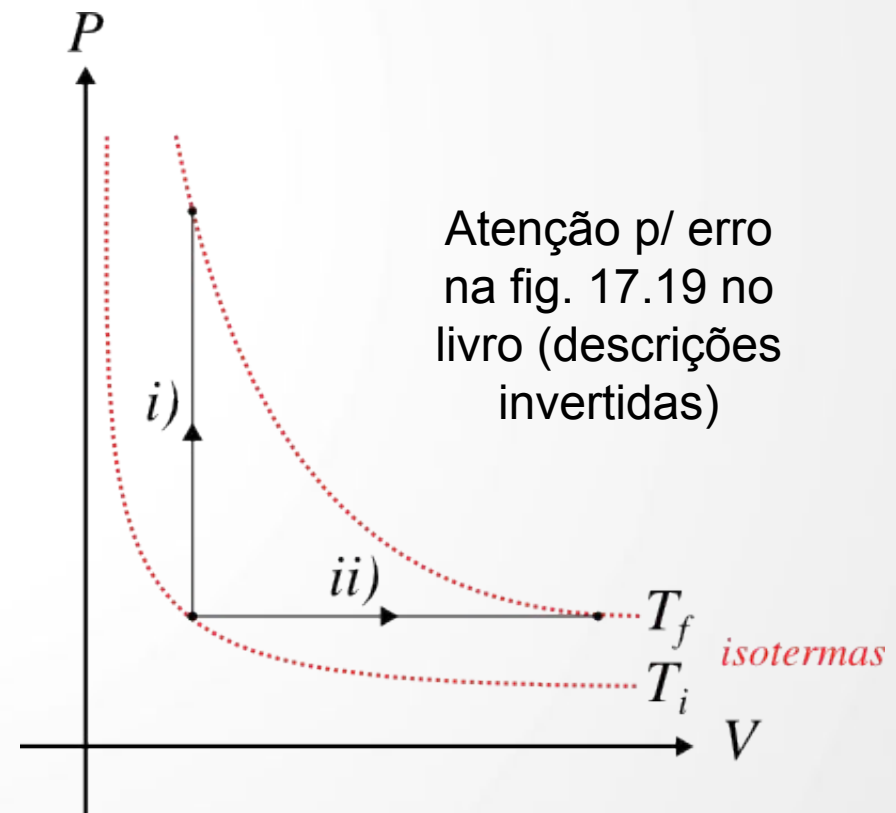
O mesmo gás pode receber calores diferentes em processos que envolvem a mesma variação de temperatura

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 $T_f > T_i$:

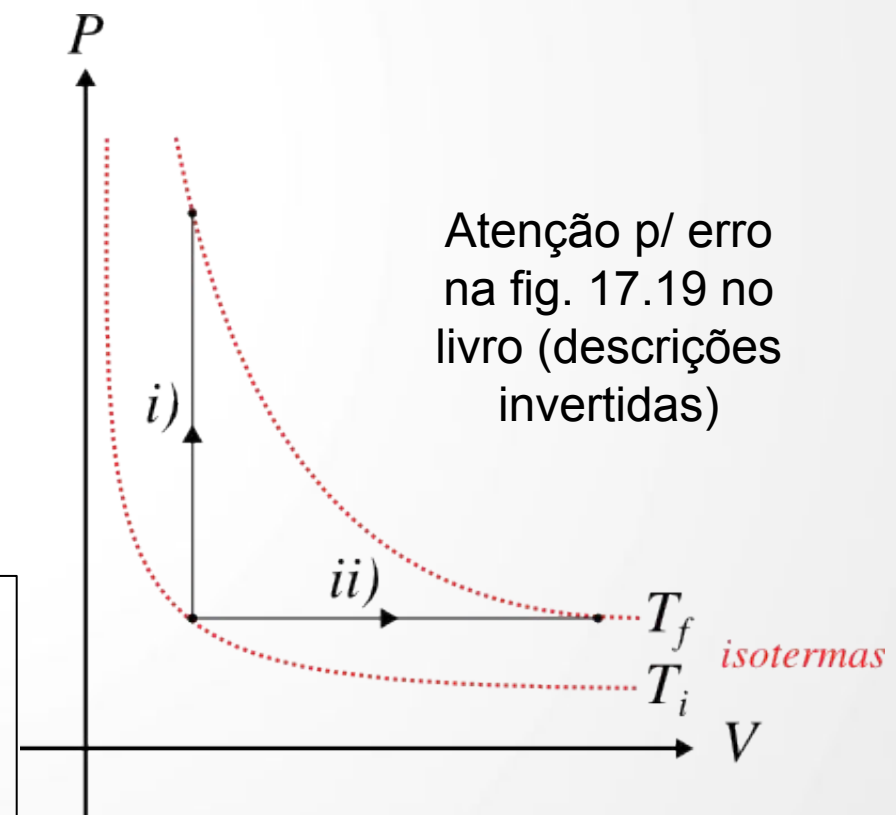
i) Processo a V cte: calor $Q_{(i)} = n C_V \Delta T$

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



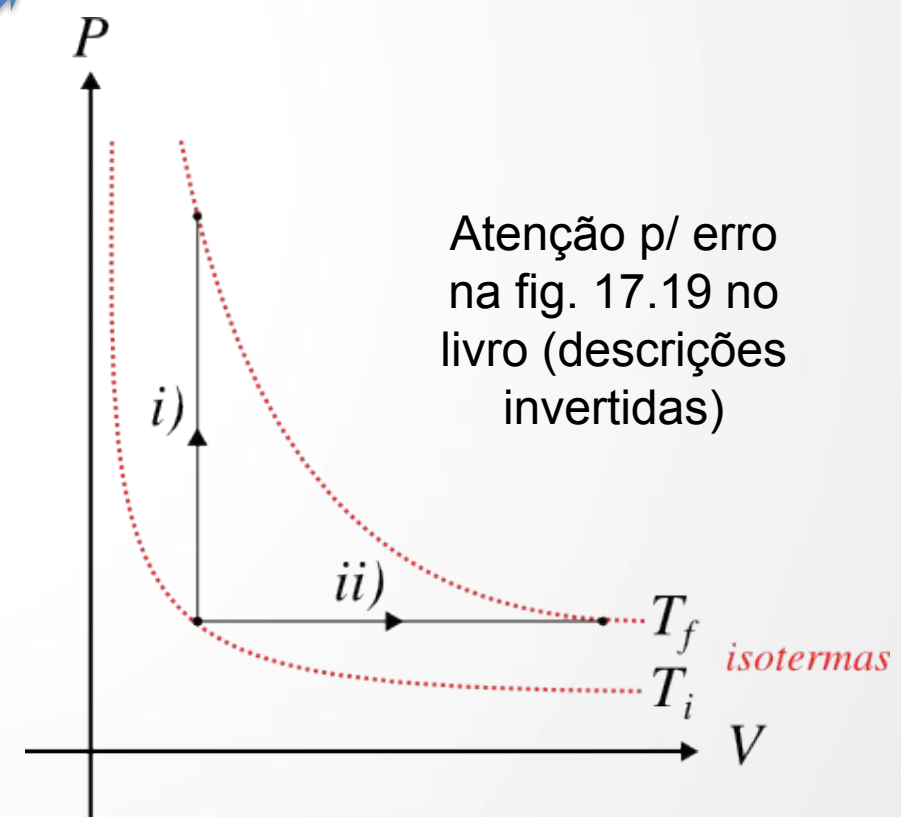
Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

28g de gás Hélio (^4He) e 28g de gás Nitrogênio (^{14}N)₂ 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	$C_P - C_V$
Gases monoatômicos			
He	20,8	12,5	8,3
Ne	20,8	12,5	8,3
Ar	20,8	12,5	8,3
Gases diatômicos			
H ₂	28,7	20,4	8,3
N ₂	29,1	20,8	8,3
O ₂	29,2	20,9	8,3

Um mol de gás Hélio (^4He) 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°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 $20^\circ C$ 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 ΔT .

Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

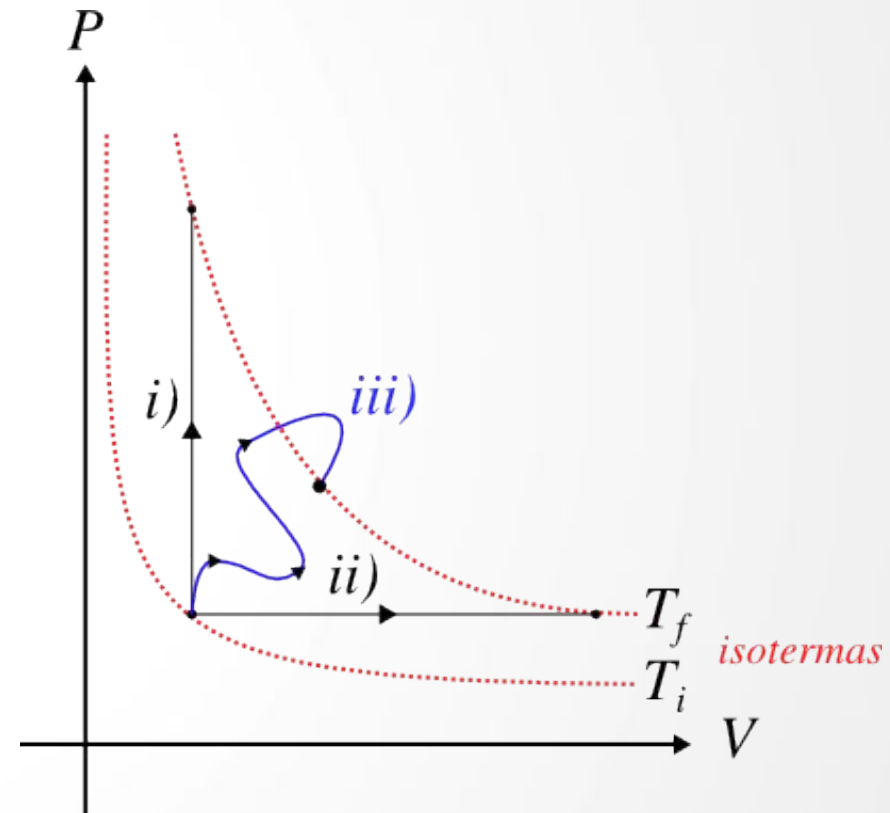
De modo geral, **Q (e tb C) dependerão do caminho.**

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 ΔE^{term}



Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

- Sabemos que ΔE^{term} é o mesmo em qualquer processo que envolva o mesmo ΔT

Por ex: (i), (ii) e (iii) têm o mesmo ΔE^{term}

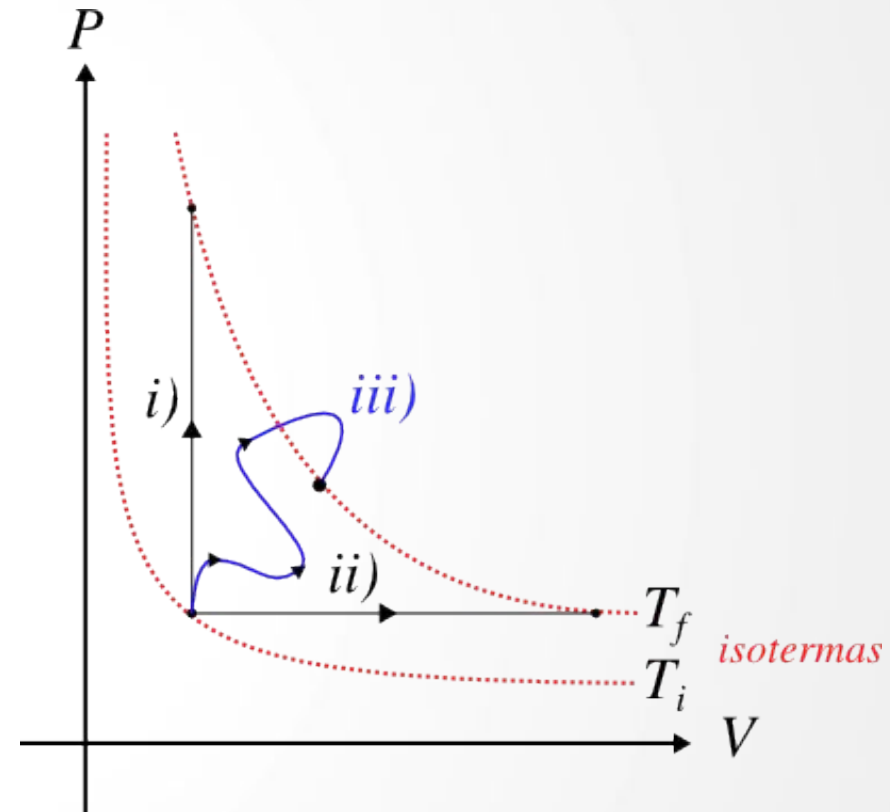
- Mas em (i), podemos escrever

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

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) :

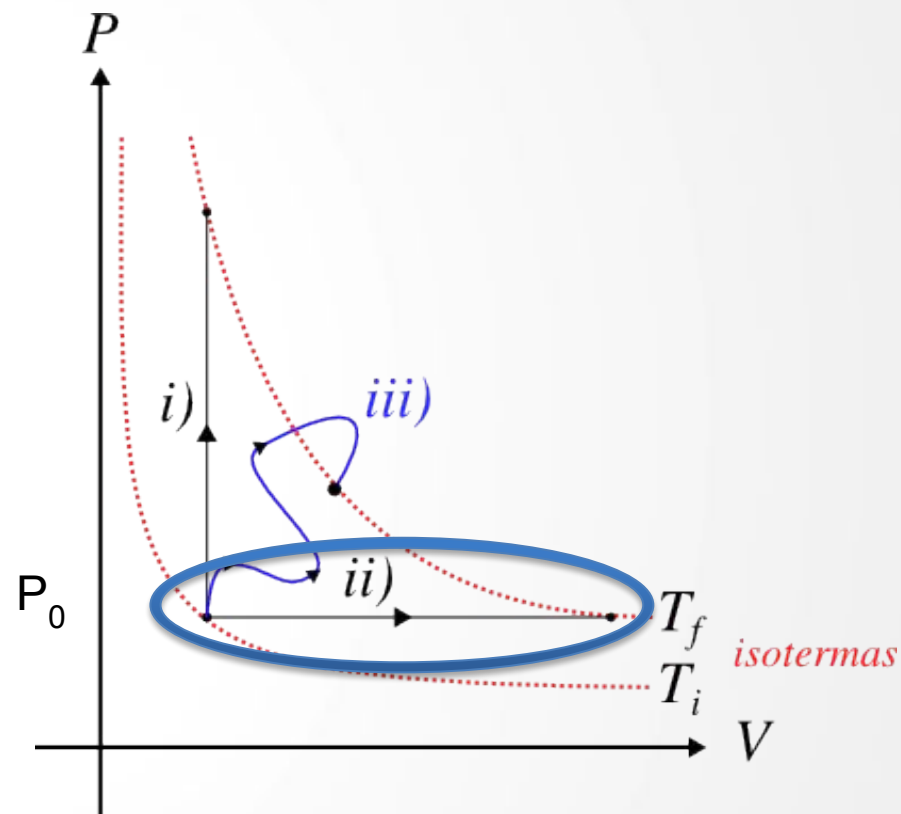
$$\begin{aligned}\Delta E^{\text{térm}} \text{ (ii)} &= Q_{\text{ii}} + W_{\text{ii}} \\ &= n C_p \Delta T - P_0 \Delta V\end{aligned}$$

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

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

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

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

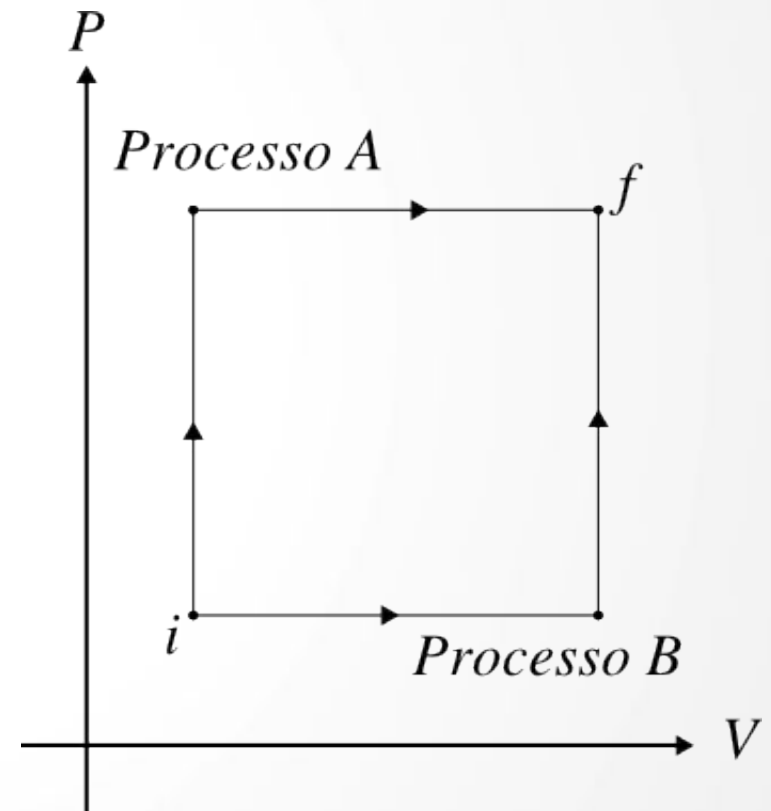


obs: veremos no cap 18 como calcular C_v (e portanto C_p) para gases ideais, obtendo boa concordância com os dados experimentais

Teste Conceitual 16

Com relação aos processos ao lado:

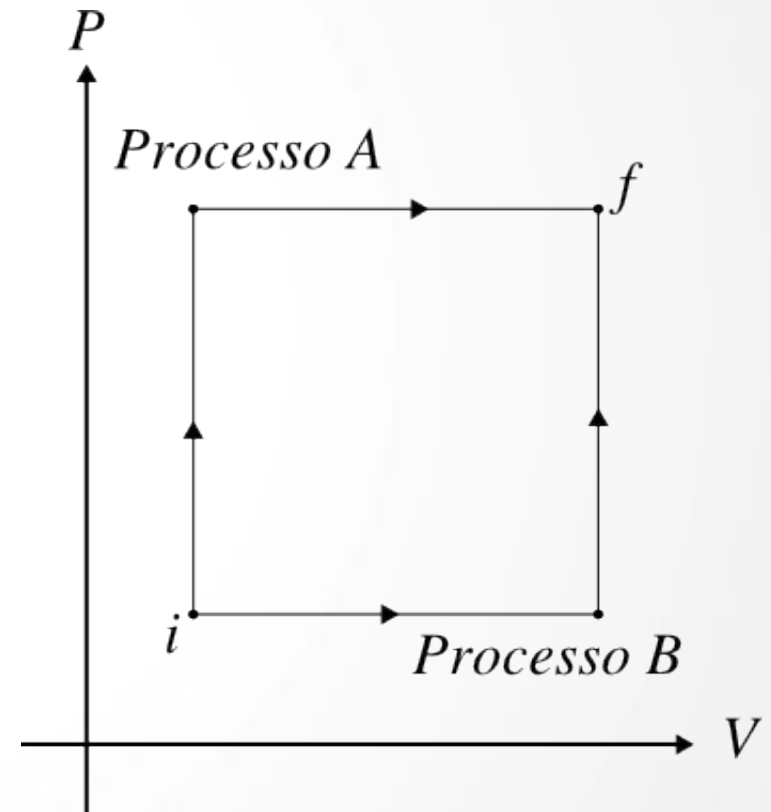
- (A) $Q_A > Q_B$
- (B) $Q_A < Q_B$
- (C) $Q_A = Q_B$
- (D) $Q_A \geq Q_B$



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) $Q_A \geq Q_B$

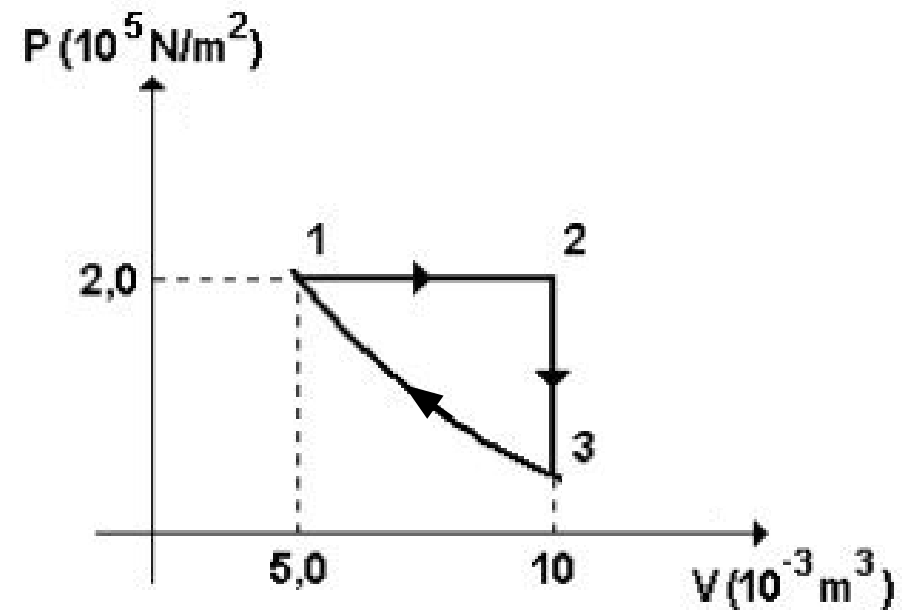


O calor depende do caminho!

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:

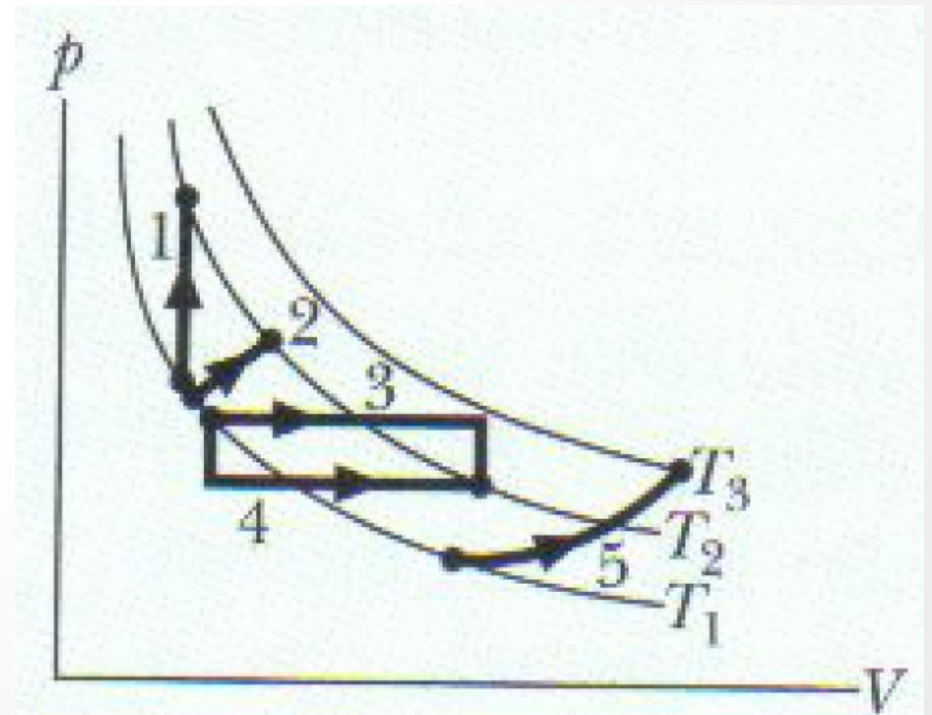
- (A) não é possível determinar sem saber qual é o gás.
- (B) igual a $\Delta E^{\text{térm}}$ entre os pontos 1 e 2.
- (C) igual a $\Delta E^{\text{térm}}$ entre os pontos 2 e 3.
- (D) igual a zero.



Teste Conceitual 18

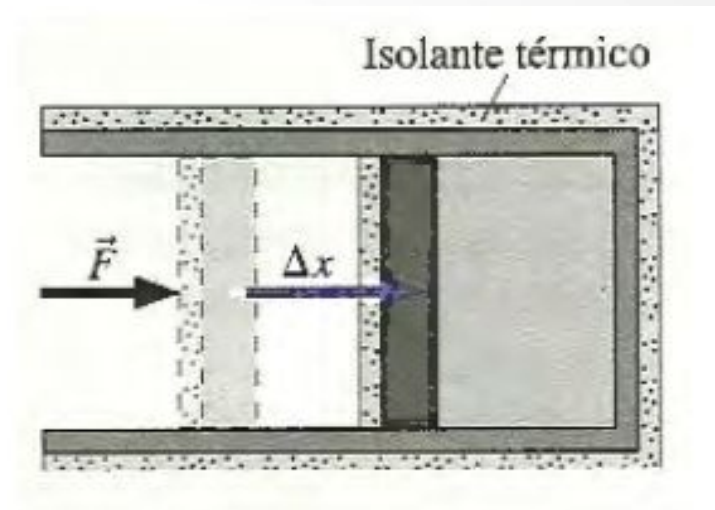
A figura mostra 5 trajetórias de um gás ideal em um diagrama PV. Ordene as variações da energia térmica do gás nos processos:

- (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

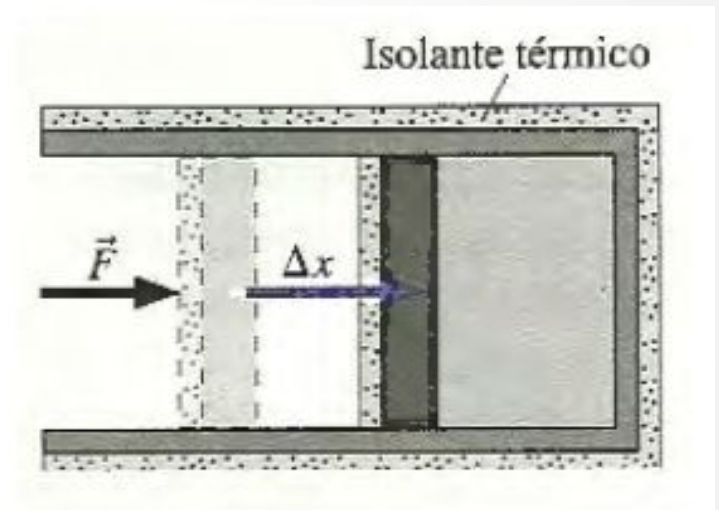
- São aqueles em que nenhum calor é trocado ($Q=0$)
- Situações onde ocorre:
 1. Quando o sistema está muito bem isolado termicamente
 2. Quando o tempo de interação do sistema com sua vizinhança é curto o suficiente para que não dê tempo de calor entrar ou sair



Teste conceitual 19

Numa compressão volumétrica adiabática. A temperatura do gás:

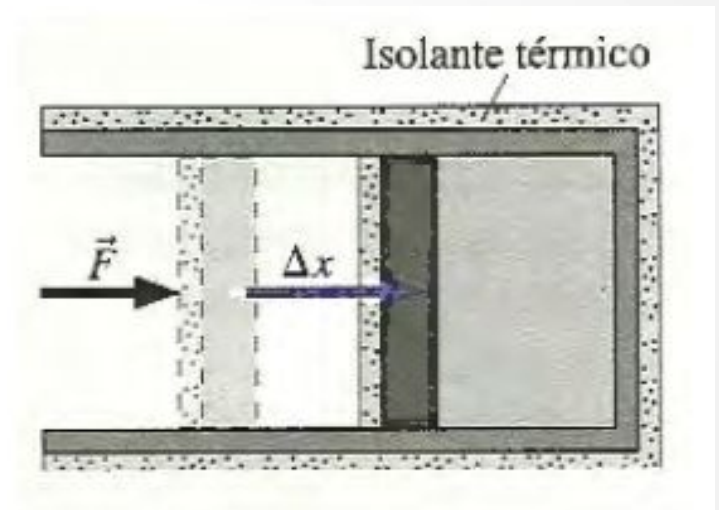
- A) aumenta
- B) diminui
- C) é zero
- D) nada se pode afirmar



Teste conceitual 19

Numa compressão volumétrica adiabática. A temperatura do gás:

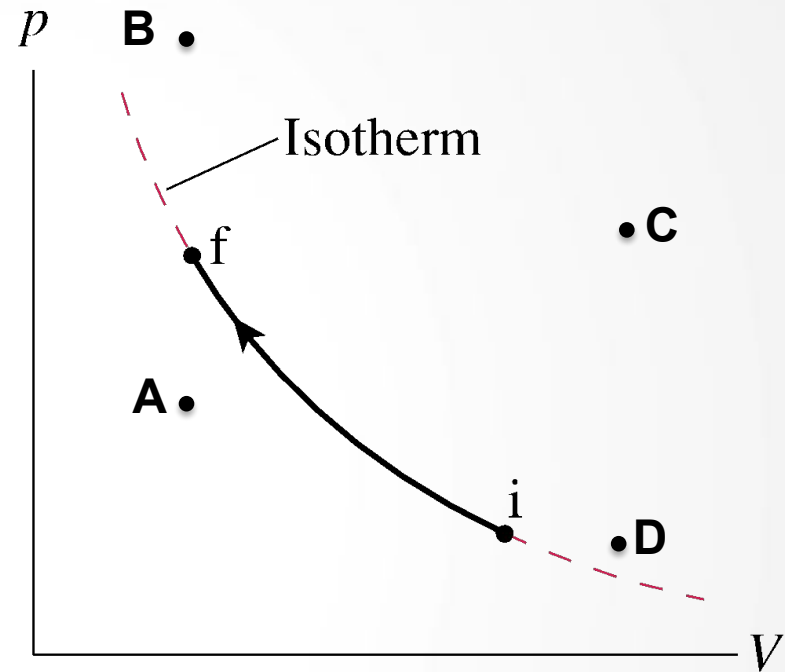
- A) aumenta
- B) diminui
- C) é zero
- D) nada se pode afirmar



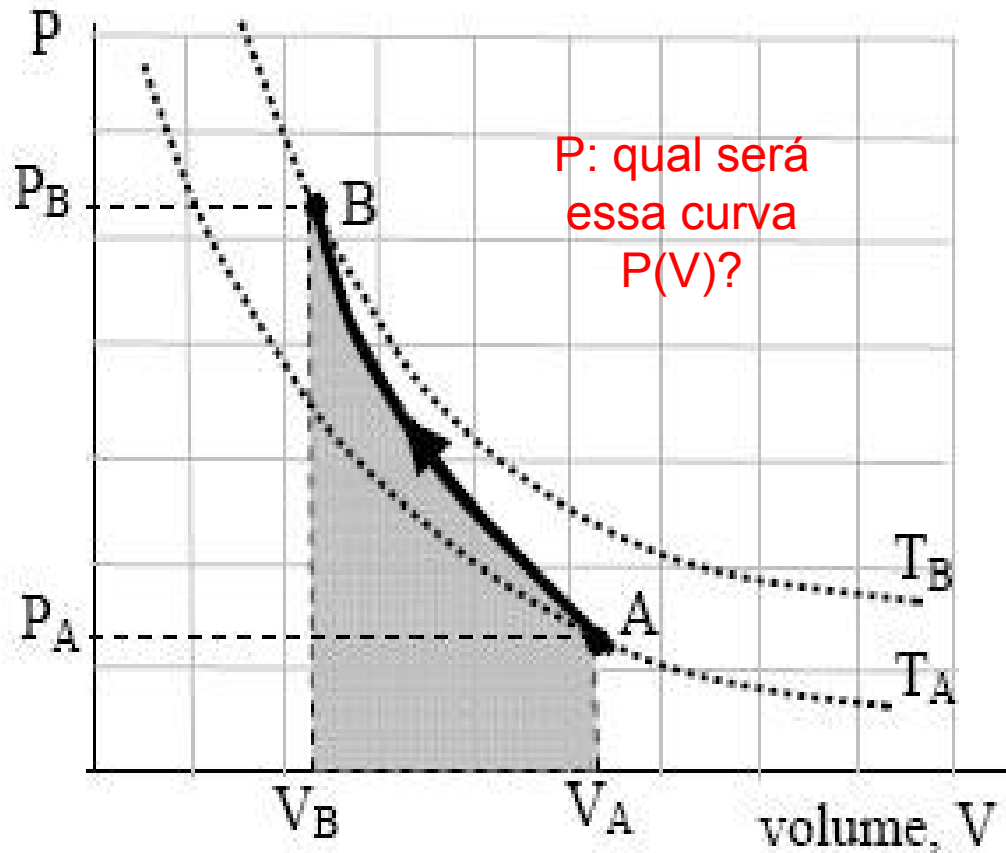
E se fosse uma expansão volumétrica adiabática?

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?

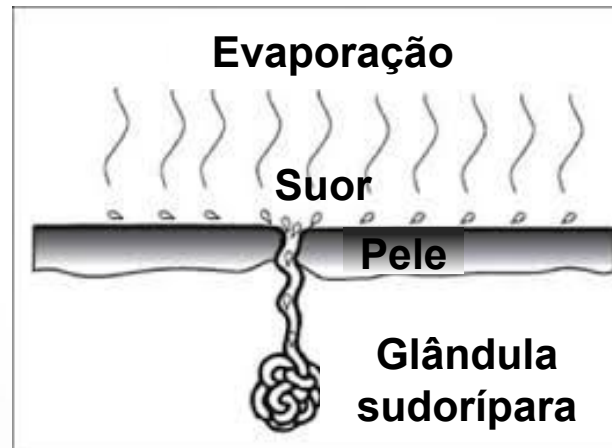
4 Mecanismos:

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

Mecanismos de transferência de Calor

Evaporação

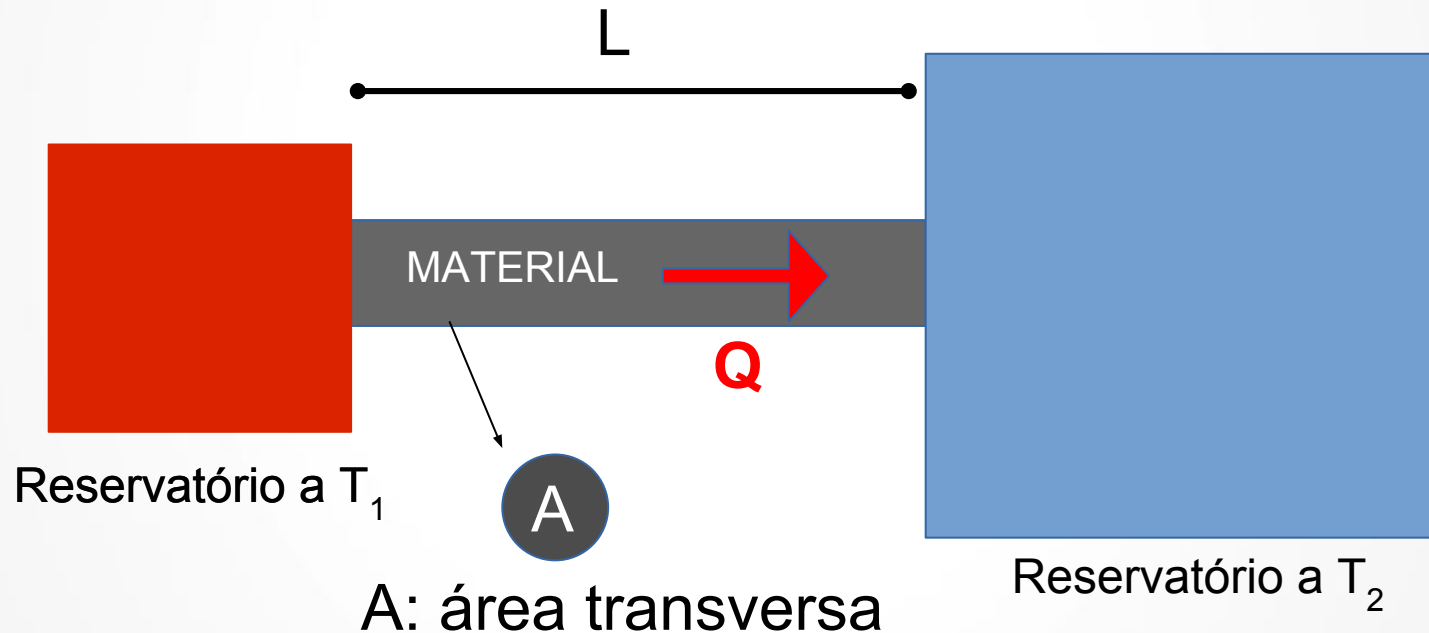
Transferência de calor através da mudança de fase de um líquido para vapor, o qual em seguida escapa, levando embora a energia absorvida. Também **envolve transporte de massa**.



Mecanismos de transferência de Calor

Condução

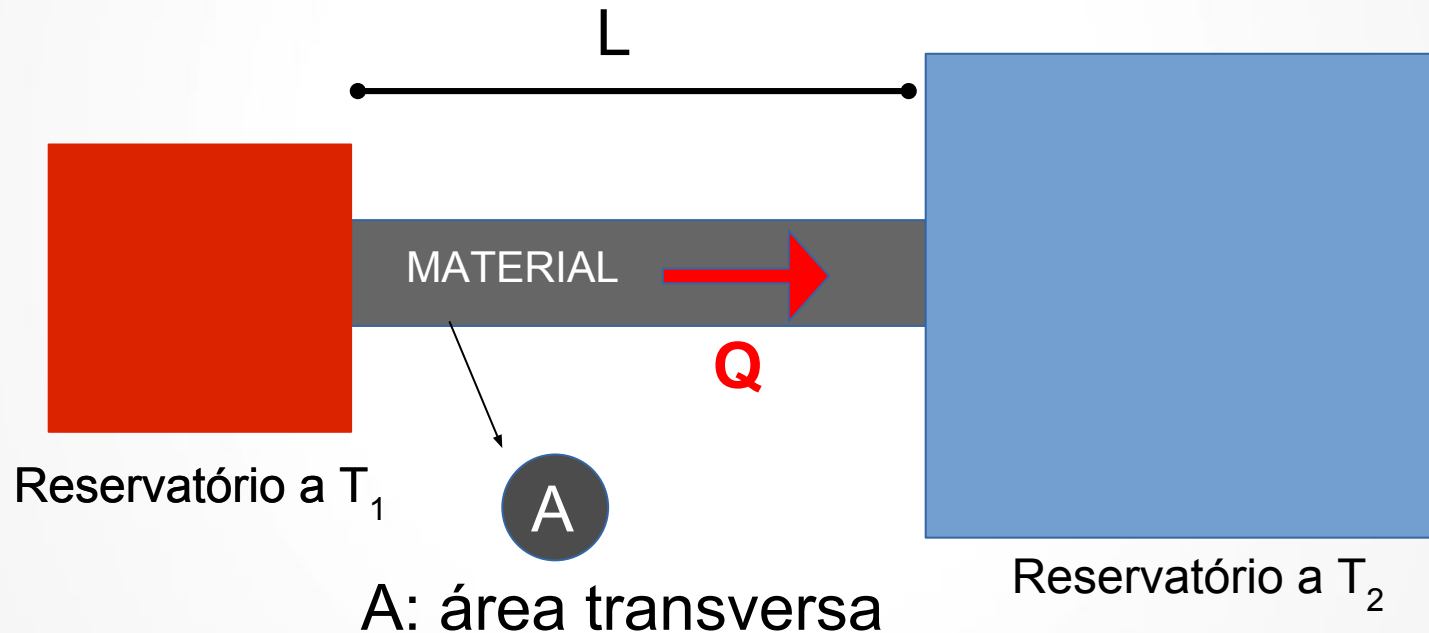
Transferência de calor através das vibrações de um meio material (**sem transporte de massa**) devido a uma ΔT .



Mecanismos de transferência de Calor

Condução

Transferência de calor através das vibrações de um meio material (**sem transporte de massa**) devido a uma ΔT .



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

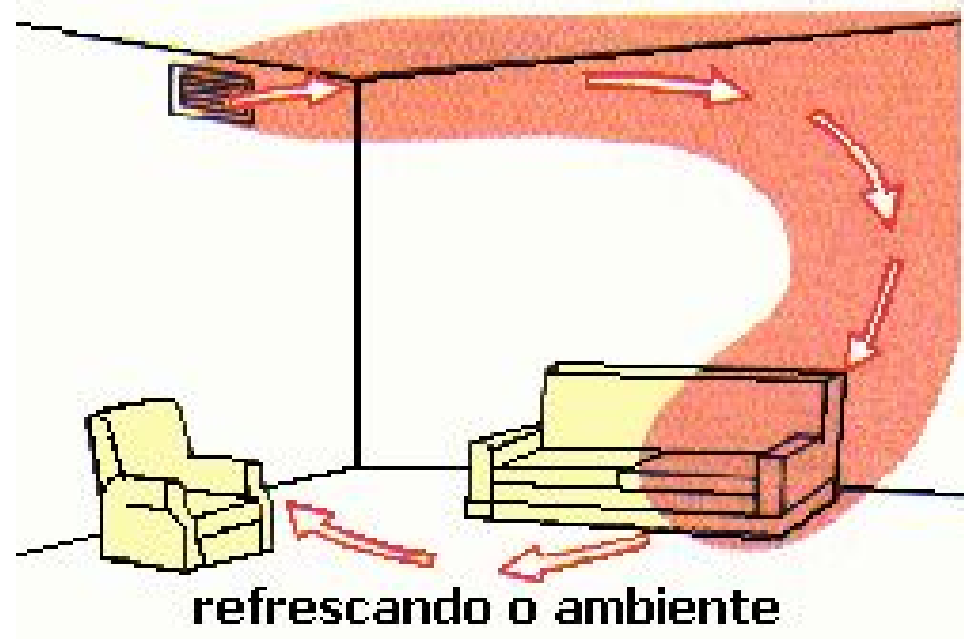
$$\frac{Q}{\Delta t} = k \frac{A}{L} \Delta T$$

Mecanismos de transferência de Calor

Convecção

Transferência de calor através de um meio material (**com transporte de massa**) devido a uma ΔT .

Ocorre somente nos fluidos!



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

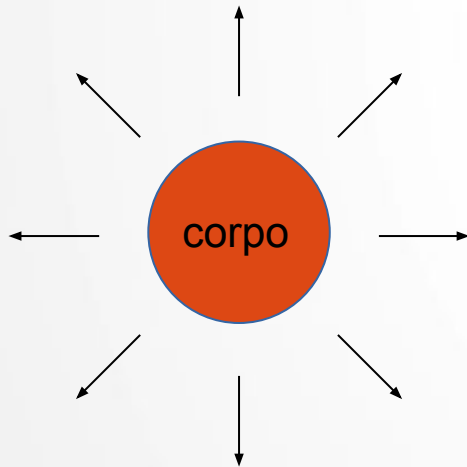
obs: análise quantitativa é muito complicada (turbulência...)

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!

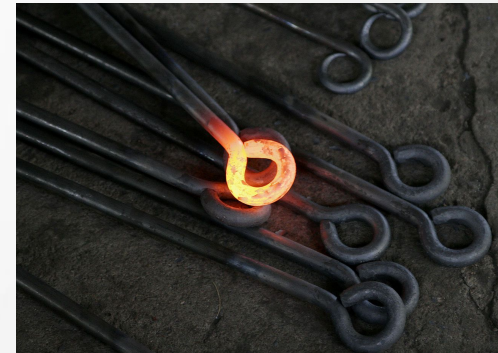


As frequências (cores) irradiadas dependem da temperatura do corpo.

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

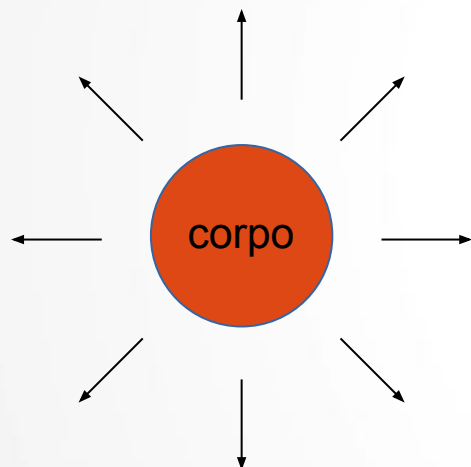
(obs: na prática ele nunca é perfeito, então sempre há alguma condução)

- 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)

σ = 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 σ 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 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 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)?

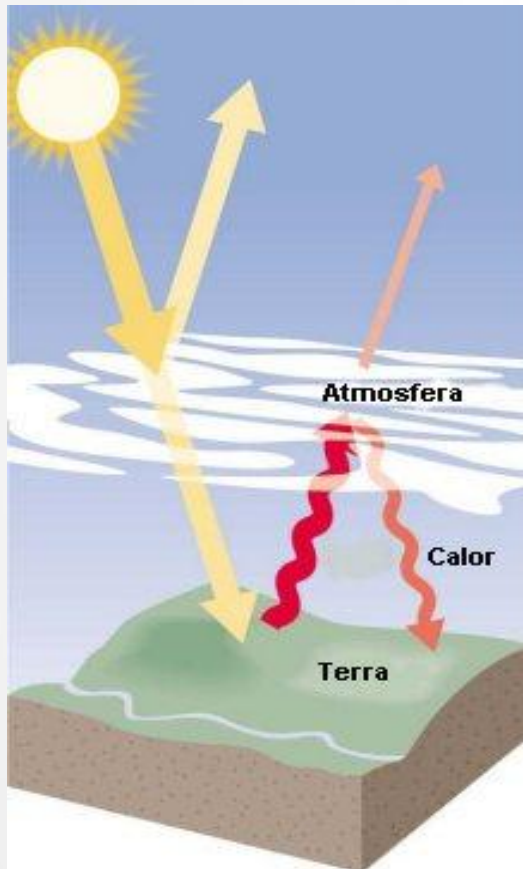
R: c) $1,7 \times 10^{17} \text{ W}$ d) **277K !**

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 (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