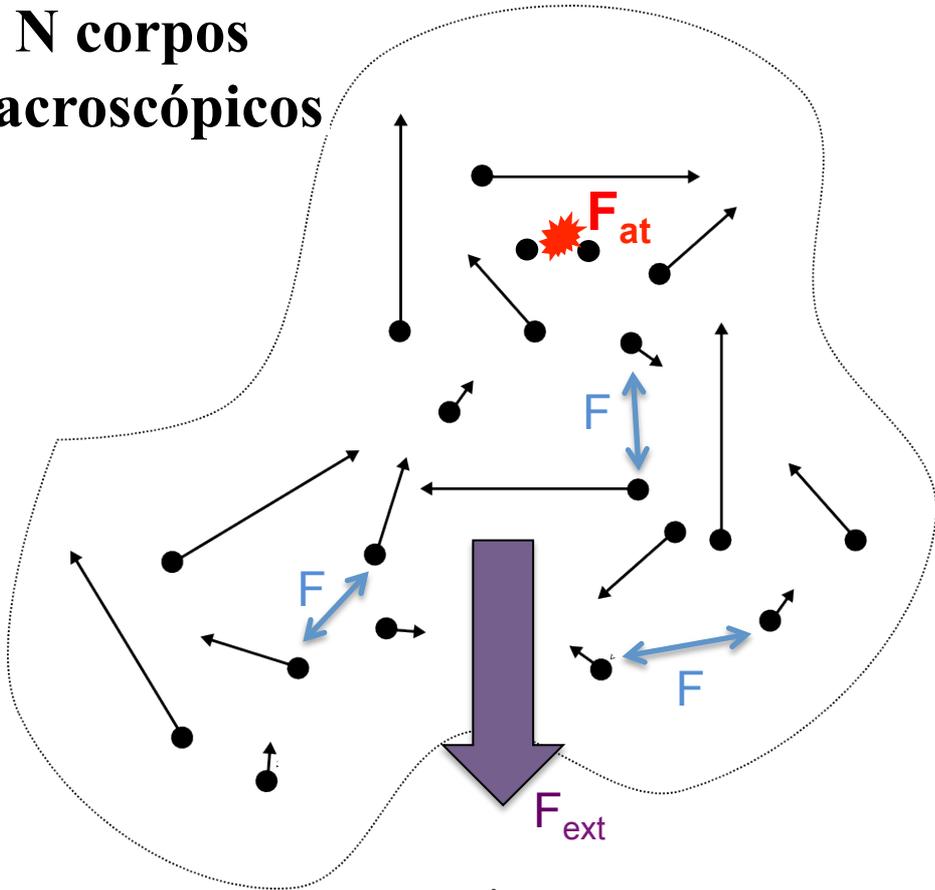


Cap 17: 1ª Lei da Termodinâmica

Recordando: conservação da energia (Fis I)

Sistema:
N corpos
macroscópicos



Num sistema de muitos corpos macroscópicos, a energia cinética total K varia de acordo com o trabalho de todas as forças que agem sobre e entre os corpos

$$\Delta K = W_{tot}$$

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

trab. das forças
internas
conservativas

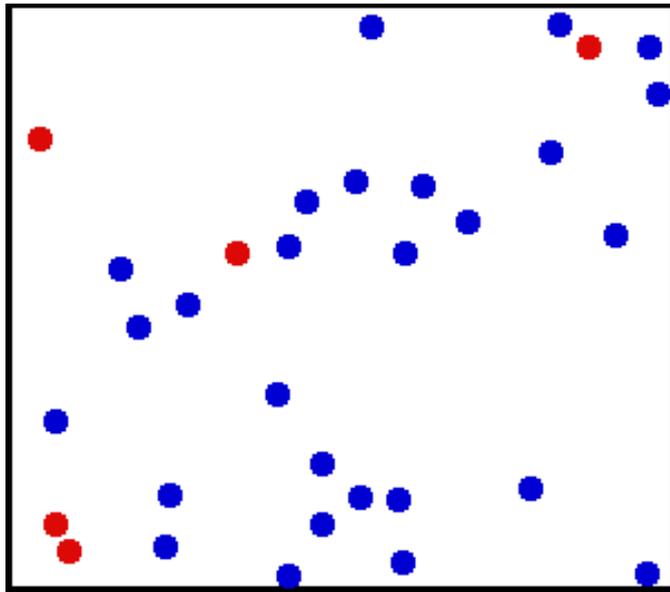
trab. das forças
internas
dissipativas

trab. das
forças
externas

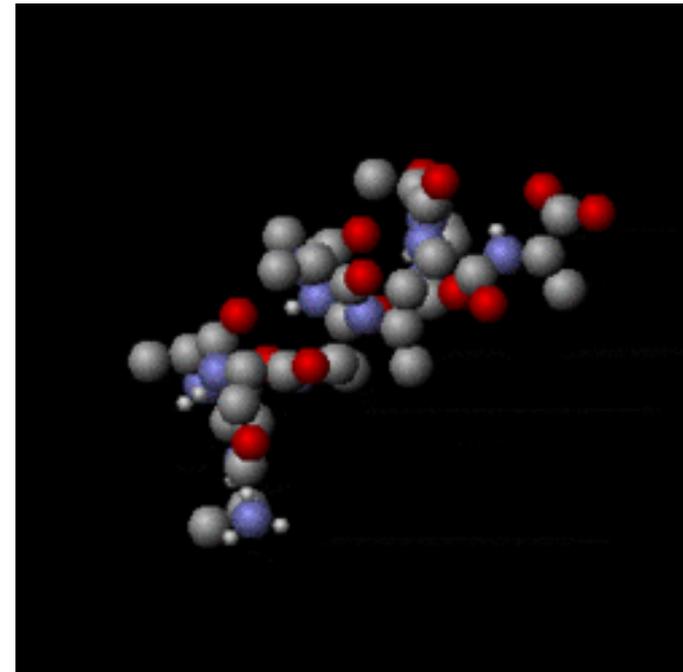
Energia térmica (E^{term})

- Energia armazenada nos movimentos dos constituintes microscópicos de um sistema macroscópico

Ex: num gás monoatômico, a energia cinética de suas partículas constituintes



Ex: num sólido, a energia cinética e potencial das vibrações das suas ligações interatômicas



Recordando: conservação da energia (Fis I)

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

Reescrevendo:

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

Ex: dois corpos sofrem um choque elástico. Inicialmente eles freiam, a força elástica realiza trabalho < 0 , e a energia pot. elástica **umenta**. Depois ocorre o processo contrário.

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

Ex: dois corpos se chocam/atritam de forma inelástica. A força entre eles realiza trabalho < 0 (pois eles freiam), e a sua energia térmica **umenta** (pois eles esquentam).

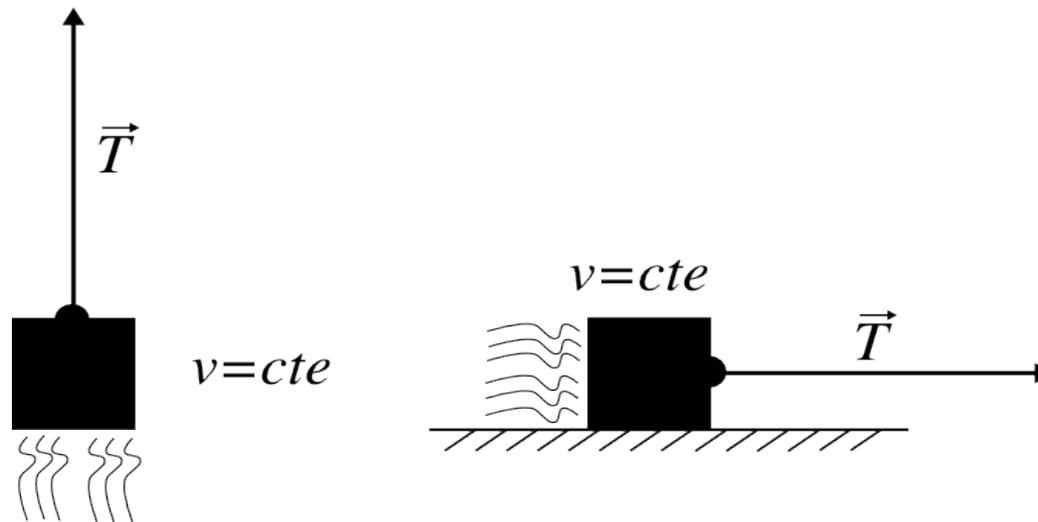
Obs: Atenção p/ sinal errado no livro!

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

$\Delta K + \Delta U$ + ΔE_{term}

Teste conceitual

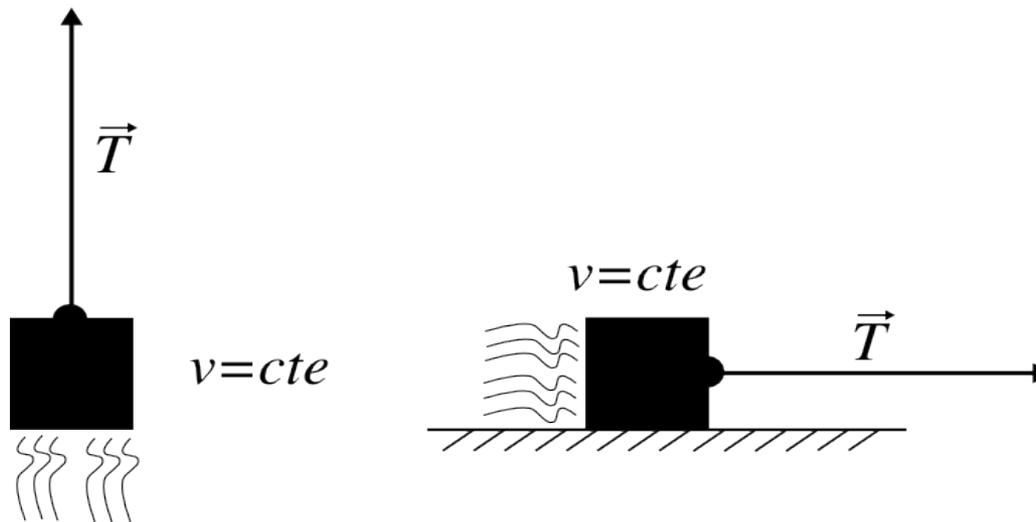
Uma tração externa é aplicada a um bloco de duas formas diferentes: na vertical, ou na horizontal ao longo de uma mesa áspera. Em ambos os casos o bloco se move com velocidade constante. O que podemos dizer sobre ΔE^{mec} e ΔE^{term} em cada caso?



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

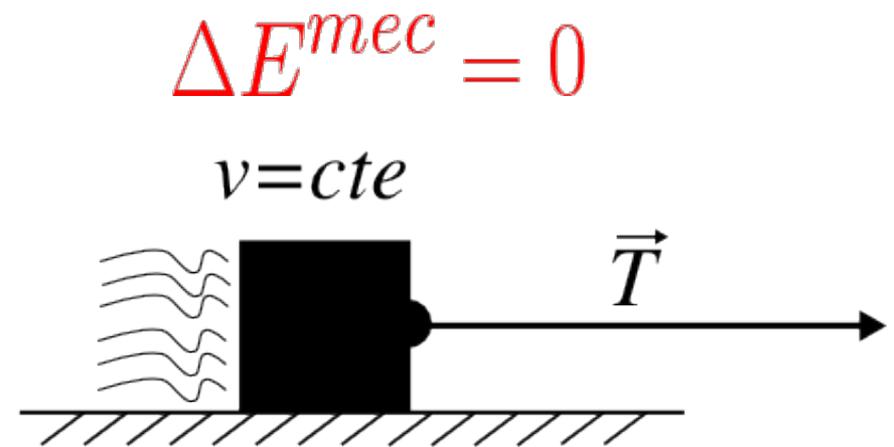
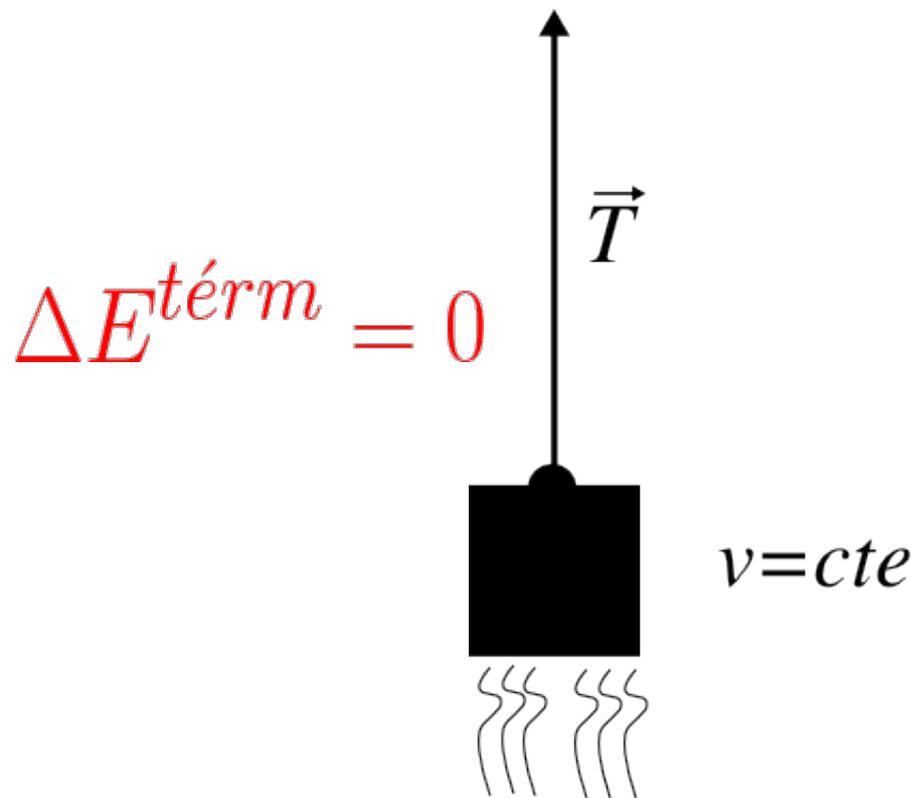
Teste conceitual

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 ΔE^{mec} e ΔE^{term} em cada caso?



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

Moral: trabalho externo pode ser convertido tanto em en. mecânica como em en. térmica (ou ambos!)

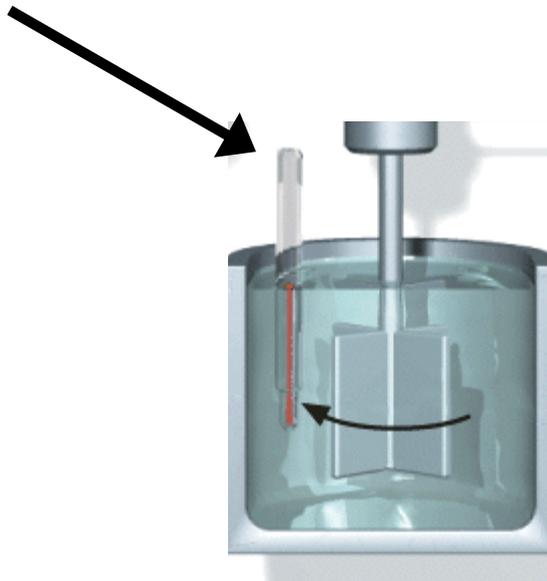


$$W_{ext} = W_T = \Delta E_{mec}$$

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

Porém: tb podemos variar E^{term} *sem realizar trabalho* ?

Termômetro

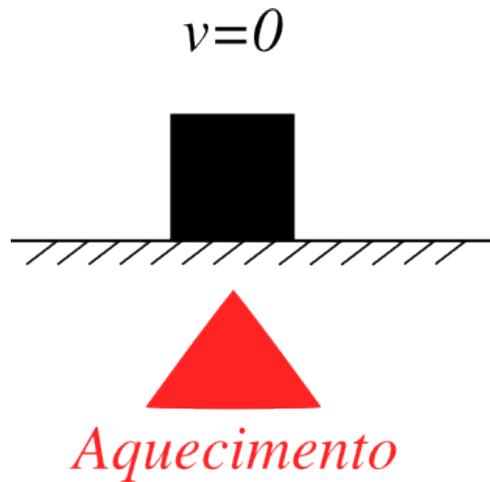


Sabemos que é possível aquecer um corpo (p. exemplo, água), colocando-o em contato térmico com outro corpo mais quente (T mais alta), ex: chama

Note que nesse processo estamos claramente aumentando E^{term} , mas $W_{\text{ext}} = \Delta E^{\text{mec}} = 0!$



Problema: esse processo não obedece a formulação da Conserv. de Energia feita acima!



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

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

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

Conclusão: a eq. de conserv. de energia que vimos acima está **incompleta**

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

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

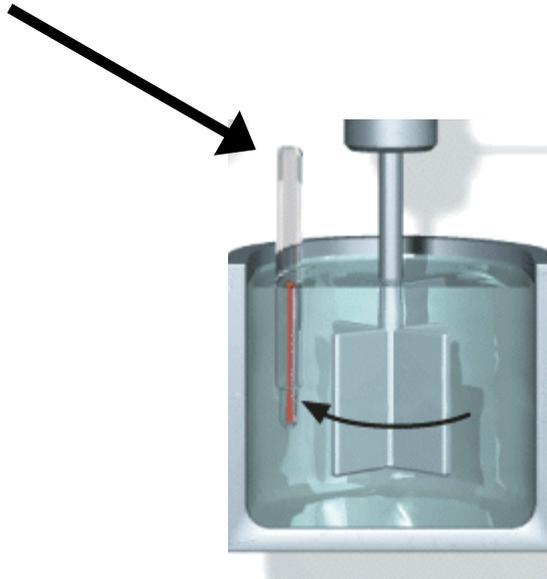
Mas... o que exatamente é calor? Como medi-lo?

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

Medindo calor

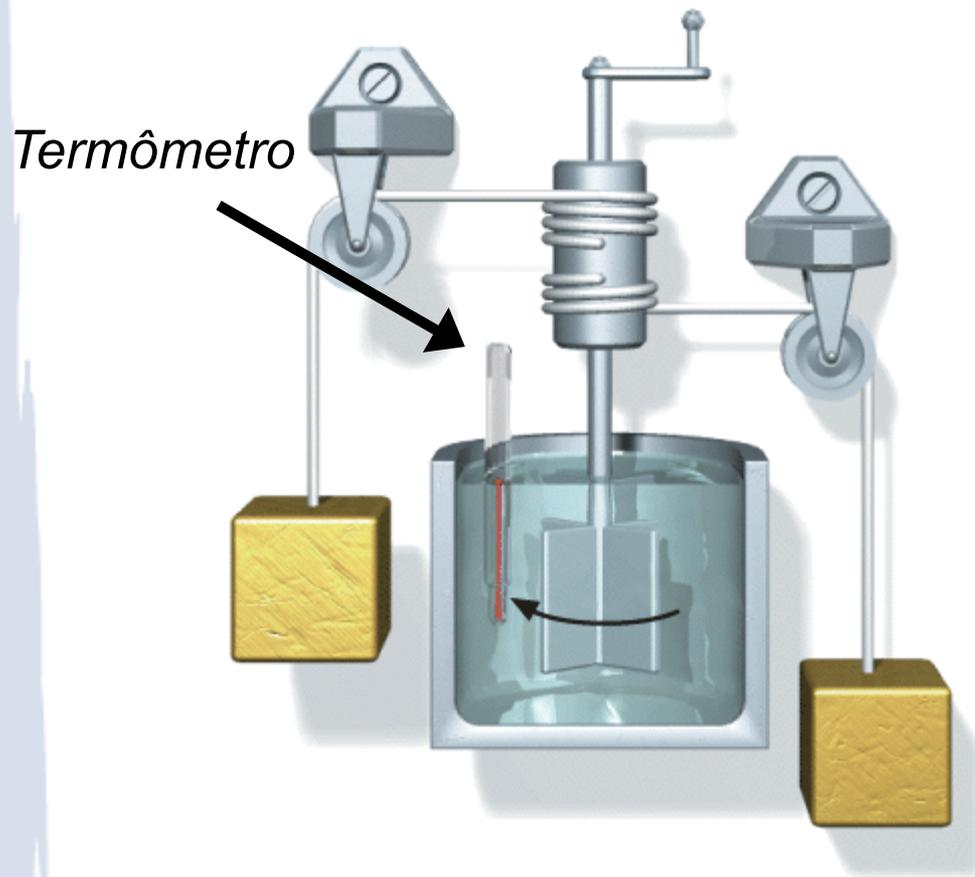
Termômetro



- Tomamos um 'corpo padrão' (p. ex: uma certa qtde de água)
- Aplicamos a ele calor de forma controlada e medimos a variação de temperatura do corpo.
- Def: **1 caloria** é a qtde de calor capaz de aumentar a temperatura de 1g de água em 1°C

P: como comparar essa medida com outras medidas de energia?

Experiência de Joule (~1840)



- Ideia: aquecer 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 acima 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 as componentes macroscópicas do sistema não variam seu estado mecânico, ou seja, onde $\Delta E^{mec} = 0$.

Neste caso:

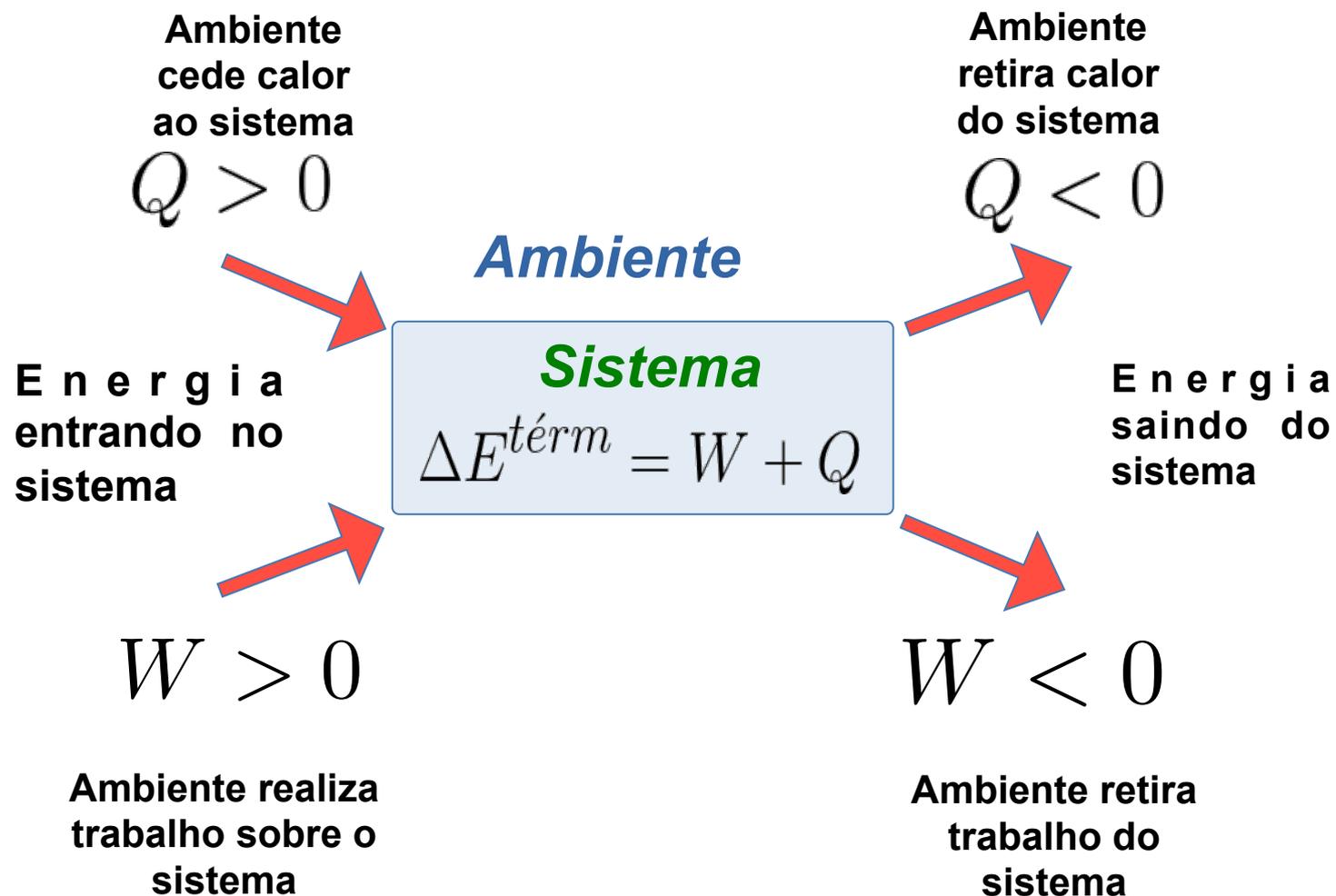
$$\Delta E^{sist} = \Delta E^{term} = W + Q$$

Eq. da 1ª Lei da Termodinâmica

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

Considere a seguinte situação, e pense se W^{ext} , 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

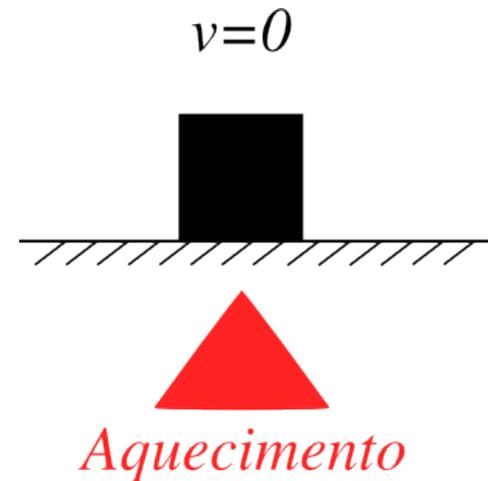
Caso 1: Um bloco de aço repousa sobre uma chama durante alguns segundos

$$W^{\text{ext}} = 0$$

$$Q > 0$$

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

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



Teste Conceitual

Considere a seguinte situação, e pense se W^{ext} , 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 bloco de aço em movimento sobre uma superfície áspera é freado por atrito até parar. [obs: considere aqui somente o bloco como seu 'sistema']

$$W^{\text{ext}} < 0$$

$$Q > 0 \text{ (obs: processo secundário. Só ocorre após a superfície ser aquecida a uma } T \text{ maior que a do bloco)}$$

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

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

Teste Conceitual

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

Caso 3: Uma garrafa térmica mantém líquidos gelados durante muito tempo, e tem um sensor que permite ler a temperatura interna. Você coloca água gelada no seu interior, depois sacode a garrafa vigorosamente durante alguns minutos. Ao final, o sensor indica que a temperatura da água aumentou ligeiramente.

$$W^{\text{ext}} > 0$$

$$Q = 0$$

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

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



Teste Conceitual

Considere a seguinte situação, e pense se W^{ext} , 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

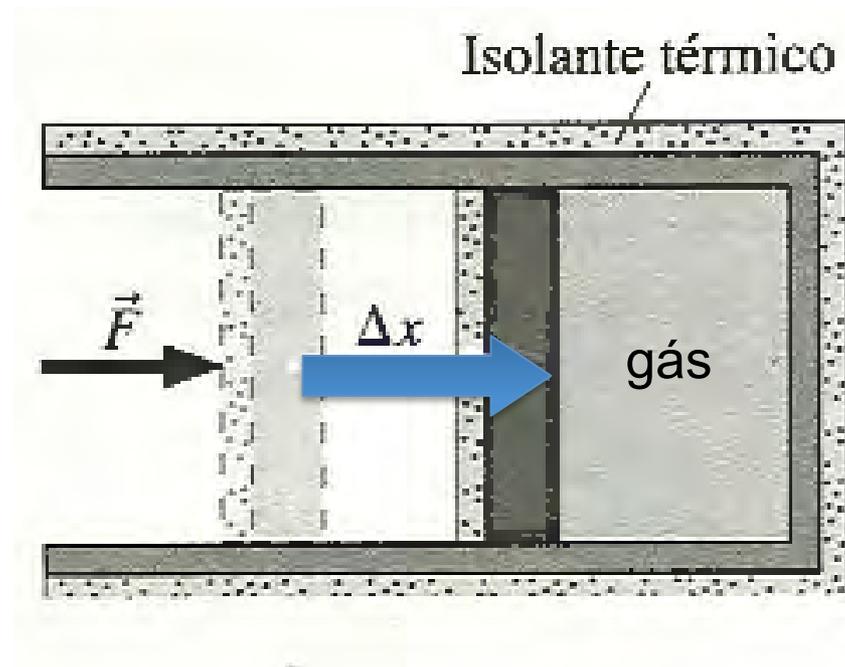
Caso 4: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico (não permite a passagem de calor). O pistão é empurrado para dentro do cilindro, comprimindo o gás.

$$W^{\text{ext}} > 0$$

$$Q = 0$$

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

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



Teste Conceitual

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

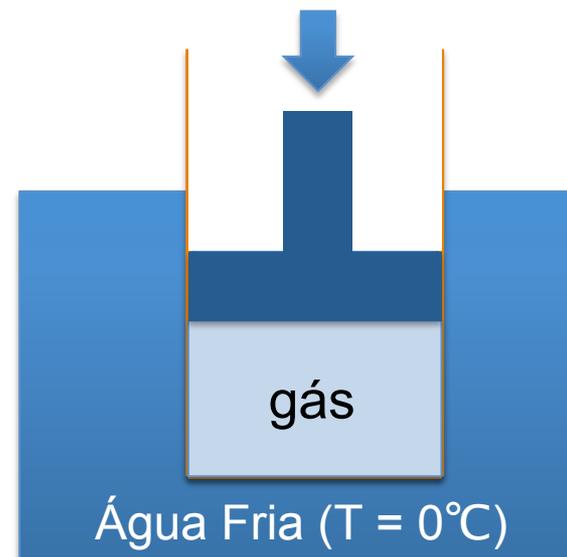
Caso 5: Um cilindro de gás feito de cobre é colocado em bom contato térmico com um grande tanque de água misturada com gelo, e deixado lá até o gás entrar em equilíbrio térmico a zero graus Celsius. Então um pistão é comprimido lentamente sobre o gás, mas de modo que a temperatura deste se mantém sempre constante durante todo o processo.

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

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

$$W > 0$$

$$Q < 0$$



Teste Conceitual

Quais dos seguintes processos **não** envolvem calor?

- (A) Uma garrafa térmica mantém líquidos gelados durante muito tempo, e tem um sensor que permite ler a temperatura interna. Você coloca água gelada no seu interior, depois sacode a garrafa vigorosamente durante alguns minutos. Ao final, o sensor indica que a temperatura da água aumentou ligeiramente.
- (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) Uma haste longa de aço é mantida com uma ponta sobre a chama de uma vela, e a outra ponta mergulhada em uma grande piscina. A temperatura varia ao longo da haste, mas se mantém constante no tempo.
- (D) Duas das alternativas acima não envolvem calor.

Teste Conceitual

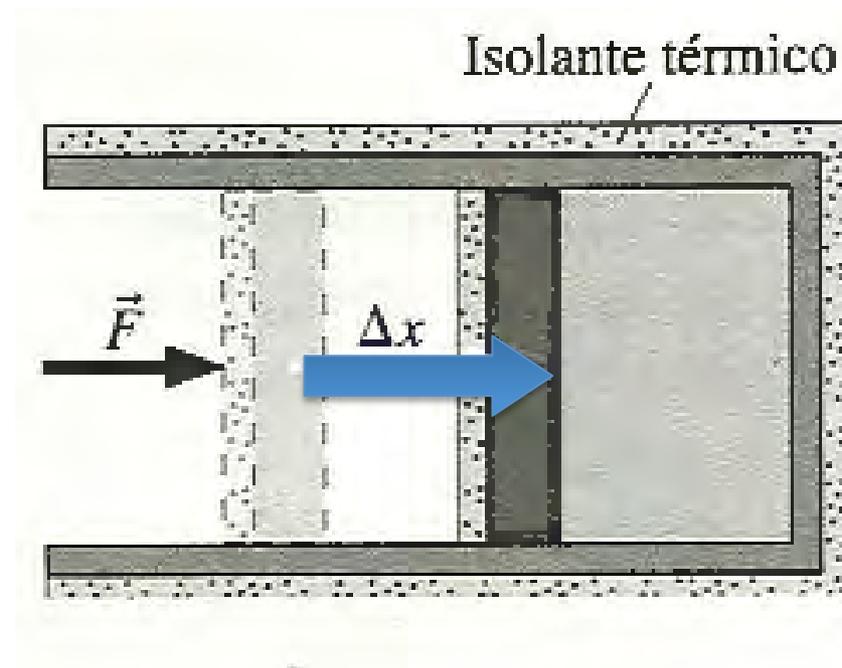
Quais dos seguintes processos **não** envolvem calor?

- (A) Uma garrafa térmica mantém líquidos gelados durante muito tempo, e tem um sensor que permite ler a temperatura interna. Você coloca água gelada no seu interior, depois sacode a garrafa vigorosamente durante alguns minutos. Ao final, o sensor indica que a temperatura da água aumentou ligeiramente.
- (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) Uma haste longa de aço é mantida com uma ponta sobre a chama de uma vela, e a outra ponta mergulhada em uma grande piscina. A temperatura varia ao longo da haste, mas se mantém constante no tempo.
- (D) Duas das alternativas acima não envolvem calor.

Teste Conceitual

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

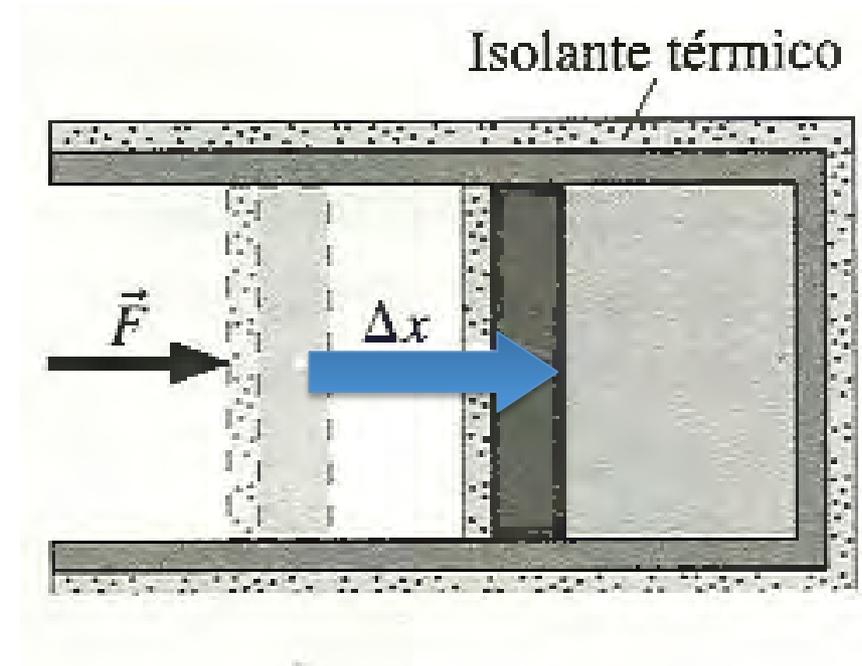
- A) Aumenta
- B) Diminui
- C) Não se altera
- D) Não há informações suficientes para saber



Teste Conceitual

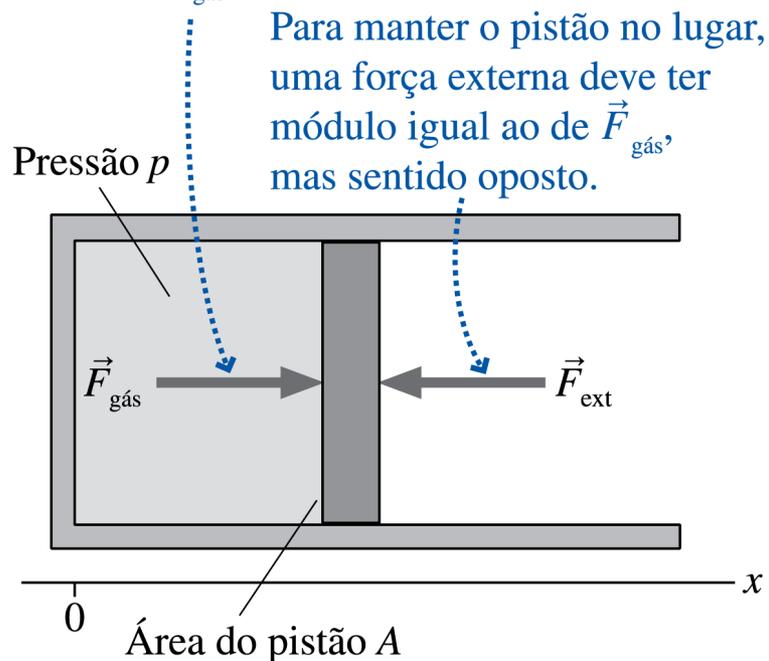
Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico (não permite a passagem de calor). O pistão é empurrado para dentro do cilindro, comprimindo o gás. Neste processo, a temperatura do gás

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



Trabalho em processos quase-estáticos num gás ideal

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



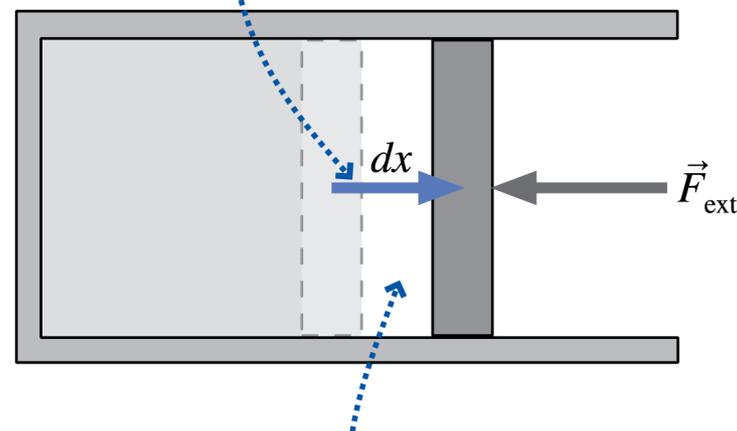
$$\rightarrow F_{\text{ext}} = P A$$

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.

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

$$= - P dV$$

Teste Conceitual

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

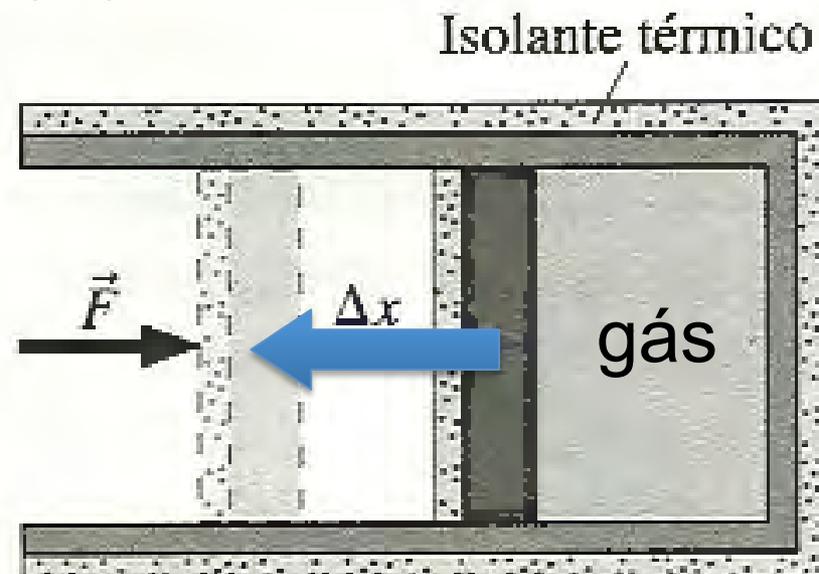
Caso 3: Um cilindro cheio de gás e um pistão são revestidos por um forte isolamento térmico. O pistão vai sendo relaxado pouco a pouco, deixando o gás se expandir contra uma força externa F

$$W < 0$$

$$Q = 0$$

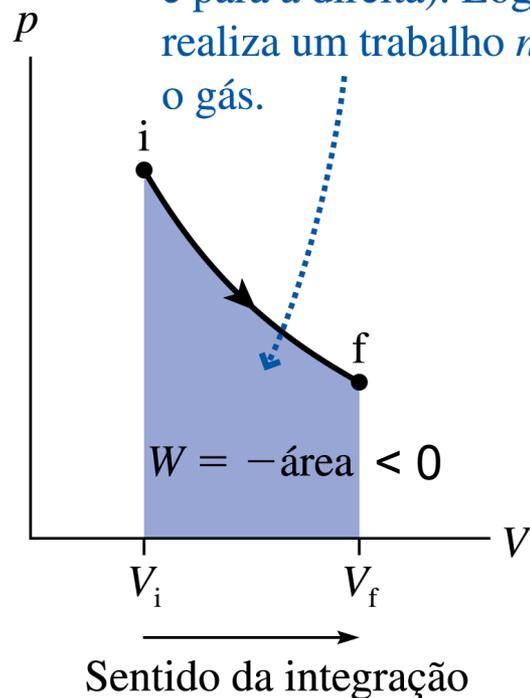
$$\Delta E_{\text{mec}} = 0$$

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

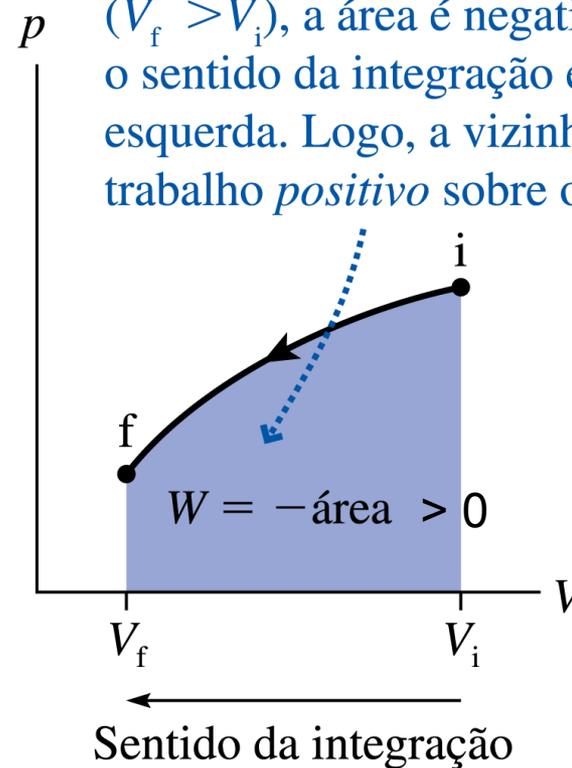


Trabalho em processos quase-estáticos num gás ideal

(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

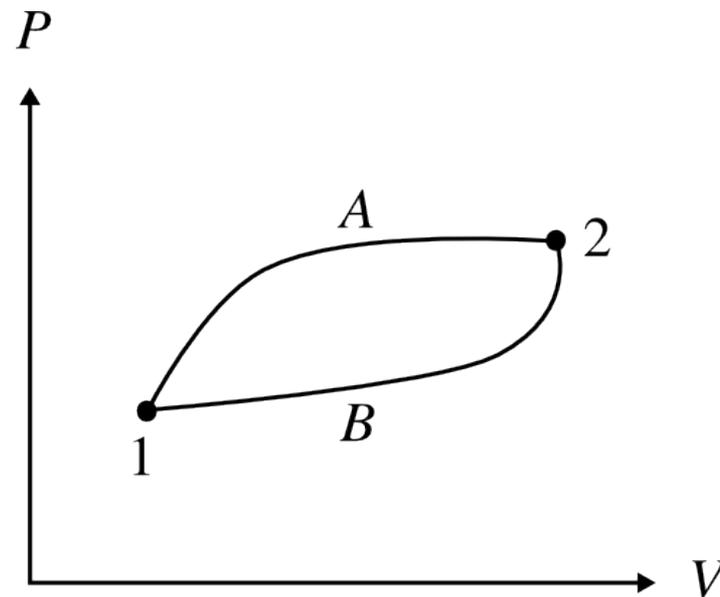
Dois processos A e B podem levar o gás do estado 1 para o estado 2. Compare os trabalhos nos dois processos

(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 3

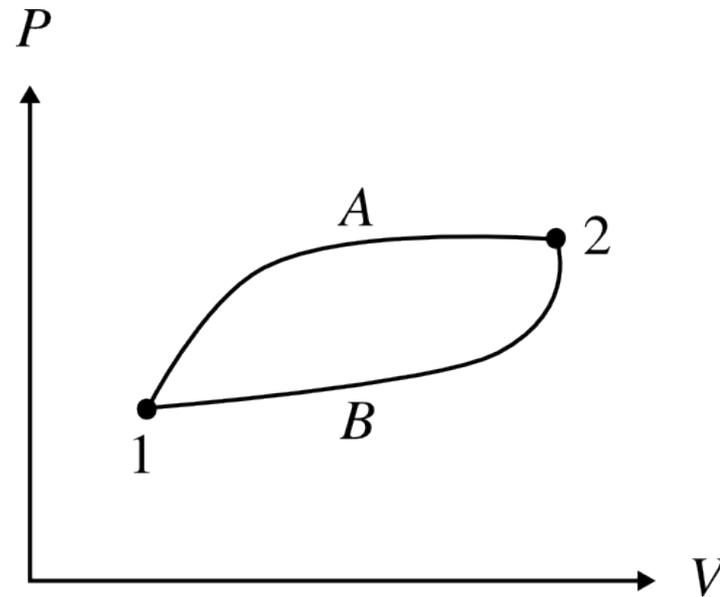
Dois processos A e B podem levar o gás do estado 1 para o estado 2.
Compare os trabalhos nos dois processos

(A) $W_A > W_B > 0$

(B) $W_B > W_A > 0$

(C) $0 > W_A > W_B$

(D) $0 > W_B > W_A$

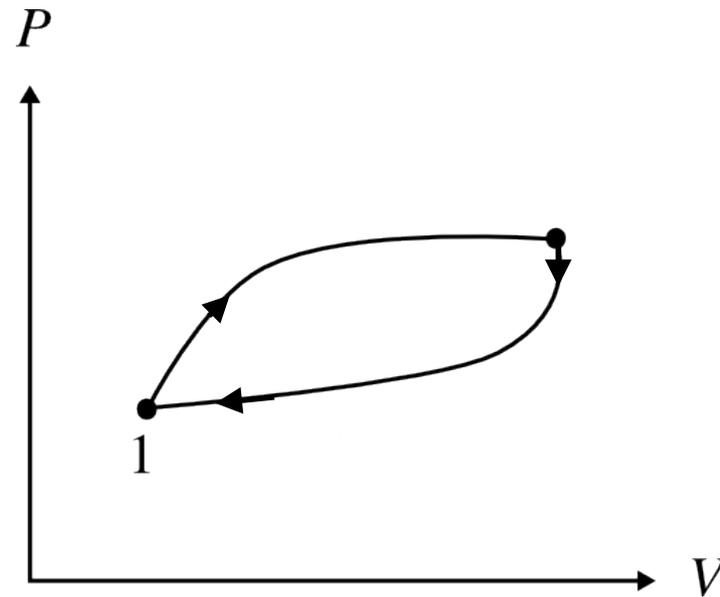


Teste Conceitual

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) $W < 0$



Teste Conceitual 4

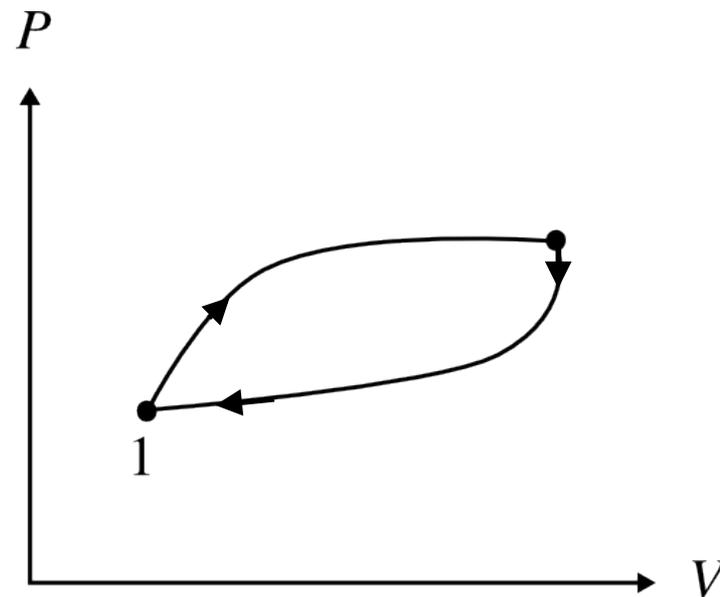
Um processo começa com o gás no estado 1 e percorre a trajetória indicada na figura, terminando de volta no mesmo estado inicial (um **ciclo**).

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

(A) $W > 0$

(B) $W = 0$

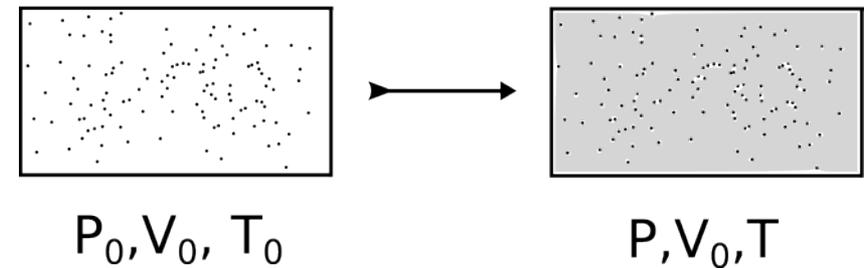
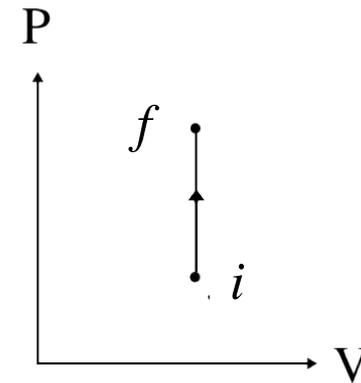
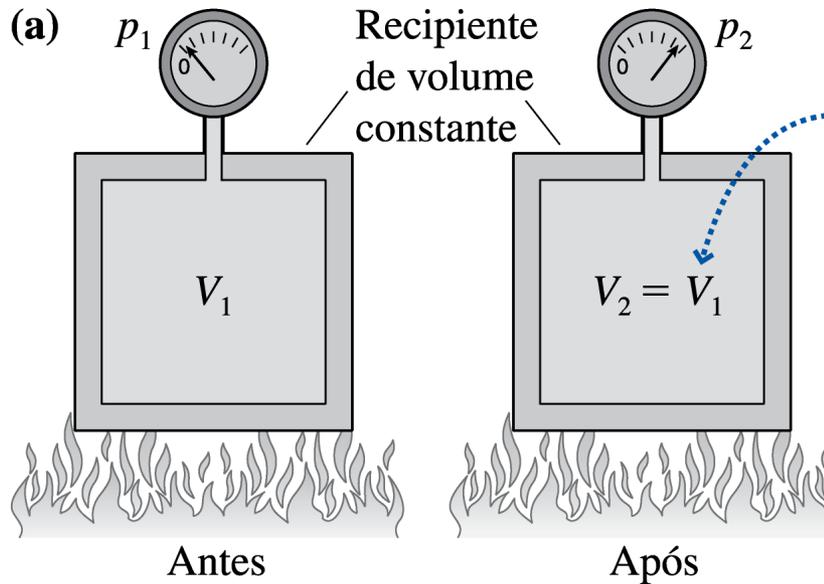
(C) $W < 0$



obs: se o ciclo fosse percorrido no sentido oposto (anti-horário), teríamos $W > 0$!

Processo Isocórico ou Isovolumétrico

$$V = \text{constante}$$



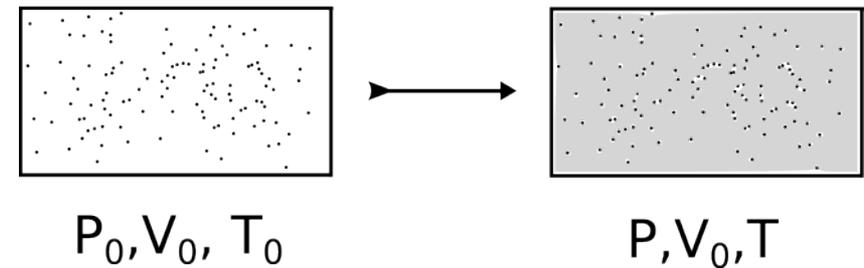
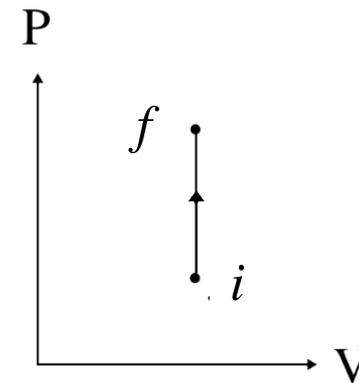
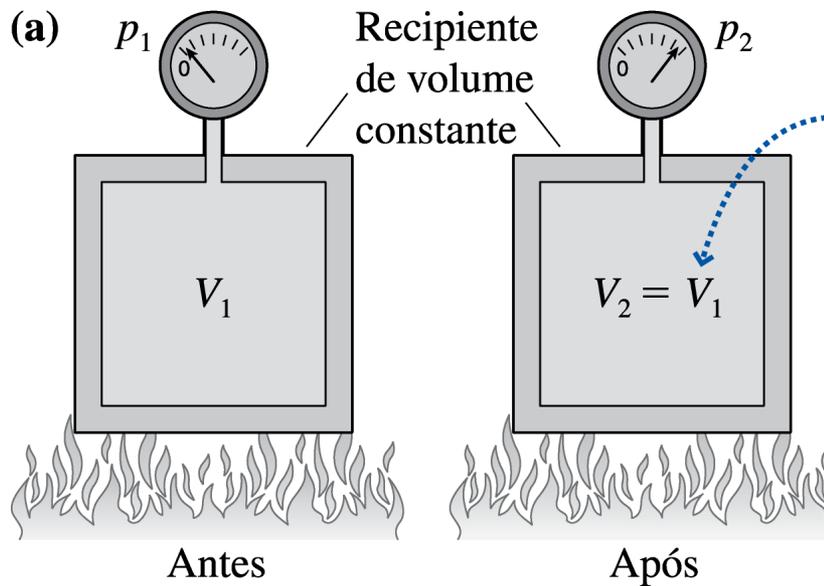
$$W_{\text{isocórico}} = 0$$

P: qdo $P_f - P_i > 0$, qual o sinal de Q?

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

Processo Isocórico ou Isovolumétrico

$$V = \text{constante}$$



$$W_{\text{isocórico}} = 0$$

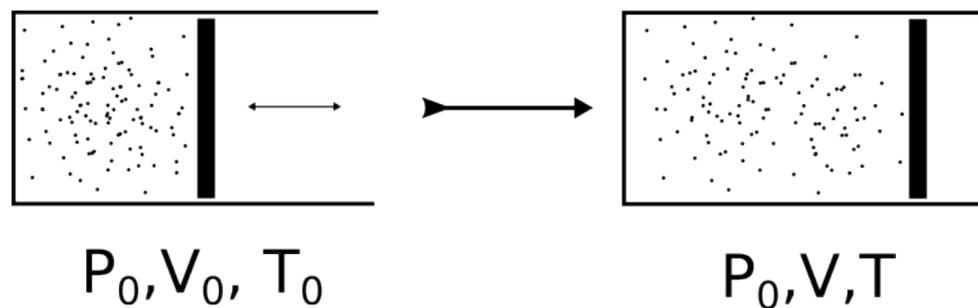
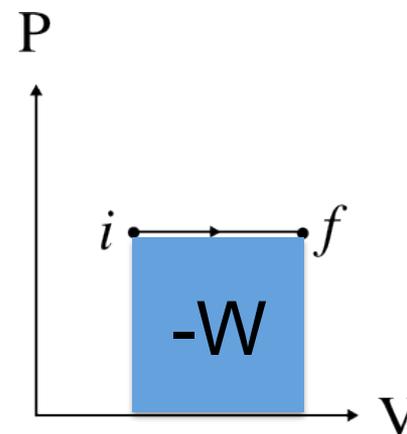
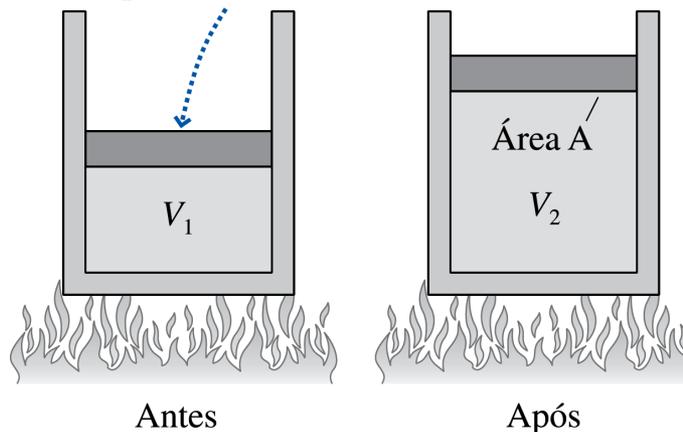
P: qdo $P_f - P_i > 0$, qual o sinal de Q ?

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

R: nesse caso
 $\Delta E_{\text{term}} > 0 \rightarrow Q > 0$

Processo Isobárico $P = \text{constante}$

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

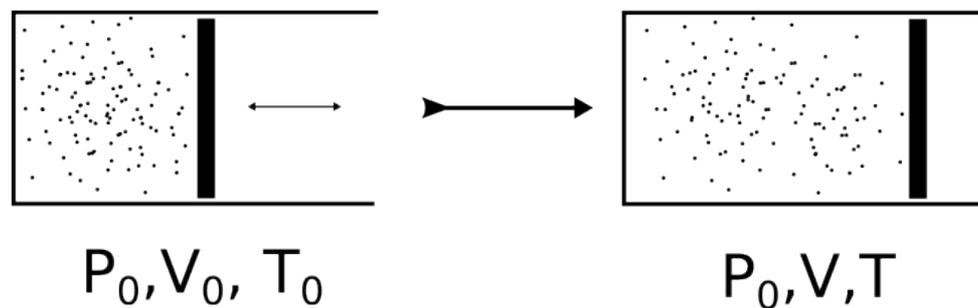
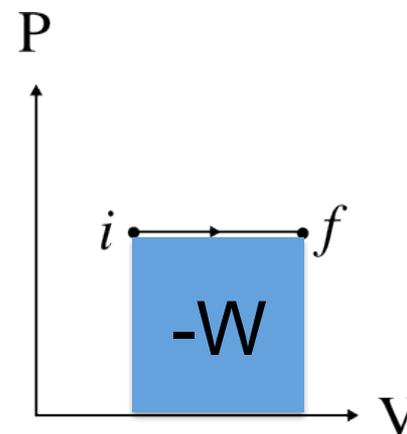
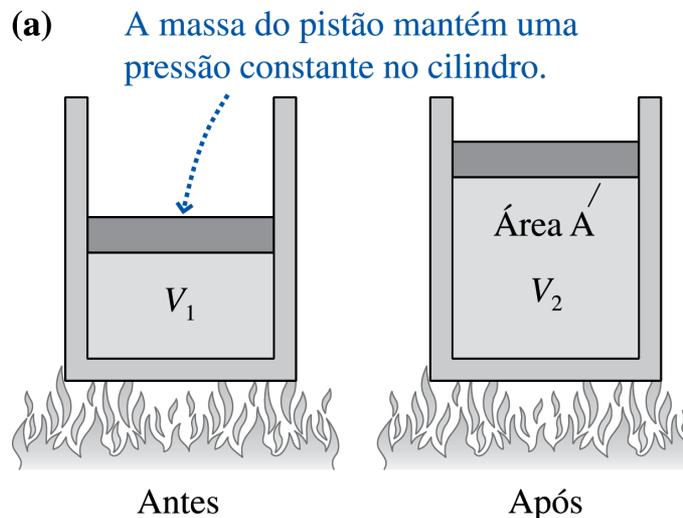


$$W_{\text{isobárico}} = -P(V_f - V_i)$$

P: qdo $V_f - V_i > 0$, qual o sinal de Q?

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

Processo Isobárico $P = \text{constante}$



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

P: qdo $V_f - V_i > 0$, qual o sinal de Q?

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

Resp: $PV = nRT$: como P cte, então

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

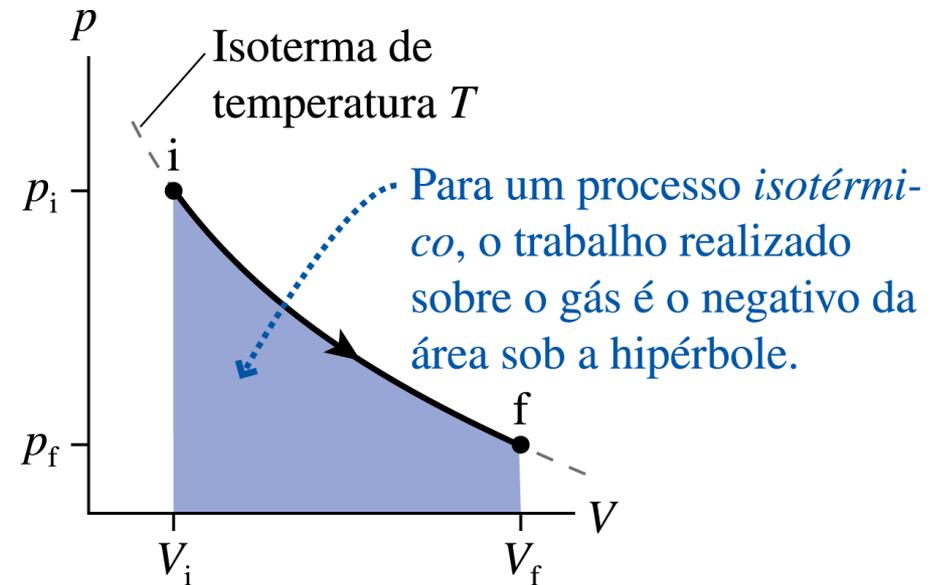
mas $W < 0$! Portanto $Q > 0$

Processo Isotérmico

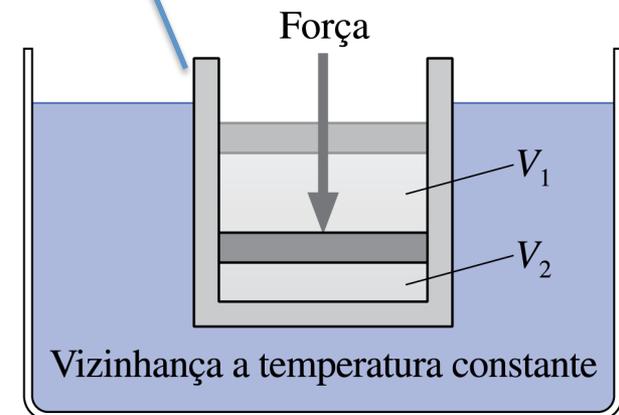
$$T = T_0 = \text{constante} \rightarrow P(V) = \frac{\text{const}}{V}$$

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

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



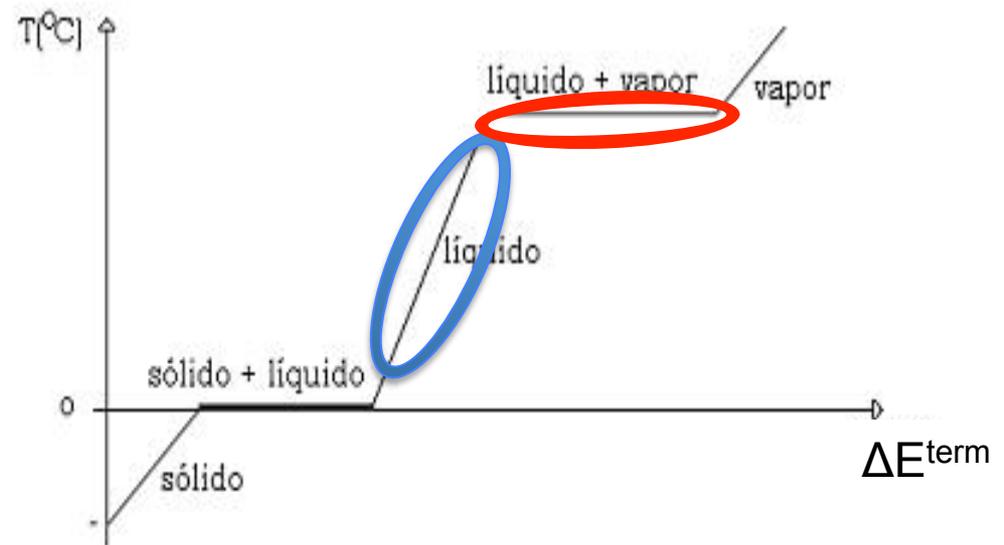
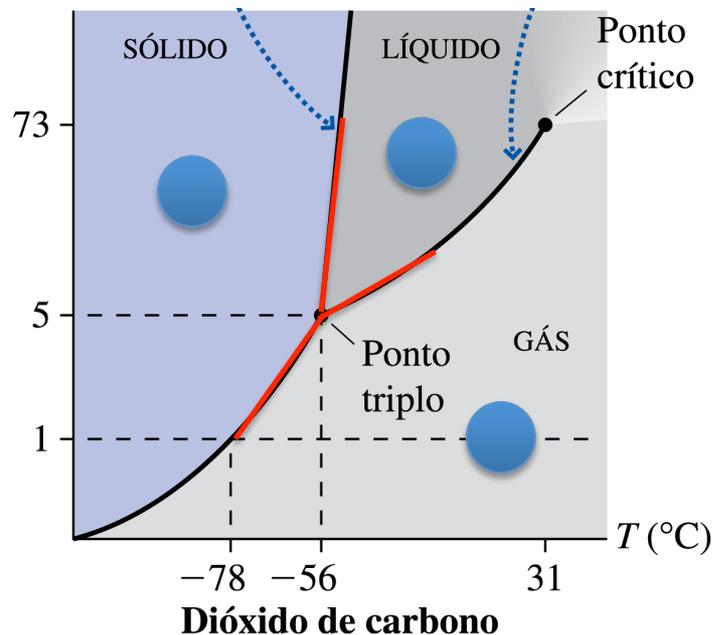
parede boa condutora térmica



Propriedades Térmicas da Matéria

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

$\Delta E^{\text{térm}}$ *em condições normais* $\rightarrow \Delta T$
nas linhas separatrizes do diagrama de fases \rightarrow *Mudança de fase a T const.*



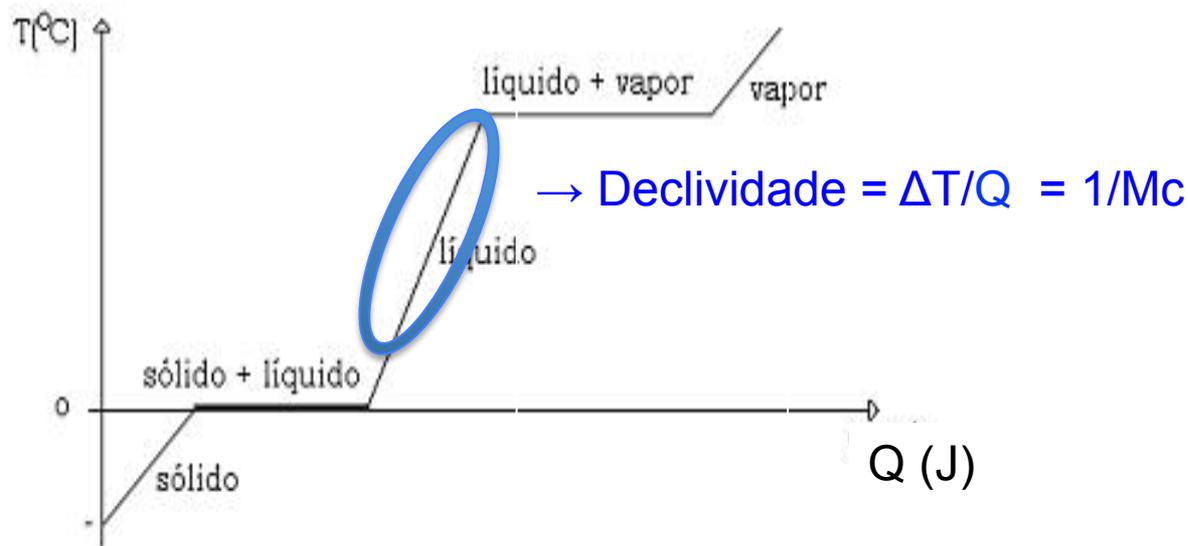
Propriedades Térmicas da Matéria

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.



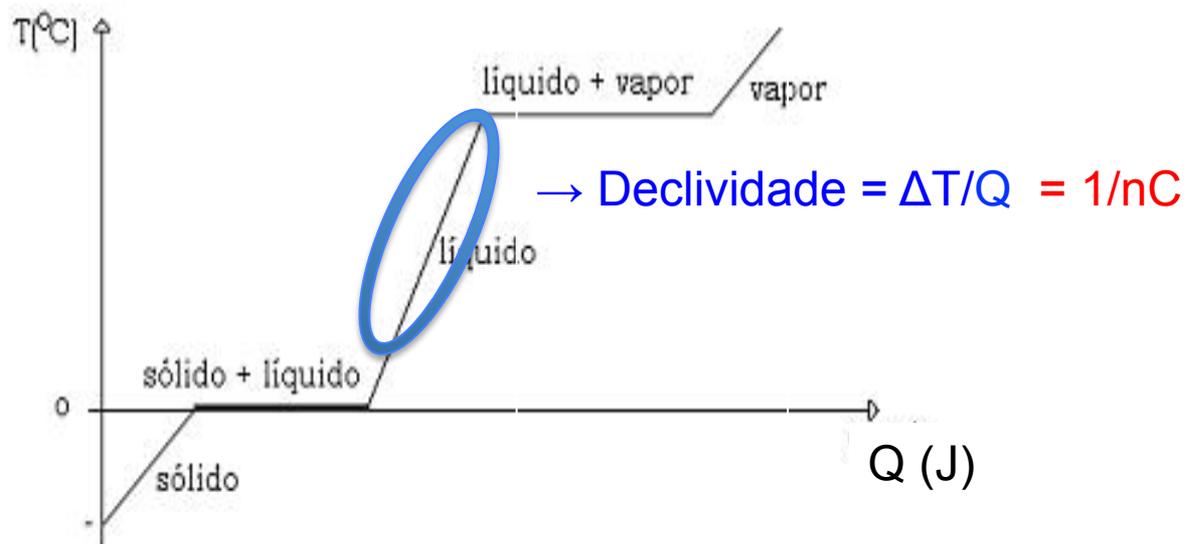
Propriedades Térmicas da Matéria

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 $\Delta T=1K$ (ou $1^\circ C$) em 1,0 **mol** da substância.



Obs: valores de c ou C dependem da maneira como aquecemos a substância.

Para **sólidos e líquidos**, valores tabelados assumem um ambiente a pressão cte, e tb que estamos apenas aplicando Q no corpo (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!

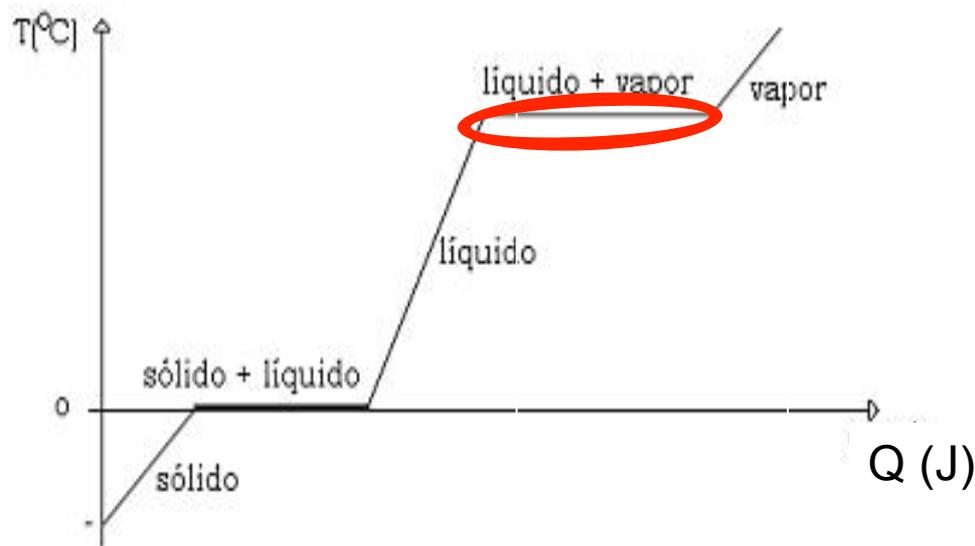
Propriedades Térmicas da Matéria

Caso 2: mudança de fase

Empiricamente: 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

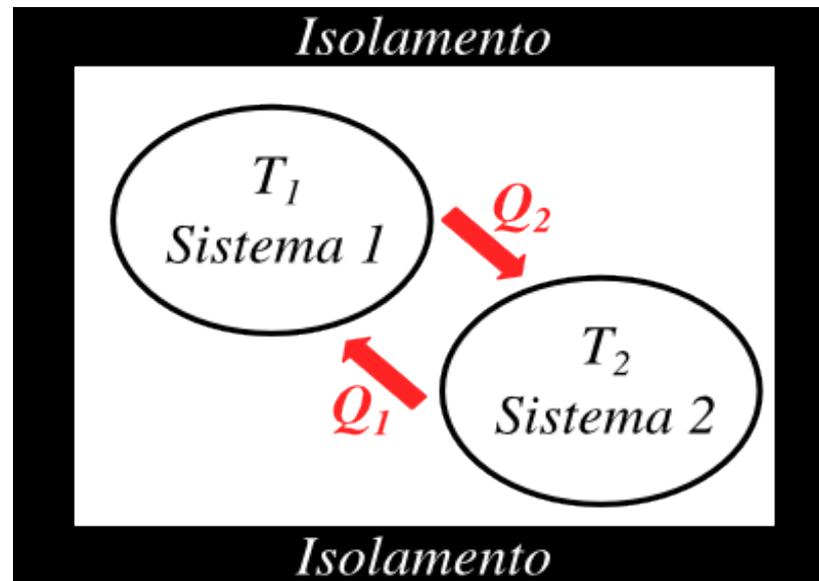
TABELA 17.3 Temperaturas de fusão/ebulição e calores latentes de algumas substâncias

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	$8,58 \times 10^5$

Os valores de L_f (e ainda mais os de L_v) são muito maiores do que os calores específicos na tabela anterior !

Propriedades Térmicas da Matéria

Sistemas em contato térmico (Calorimetria)



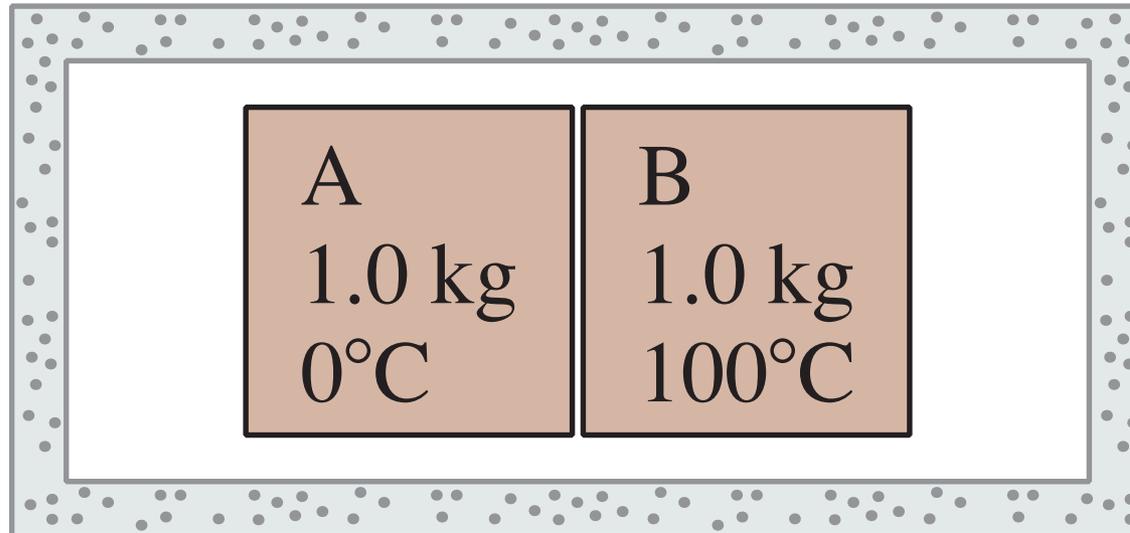
$Q_1 \rightarrow$ Qtde de calor recebida pelo sistema 1

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

Como estão isolados e ã há trabalho : $0 = \Delta E^{\text{tér}} = \Delta E_1^{\text{tér}} + \Delta E_2^{\text{tér}}$

$$0 = Q_1 + Q_2$$

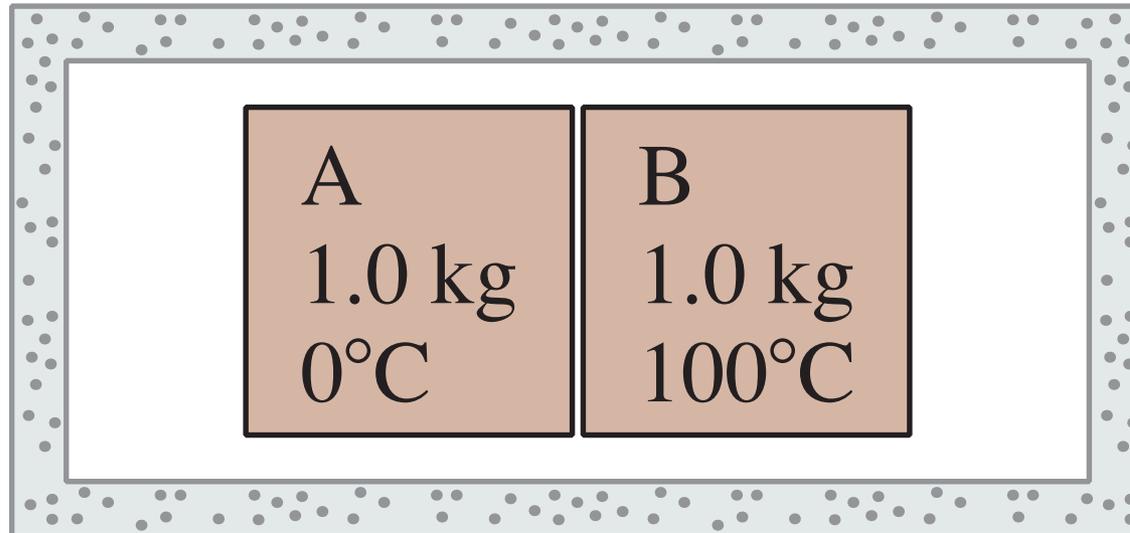
Teste Conceitual



Os dois blocos indicados, feitos de materiais diferentes, são colocados em contato em um recipiente isolado. O calor específico de A é maior que o de B. Assumindo que não ocorram mudanças de fase, 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



Os dois blocos indicados, feitos de materiais diferentes, são colocados em contato em um recipiente isolado. O calor específico de A é maior que o de B. Assumindo que não ocorram mudanças de fase, a temperatura final de equilíbrio será

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

Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

Teste Conceitual

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 $71,2^\circ\text{C}$.

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.

Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

Teste Conceitual

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 $71,2^\circ\text{C}$.

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.

Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

Teste Conceitual

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 $71,2^\circ\text{C}$.

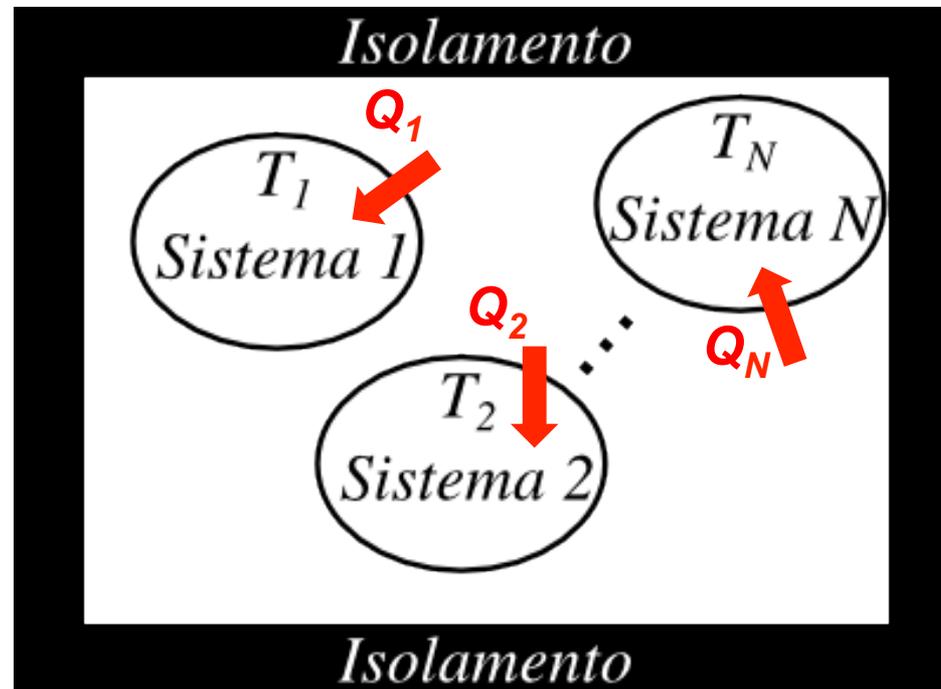
E se o mesmo termômetro for utilizado para medir a temperatura das águas de um lago? A temperatura indicada representa a temperatura do lago antes da medida?

Conclusão: um termômetro só é adequado para medir a temperatura de um corpo se sua inércia térmica (M_c) for muito menor que a do corpo.

Propriedades Térmicas da Matéria

Sistemas em contato térmico (Calorimetria)

Se houver vários sistemas interagindo...



$$0 = \Delta E_{tot}^{term} = \Delta E_1^{term} + \Delta E_2^{term} + \dots + \Delta E_N^{term}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 \dots + Q_N = 0$$

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 $T_f > T_i$:

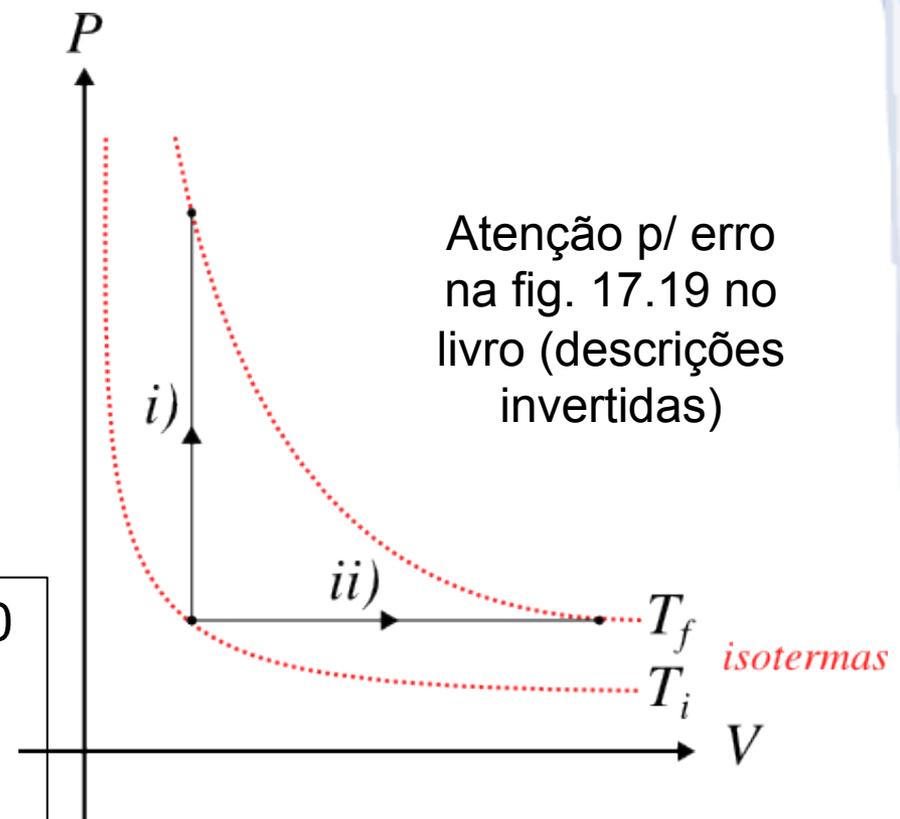
i) Processo a V cte: calor $Q_{(i)} = n C_V \Delta T$

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



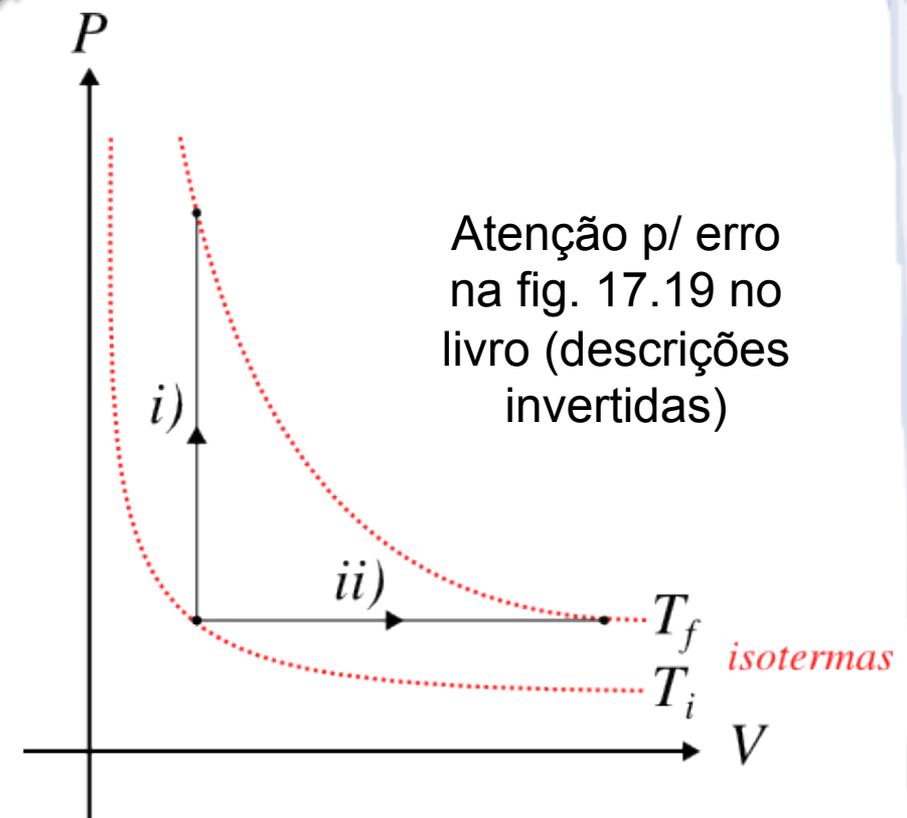
Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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!)



Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

Teste Conceitual

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) $T_H < T_N$
- B) $T_H = T_N$
- C) $T_H > T_N$

Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

Teste Conceitual

28g de gás Hélio (⁴He) e 28g de gás Nitrogênio (¹⁴N)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) $T_{\text{He}} < T_{\text{N}}$
- B) $T_{\text{He}} = T_{\text{N}}$
- C) $T_{\text{He}} > T_{\text{N}}$

Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

Teste Conceitual

Um mol de gás Hélio (^4He) e um mol de gás Nitrogênio (^{14}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) $T_{\text{He}} < T_{\text{N}}$
- B) $T_{\text{He}} = T_{\text{N}}$
- C) $T_{\text{He}} > T_{\text{N}}$

Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

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

Teste Conceitual

3,0 moles de O_2 a $20^\circ C$ são aquecidos de modo a absorver 600J de calor a pressão constante. 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) Com essas informações não é possível determinar ΔT .

Calores Específicos de Gases: discussão qualitativa

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

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

Teste Conceitual

3,0 moles de O_2 a $20^\circ C$ são aquecidos de modo a absorver 600J de calor a pressão constante. 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) Com essas informações não é possível determinar ΔT .

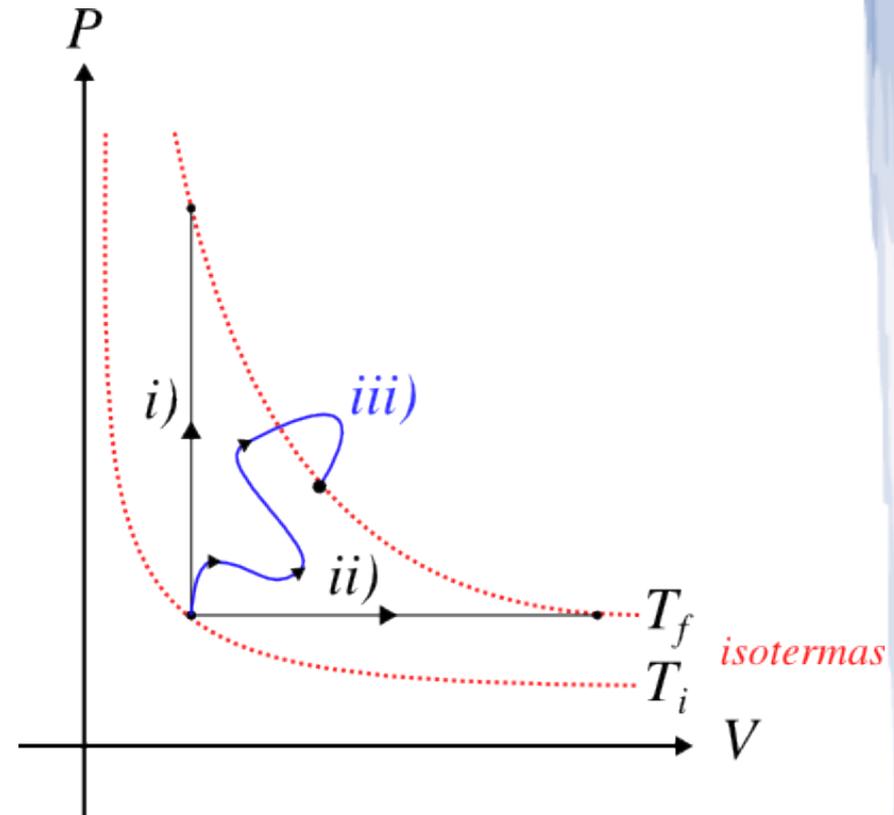
Calores Específicos de Gases: discussão **quantitativa**

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**

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



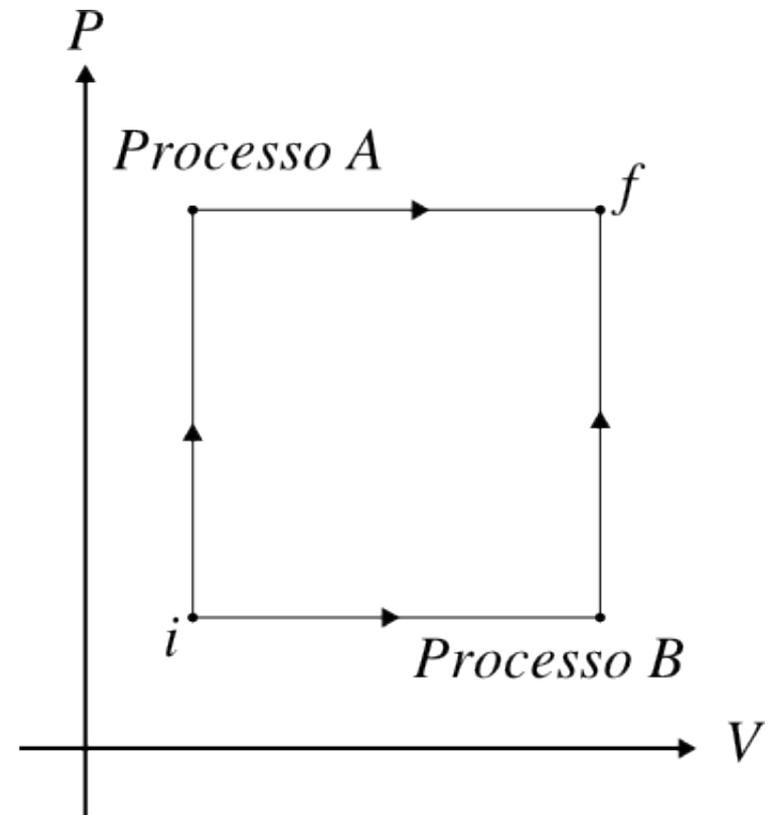
Já sabemos que $W = - \int_i^f P(V) dV$ para o caminho;

basta então descobrir como tb calcular ΔE^{term}

Teste Conceitual

Com relação aos processos ao lado:

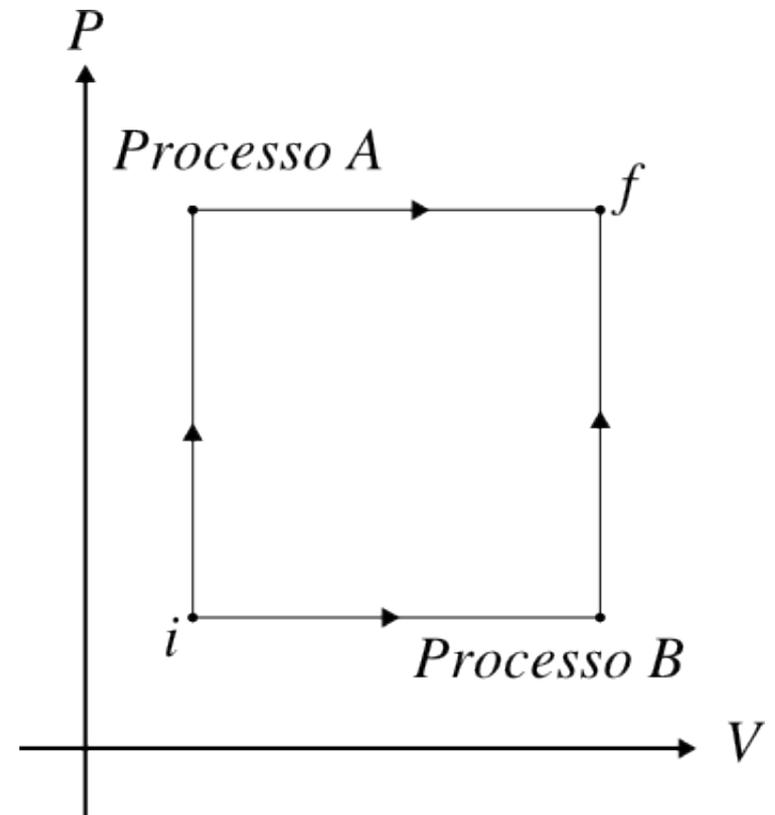
- (A) $Q_A > Q_B$
- (B) $Q_A < Q_B$
- (C) $Q_A = Q_B$



Teste Conceitual

Com relação aos processos ao lado:

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



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}

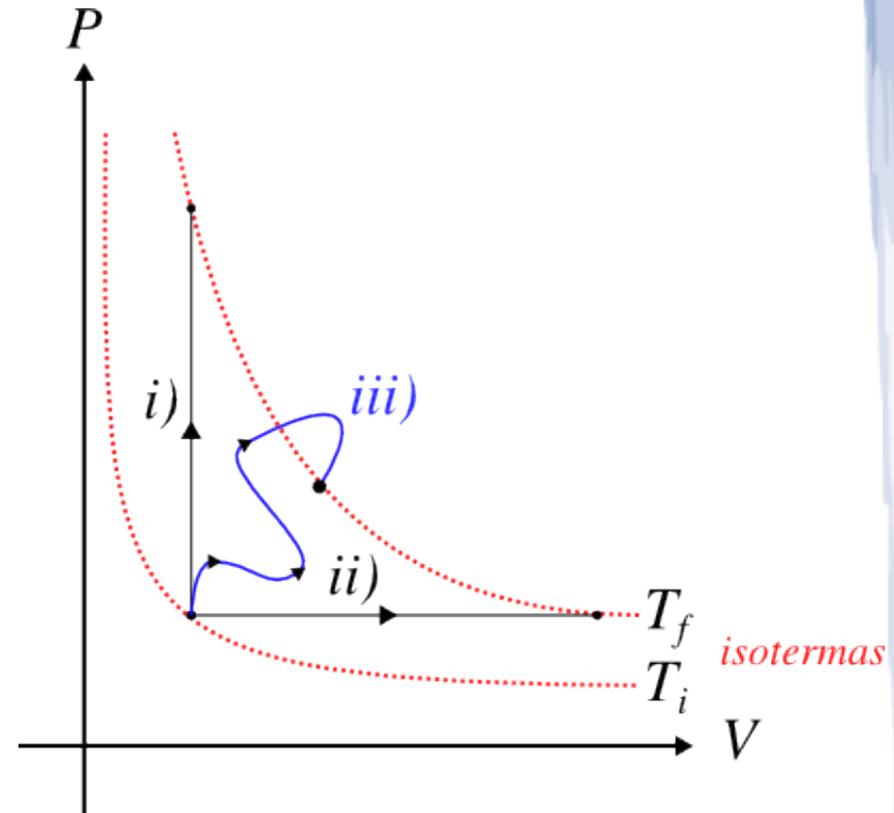
- Mas em (i), podemos escrever

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

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) :

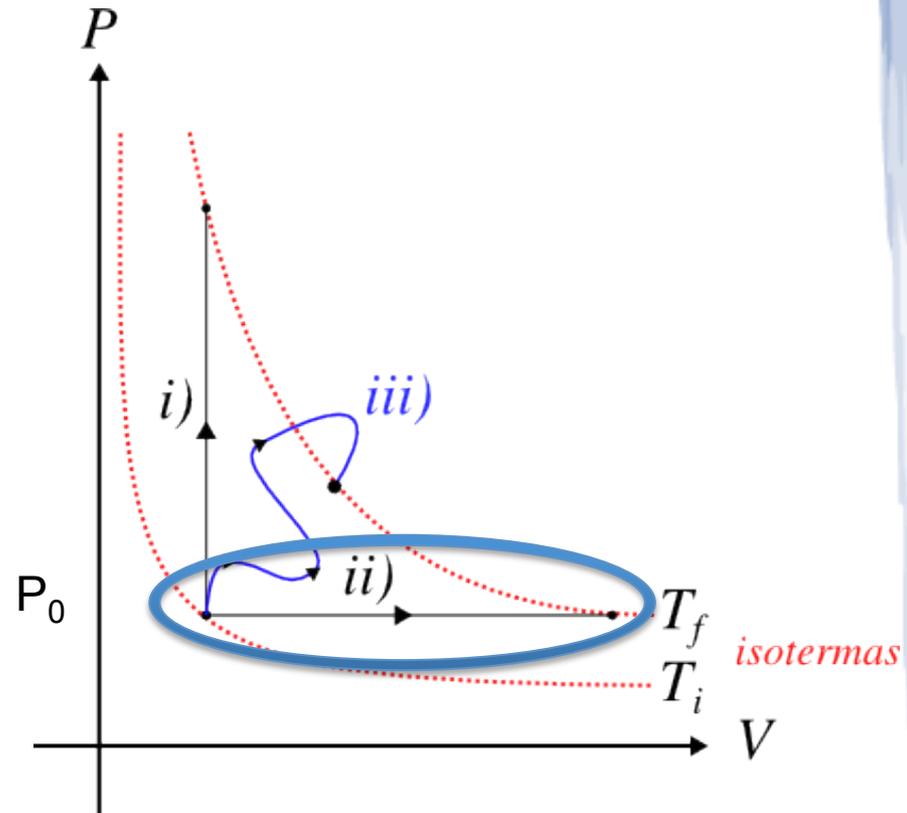
$$\begin{aligned}\Delta E^{\text{tér}} \text{ (ii)} &= Q_2 + W_2 \\ &= n C_p \Delta T - P_0 \Delta V\end{aligned}$$

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

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

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

Exercício

Uma caixa de 1000 cm^3 com paredes perfeitamente isolantes contém nitrogênio a 1.0 atm de pressão e 20°C . Um bloco de 20g de cobre a $T = 500^\circ\text{C}$ é colocado na caixa, a qual é rapidamente selada

Após um longo tempo, qual é a pressão dentro da caixa?

Gás	C_P	C_V	$C_P - C_V$
N_2	29,1	20,8	8,3

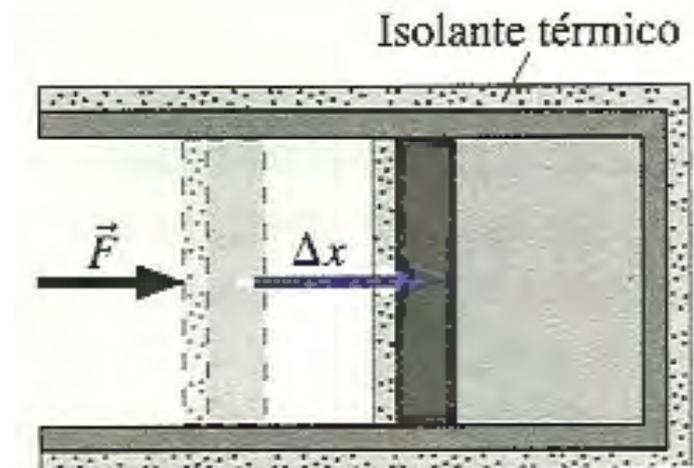
Substância	c (J/kg K)	C (J/mol K)
Sólidos		
Alumínio	900	24,3
Cobre	385	24,4

TABELA 16.1 Densidades de materiais

Substância	ρ (kg/m ³)
Ar (CNTP*)	1,3
Álcool etílico	790
Água (sólida)	920
Água (líquida)	1000
Alumínio	2700
Cobre	8920
Ouro	19.300

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

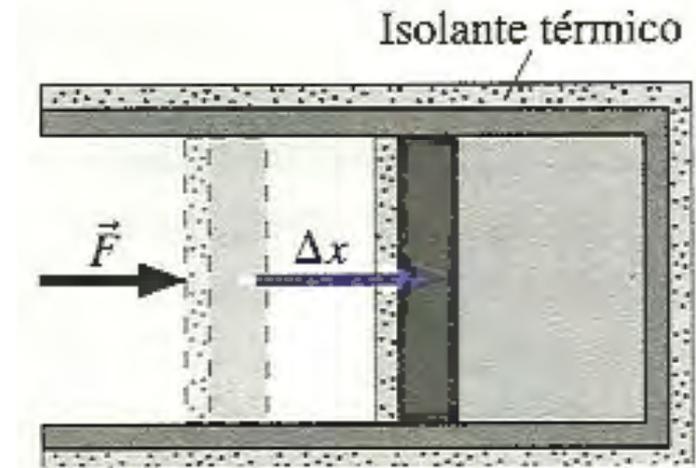


Processos adiabáticos ($Q=0$)

Teste conceitual

Em um processo adiabático

- A) A temperatura varia ($\Delta T \neq 0$) e o calor específico vale zero
- B) A temperatura varia ($\Delta T \neq 0$) e o calor específico é $\neq 0$
- C) A temperatura não varia ($\Delta T = 0$), e o calor específico é $\neq 0$
- D) A temperatura não varia ($\Delta T = 0$), e o calor específico vale zero

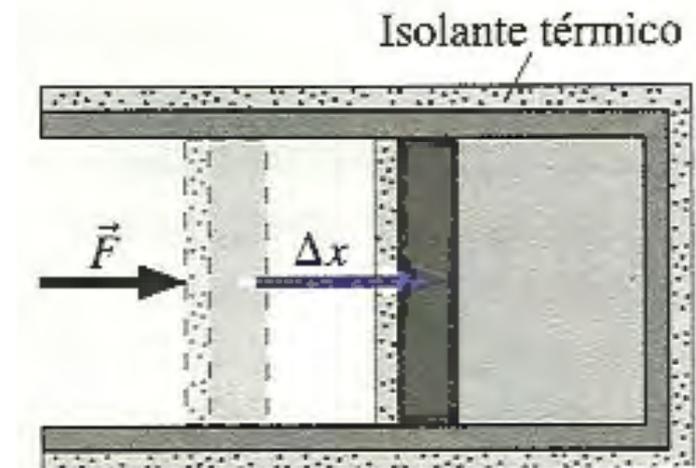


Processos adiabáticos ($Q=0$)

Teste conceitual

Em um processo adiabático

- A) A temperatura varia ($\Delta T \neq 0$) e o calor específico vale zero
- B) A temperatura varia ($\Delta T \neq 0$) e o calor específico é $\neq 0$
- C) A temperatura não varia ($\Delta T = 0$), e o calor específico é $\neq 0$
- D) A temperatura não varia ($\Delta T = 0$), e o calor específico vale zero

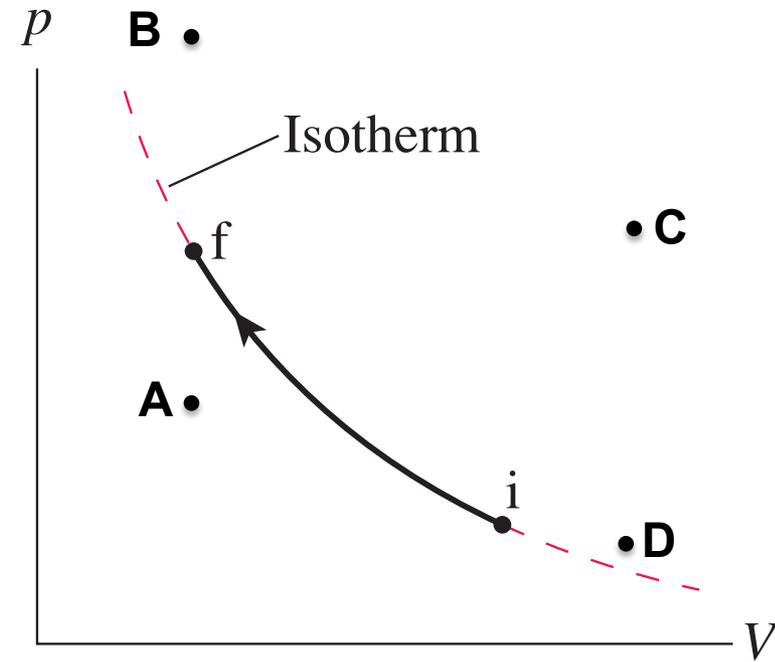


Processos adiabáticos ($Q=0$)

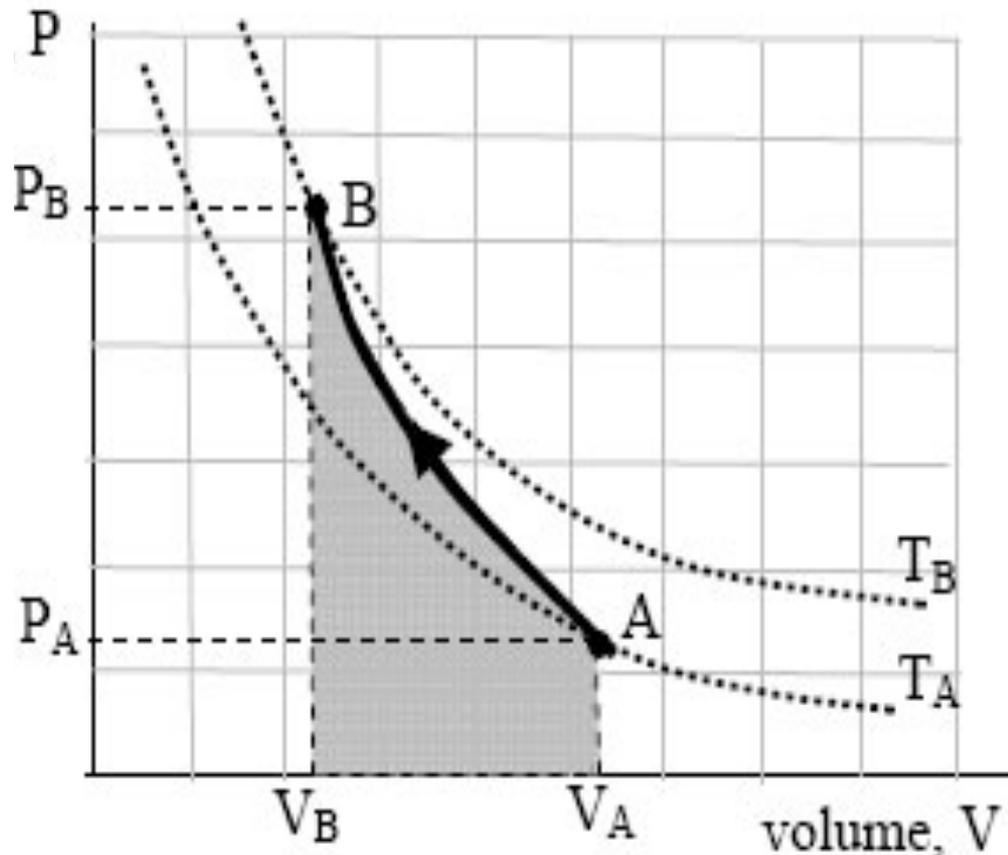
Teste conceitual

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

Dica: Como tem de variar a temperatura numa expansão adiabática? E numa compressão adiabática?



Processos adiabáticos ($Q=0$)



Conclusão

No diagrama P-V de um gás, as transformações adiabáticas são representadas por curvas que cruzam várias isotermas.

Em cada ponto do diagrama passa uma curva adiabática, a qual é sempre **mais inclinada que a isoterma passando pelo mesmo ponto** (pois numa transformação adiabática a temperatura vai aumentando à medida em que o gás é comprimido)

P: qual será essa curva $P(V)$?

Processos adiabáticos ($Q=0$)

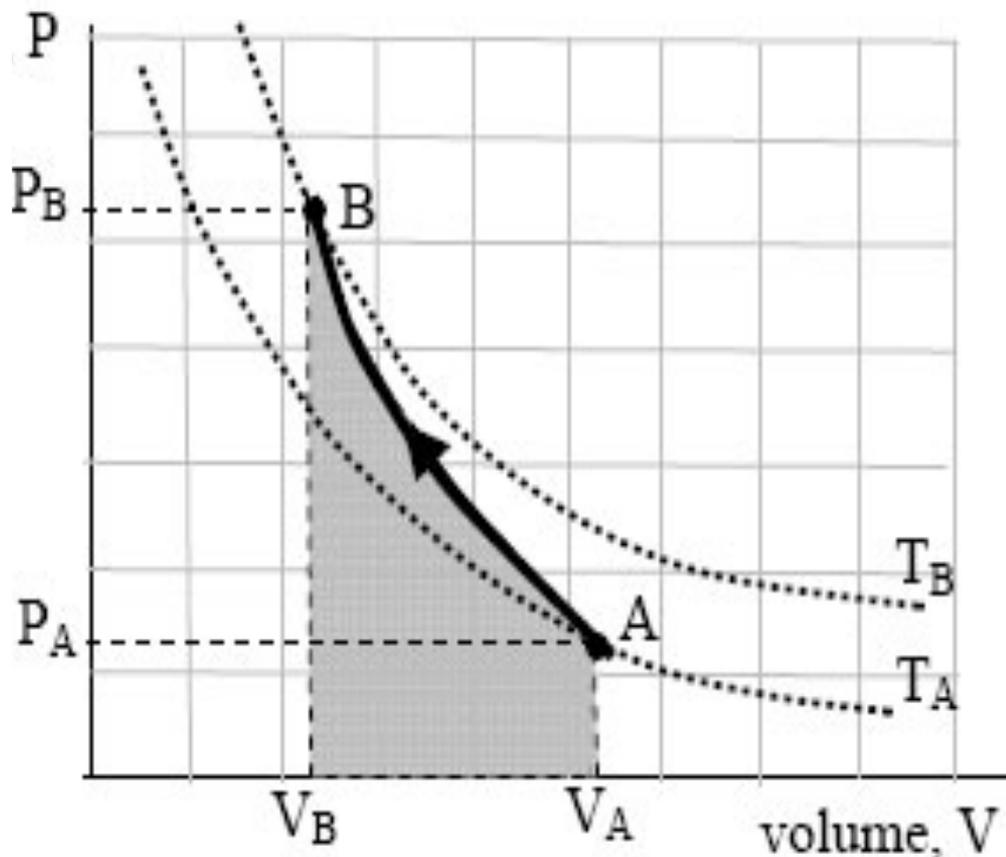
Equação para uma transformação adiabática (vide quadro/livro)

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

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

Expressão equivalente em termos de T e V

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



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?

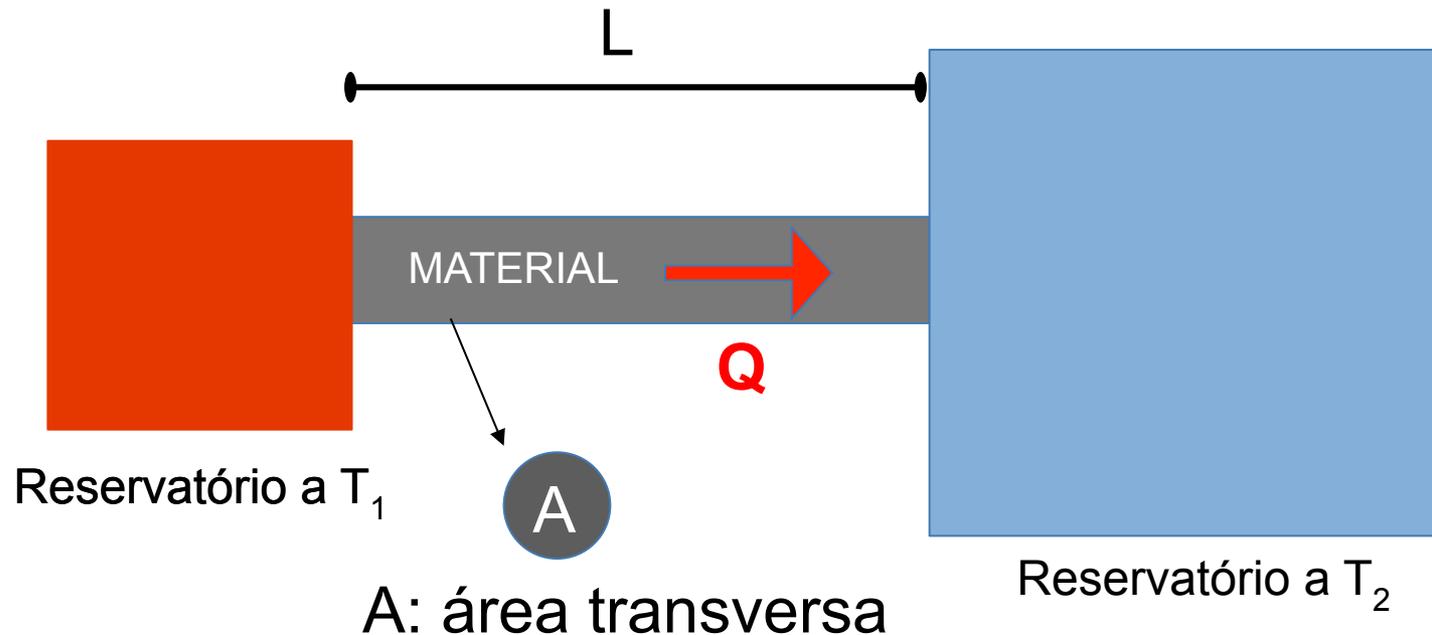
4 Mecanismos:

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

Mecanismos de transferência de Calor

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

Ocorre somente nos fluidos!



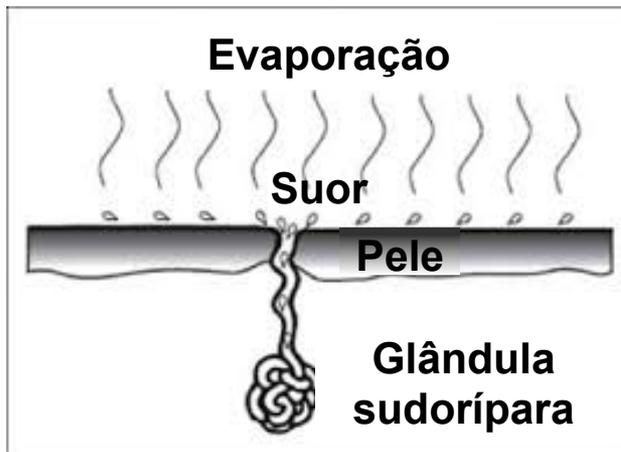
Ex: o ar ou água são péssimos condutores de calor, porém transmitem facilmente a energia térmica por convecção.

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

Mecanismos de transferência de Calor

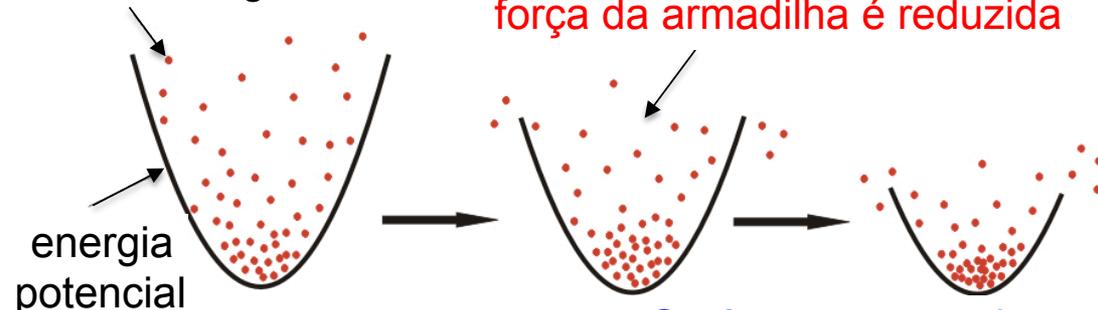
Evaporação

Transferência de energia térmica 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**.



Um processo similar à evaporação é um dos passos principais para a obtenção das temperaturas mais baixas já atingidas, usando gases presos em 'armadilhas' eletromagnéticas

Átomos presos em uma 'armadilha' eletromagnética



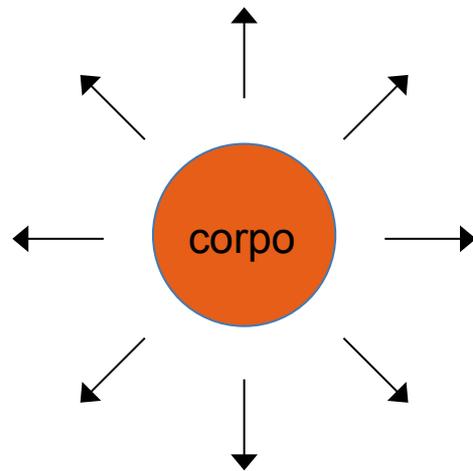
Os átomos que sobram ficam mais frios

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

TC - 3

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.**

TC - 3

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**

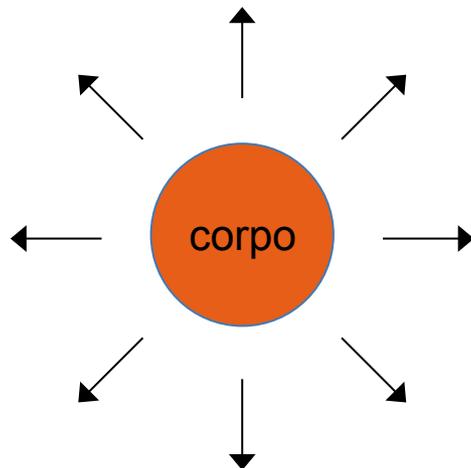
(obs: na prática ele nunca é perfeito, então sempre há alguma condução)

- 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:

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

- a) Qual é a potência *total* da radiação emitida pelo Sol ?
- b) 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)
- c) Qual é a potência de radiação solar incidente sobre a Terra num dado instante?
- d) 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)?

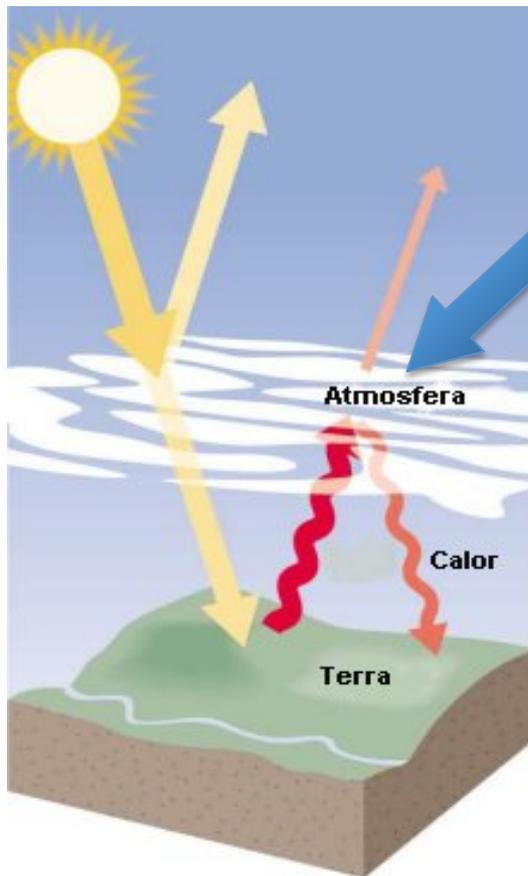
R: c) $1,7 \times 10^{17} \text{ W}$ d) **277K !**

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 = 730K!)
- 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