Halliday

Fundamentos de Física

Volume 1

gen Grupo Editorial Nacional

LTC EDITORA

genIO GEN | Informação Online

www.**grupogen**.com.br

http://**gen-io.grupogen**.com.br

Capítulo 8

Energia Potencial e Conservação da Energia

8.1 Energia potencial

Tecnicamente, energia potencial é qualquer energia que pode ser associada à configuração (arranjo) de um sistema de objetos que exercem forças uns sobre os outros.

Algumas formas de energia potencial:

1. Energia Potencial Gravitacional
2. Energia Potencial Elástica

8.2 Trabalho e energia potencial

A variação ΔU da energia potencial (gravitacional, elástica, etc.) é definida como o negativo do trabalho realizado pela força (gravitacional, elástica, etc.) sobre o objeto.

$$\Delta U = -W.$$

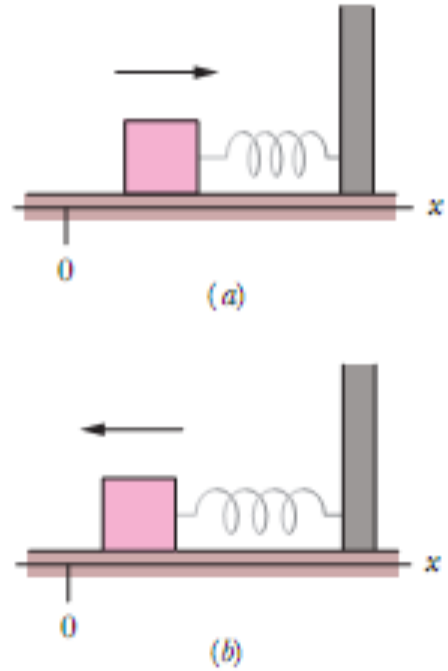


Figura 8-3 Um bloco, preso a uma mola e inicialmente em repouso em $x = 0$, é colocado em movimento para a direita. (*a*) Quando o bloco se move para a direita (no sentido indicado pela seta), a força elástica da mola realiza trabalho negativo sobre o bloco. (*b*) Mais tarde, quando o bloco se move para a esquerda, em direção ao ponto $x = 0$, a força da mola realiza trabalho positivo sobre o bloco.

8.2 Forças conservativas e dissipativas

Suponha o seguinte:

1.Um sistema é formado por dois ou mais objetos.

2.Uma força atua entre um objeto que se comporta como uma partícula e o resto do sistema.

3.Quando a configuração do sistema varia, a força realiza trabalho (W_1) sobre o objeto, transferindo energia cinética K do objeto para outra forma de energia do sistema.

4.Quando a mudança de configuração se inverte, a força inverte o sentido da transferência de energia, realizando um trabalho W_2 no processo.

Em uma situação na qual a relação $W_1 = -W_2$ é sempre verdadeira, o outro tipo de energia é uma energia potencial e dizemos que a força é conservativa.

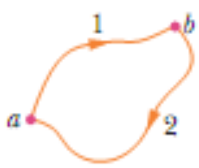
Uma força que não é conservativa é chamada de força dissipativa. A força de atrito cinético e a força de arrasto são forças dissipativas.

8.3 Independência da Trajetória para o Trabalho de Forças Conservativas

O trabalho total realizado por uma força conservativa sobre uma partícula que se move ao longo de um percurso fechado é zero.

(a)

Se uma força é conservativa, o trabalho realizado pela força não depende da trajetória entre os pontos *a* e *b*.



(b)

E o trabalho realizado pela força em um percurso fechado é zero.

$$W_{ab,1} = W_{ab,2},$$

Seja o trabalho realizado de a a b ao longo da trajetória 1 $W_{ab,1}$ e seja o trabalho realizado de b a a ao longo da trajetória 2 $W_{ba,2}$. Se a força é conservativa, o trabalho total ao longo desse percurso fechado deve ser zero: $W_{ab,1} + W_{ba,2} = 0,$

$$W_{ab,1} = -W_{ba,2}.$$

Se a força é conservativa,

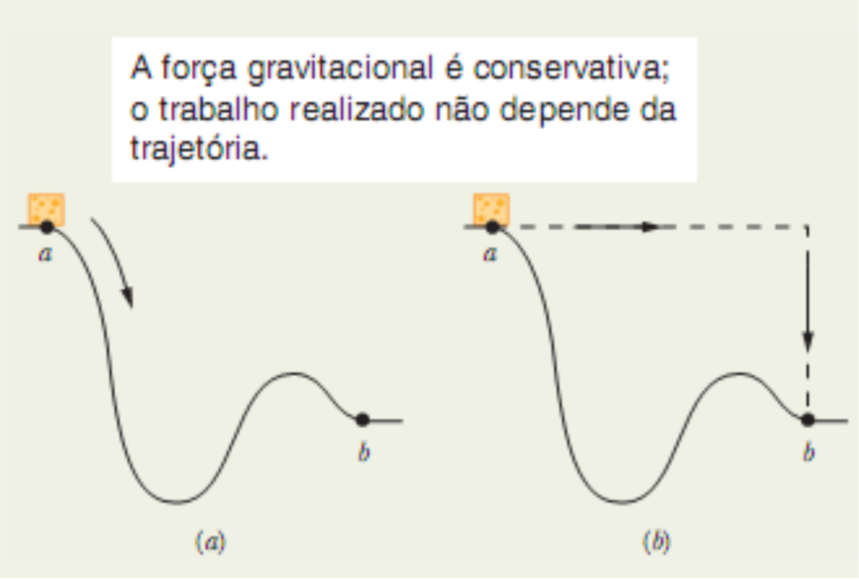
$$W_{ab,2} = -W_{ba,2}.$$

$$\longrightarrow W_{ab,1} = W_{ab,2}$$

Exemplo: Queijo gorduroso

A Fig. 8-5*a* mostra um pedaço de 2,0 kg de queijo gorduroso que desliza por um trilho sem atrito do ponto *a* ao ponto *b*. O queijo percorre uma distância total de 2,0 m ao longo do trilho e uma distância vertical de 0,80 m. Qual é o trabalho realizado sobre o queijo pela força gravitacional durante o deslocamento?

Fig. 8-5



Cálculos: Vamos escolher a trajetória tracejada da Fig. 8.5b, formada por dois segmentos de reta. No segmento horizontal, o ângulo ϕ é constante e igual a 90°. Embora o deslocamento no segmento horizontal não seja conhecido, o trabalho realizado pela força gravitacional nesse segmento é

No segmento vertical, o deslocamento d é 0,80 m e o ângulo ϕ é constante e igual a 0°. Assim, o trabalho realizado na parte vertical da trajetória é

$$W_v = mgd\cos 0^\circ$$
$$= (2{,}0\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2)(0{,}80\ \text{m})(1) = 15{,}7\ \text{J}.$$

O trabalho total realizado pela força $\mathbf{F}_g$ ao longo da trajetória tracejada é, portanto,

Esse é também o trabalho realizado pela força $\mathbf{F}_g$ ao longo da trajetória sinuosa representada pela linha cheia.

8.4 Cálculo da Energia Potencial

No caso geral, em que a força varia com a posição, o trabalho W e a energia potencial são dados por

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx.$$

e

$$\Delta U = -\int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx.$$

8.4 Cálculo da Energia Potencial

Energia Potencial Gravitacional

Uma partícula de massa m se move verticalmente ao longo do eixo y (o sentido positivo é para cima). Quando a partícula se desloca do ponto y_i para o ponto y_f, a força gravitacional realiza trabalho sobre a partícula. A variação correspondente da energia potencial gravitacional do sistema partícula-Terra é

$$\Delta U = -\int_{y_i}^{y_f} (-mg)\, dy = mg \int_{y_i}^{y_f} dy = mg\Big[\, y \,\Big]_{y_i}^{y_f},$$

$$\Downarrow$$

$$\Delta U = mg(y_f - y_i) = mg\,\Delta y.$$

$$\Downarrow$$

A energia potencial gravitacional associada ao sistema partícula-Terra depende apenas da posição vertical y (altura) da partícula em relação à posição de referência $y = 0$.

8.4 Cálculo da Energia Potencial

Energia Potencial Elástica

Em um sistema bloco-mola, o bloco está se movendo na extremidade de uma mola de constante elástica k. Quando o bloco se desloca do ponto x_i para o ponto x_f, a força elástica $F_x = - kx$ realiza trabalho sobre o bloco. A variação correspondente da energia potencial elástica do sistema bloco-mola é

$$\Delta U = -\int_{x_i}^{x_f} (-kx)\, dx = k \int_{x_i}^{x_f} x\, dx = \frac{1}{2}k\Big[x^2\Big]_{x_i}^{x_f},$$

$$\Delta U = \tfrac{1}{2}kx_f^2 - \tfrac{1}{2}kx_i^2.$$

Se a configuração de referência é aquela em que a mola está relaxada e $x_i = 0$,

$$U - 0 = \tfrac{1}{2}kx^2 - 0,$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{U(x) = \tfrac{1}{2}kx^2}$$

Exemplo: energia potencial gravitacional

Uma preguiça de 2,0 kg está pendurada a 5,0 m acima do solo (Fig. 8-6).

(a) Qual é a energia potencial gravitacional U do sistema preguiça–Terra se tomarmos o ponto de referência $y = 0$ como estando (1) no do solo, (2) no piso de uma varanda que está a 3,0 m acima do solo, (3) no galho onde está a preguiça e (4) 1,0 m acima do galho? Considere a energia potencial como nula em $y = 0$.

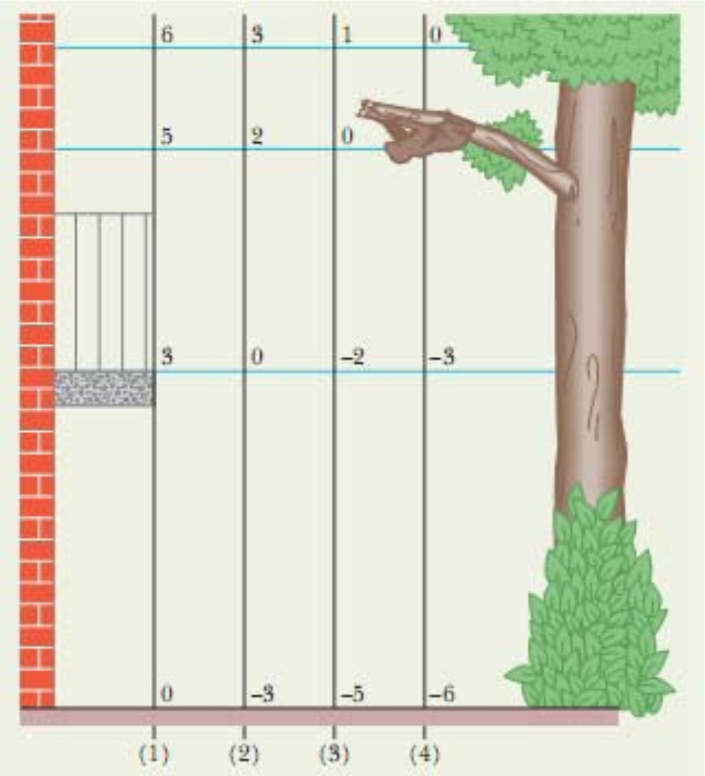


Fig. 8-6

Cálculos No caso da opção (1), a preguiça está em $y =$ 5,0 m e

$$U = mgy = (2{,}0\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2)(5{,}0\ \text{m})$$
$$= 98\ \text{J}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Para as outras escolhas, os valores de U são

(2) $U = mgy = mg(2{,}0\ \text{m}) = 39\ \text{J},$

(3) $U = mgy = mg(0) = 0\ \text{J},$

(4) $U = mgy = mg(-1{,}0\ \text{m})$
$= -19{,}6\ \text{J} \approx -20\ \text{J}.$ (Resposta)

(b) A preguiça desce da árvore. Para cada escolha do ponto de referência, qual é a variação ΔU da energia potencial do sistema preguiça–Terra?

Cálculo Nas quatro situações, temos o mesmo valor $\Delta y = -5{,}0$ m. Assim, para as situações (1) a (4), de acordo com a Eq. 8-7,

$$\Delta U = mg\,\Delta y = (2{,}0\ \text{kg})(9{,}8\ \text{m/s}^2)(-5{,}0\ \text{m})$$
$$= -98\ \text{J}. \qquad \text{(Resposta)}$$

8.5 Conservação da Energia Mecânica

Princípio da conservação de energia:

Em um sistema isolado no qual todas as mudanças de energia são causadas por forças conservativas, a energia cinética e a energia potencial podem variar, mas a soma, a energia mecânica E_{mec} do sistema, permanece constante.

A energia mecânica E_{mec} de um sistema é a soma da energia potencial U e da energia cinética K de todos os objetos do sistema

$$E_{\text{mec}} = K + U \qquad \text{(energia mecânica).}$$

Fazemos $\Delta K = -\Delta U.$ e $\Delta U = -W.$

Temos: $\Delta K = W$ ➡

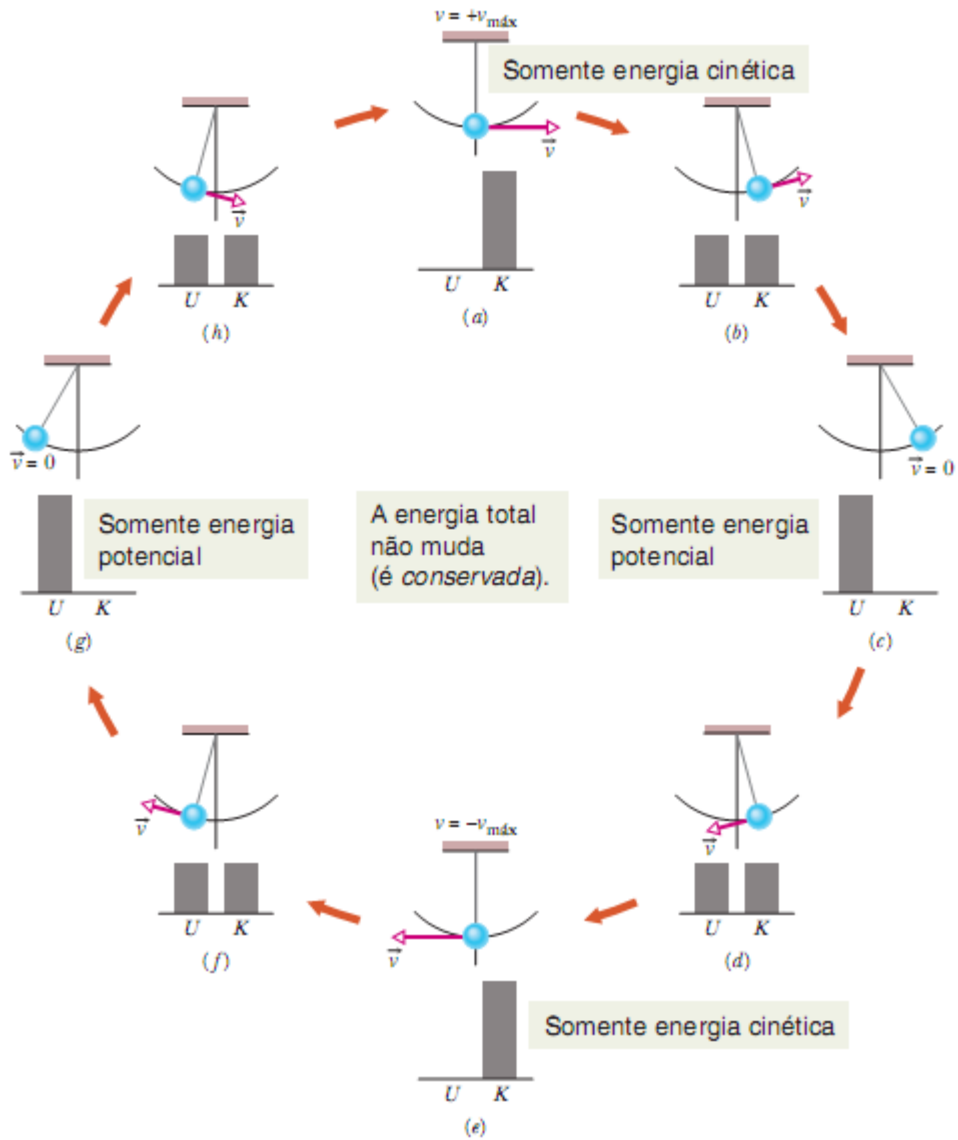
$$\begin{pmatrix}\text{soma de } K \text{ e } U \text{ para qualquer} \\ \text{estado do sistema}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{soma de } K \text{ e } U \text{ para qualquer} \\ \text{outro estado do sistema}\end{pmatrix}$$

$$\Delta E_{\text{mec}} = \Delta K + \Delta U = 0.$$

8.5 Conservação da Energia Mecânica

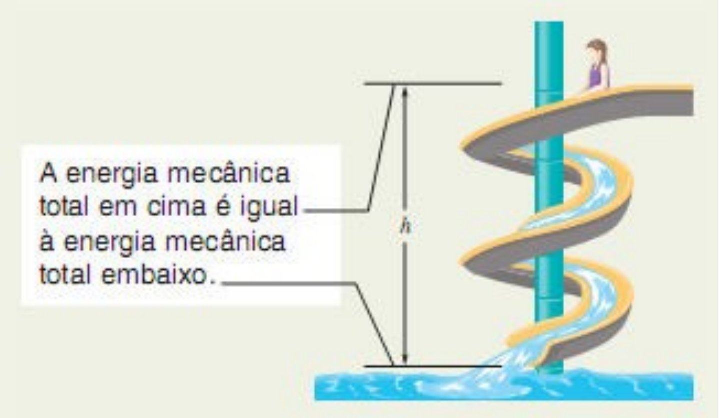
Um pêndulo oscila de um lado para outro. Durante um ciclo completo, os valores da energia potencial e cinética do pêndulo variam, mas a energia mecânica E_{mec} do sistema permanece constante. Podemos dizer que E_{mec} está sempre mudando da forma cinética para a forma potencial, e vice-versa. Nos estados (a) e (e), só existe energia cinética. Nos estados (c) e (g), só existe energia potencial. Nos estados (b), (d), (f) e (h), metade da energia é energia cinética e metade é energia potencial.

Se houvesse uma força de atrito, E_{mec} não seria conservada e, depois de algum tempo, o pêndulo deixaria de oscilar.



Exemplo: Toboágua

Na Fig. 8-8, uma criança de massa m parte do repouso no alto de um toboágua, a uma altura h = 8,5 m acima da base do brinquedo. Supondo que a presença da água torna o atrito desprezível, determine a velocidade da criança ao chegar à base do brinquedo.



(1) Não podemos calcular a velocidade da criança usando a aceleração durante o percurso, como fizemos em capítulos anteriores, porque não conhecemos a inclinação (ângulo) do toboágua. Entretanto, como a velocidade está relacionada à energia cinética, talvez possamos usar o princípio da conservação da energia mecânica para calcular a velocidade da criança. Nesse caso, não precisaríamos conhecer a inclinação do brinquedo. (2) A energia mecânica é conservada em um sistema *se* o sistema é isolado e *se* as transferências de energia dentro do sistema são causadas apenas por forças conservativas. Vamos verificar.

Forças Duas forças atuam sobre a criança. A *força gravitacional*, que é uma força conservativa, realiza trabalho sobre a criança. A *força normal* exercida pelo toboágua sobre a criança não realiza trabalho, pois a direção dessa força em qualquer ponto da descida é sempre perpendicular à direção em que a criança se move.

Cálculos Seja $E_{mec,a}$ a energia mecânica quando a criança está no alto do toboágua e $E_{mec,b}$ a energia mecânica quando a criança está na base. Nesse caso, de acordo com o princípio da conservação da energia mecânica,

$$E_{mec,b} = E_{mec,a}. \tag{8-19}$$

Explicitando os dois tipos de energia mecânica, escrevemos

$$K_b + U_b = K_a + U_a, \tag{8-20}$$

ou

$$\tfrac{1}{2}mv_b^2 + mgy_b = \tfrac{1}{2}mv_a^2 + mgy_a.$$

Dividindo a equação por m e reagrupando os termos, temos:

$$v_b^2 = v_a^2 + 2g(y_a - y_b).$$

Fazendo $v_a = 0$ e $y_a - y_b = h$, temos:

$$v_b = \sqrt{2gh} = \sqrt{(2)(9{,}8\ \text{m/s}^2)(8{,}5\ \text{m})}$$
$$= 13\ \text{m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Esta é a mesma velocidade que a criança teria se caísse verticalmente de uma altura de 8,5 m. Em um brinquedo de verdade, haveria algum atrito e a criança chegaria à base com uma velocidade um pouco menor.

8.6 Interpretação de uma Curva de Energia Potencial

$$\Delta U(x) = -W = -F(x)\,\Delta x.$$

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx} \qquad \text{(movimento em uma dimensão)}$$

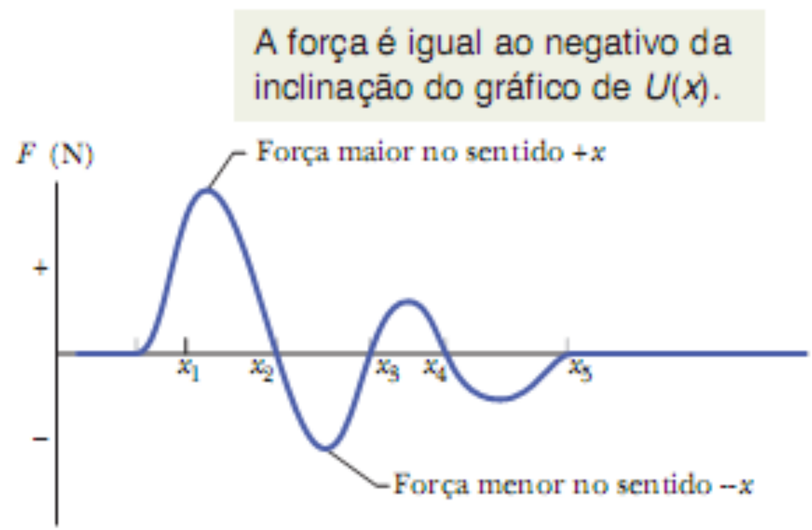
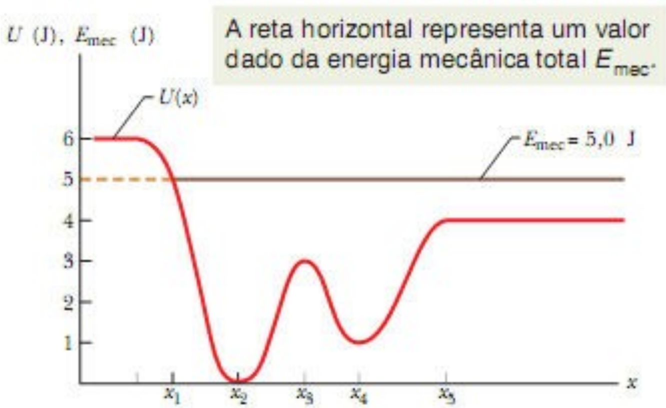
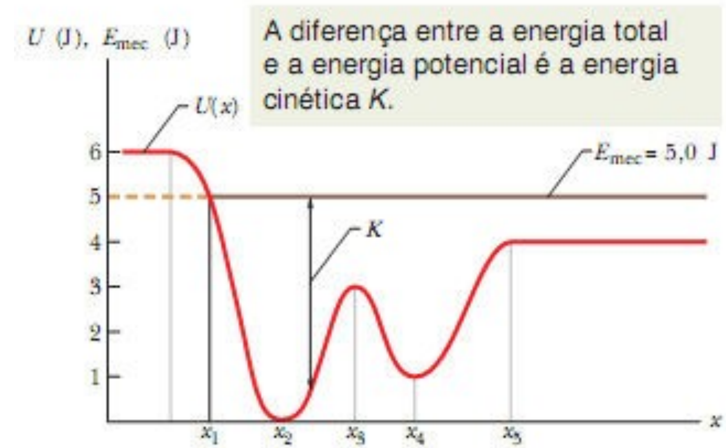


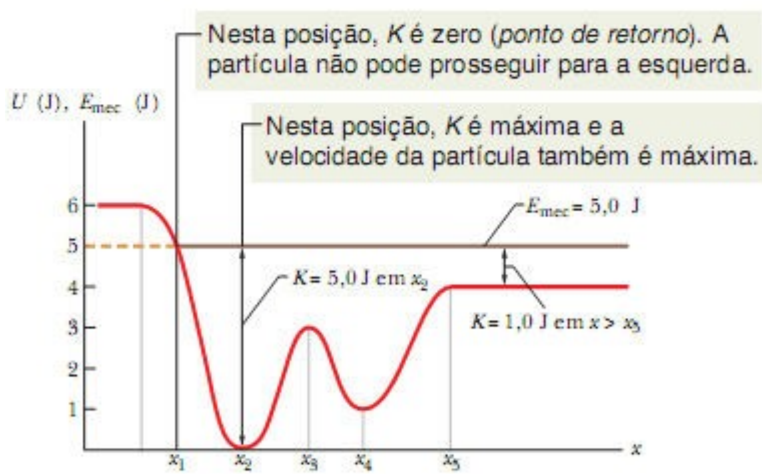
Gráfico de $U(x)$, a função energia potencial de um sistema que contém uma partícula que se move apenas no eixo x. Como não existe atrito, a energia mecânica é conservada.

Gráfico da força $F(x)$ que age sobre a partícula, determinada a partir da curva de energia potencial determinando a inclinação da tangente à curva em vários pontos.

8.6 Interpretação de uma Curva de Energia Potencial







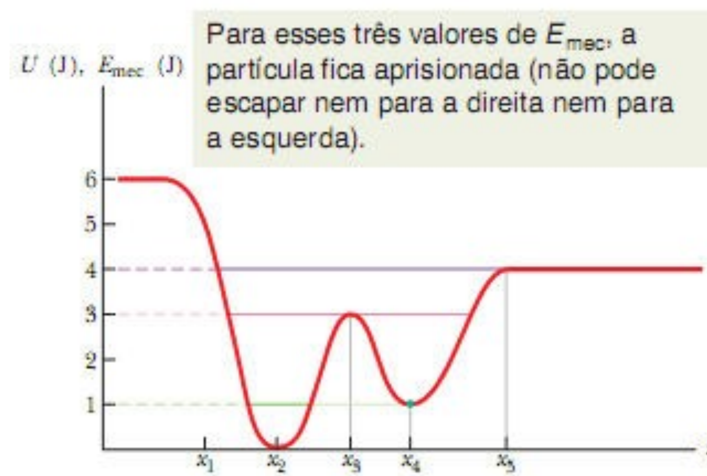
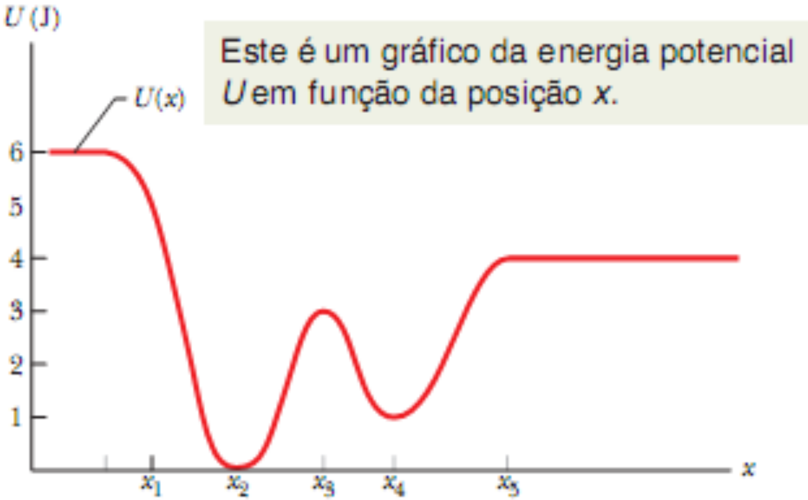


Gráfico de $U(x)$, com três valores possíveis de E_{mec} indicados.

8.6 Curva de Energia Potencial: Pontos de Equilíbrio



•Quando colocamos um objeto no ponto x_4, o objeto não pode se mover para a esquerda ou para a direita, já que, para isso, necessitaria de uma energia cinética negativa. Se o objeto for deslocado ligeiramente para a direita ou para a esquerda, uma força restauradora o fará voltar a x_4. Dizemos que essa é uma situação de **equilíbrio estável**.

•Nos pontos à direita de x_5, a energia mecânica do sistema é igual à energia potencial e o objeto permanece parado. Se o objeto for deslocado ligeiramente para a direita ou para a esquerda, permanecerá na nova posição. Dizemos que essa é uma situação de **equilíbrio neutro**.

• x_3 é um ponto no qual $K = 0$. Se a partícula estiver exatamente nesse ponto, a força sobre ela também será nula e a partícula permanecerá em repouso. Entretanto, se a partícula for ligeiramente deslocada em qualquer sentido, uma força a empurrará no mesmo sentido e a partícula continuará a se mover, afastando-se cada vez mais do ponto inicial. Dizemos que essa é uma situação de **equilíbrio instável**.

Exemplo: interpretação de um gráfico de energia potencial

Uma partícula de 2,00 kg se move ao longo de um eixo x, em um movimento unidimensional, sob a ação de uma força conservativa. A Fig. 8-10a mostra a energia potencial $U(x)$ associada à força. De acordo com o gráfico, se a partícula for colocada em qualquer posição entre $x = 0$ e $x = 7{,}00$ m, terá o valor indicado de U. Em $x = 6{,}5$ m, a velocidade da partícula é $\vec{v}_0 = (-4{,}00\ \text{m/s})\hat{\text{i}}$.

(a) Use os dados da Fig. 8-10a para determinar a velocidade da partícula em $x_1 = 4{,}5$ m.

Cálculos Em $x = 6{,}5$, a energia cinética da partícula é dada por

$$K_0 = \tfrac{1}{2}mv_0^2 = \tfrac{1}{2}(2{,}00\ \text{kg})(4{,}00\ \text{m/s})^2$$
$$= 16{,}0\ \text{J}.$$

Como a energia potencial neste ponto é $U = 0$, a energia mecânica é

$$E_{mec} = K_0 + U_0 = 16{,}0\ \text{J} + 0 = 16{,}0\ \text{J}.$$

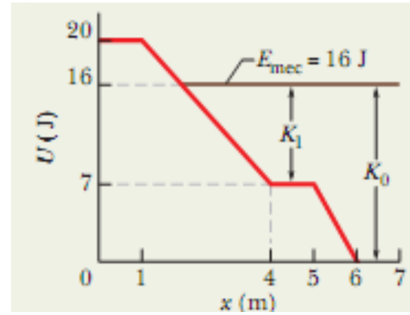
Este valor de E_{mec} está plotado como uma reta horizontal na Fig. 8-10a. Como se pode ver na figura, em $x = 4{,}5$ m a energia potencial é $U_1 = 7{,}0$ J. A energia cinética K_1 é a diferença entre E_{mec} e U_1:

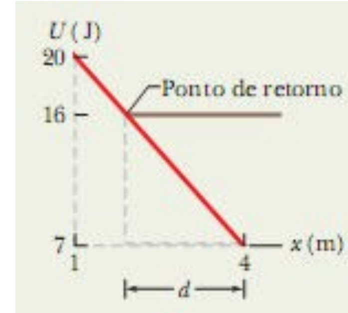
$$K_1 = E_{mec} - U_1 = 16{,}0\ \text{J} - 7{,}0\ \text{J} = 9{,}0\ \text{J}.$$

Como $K_1 = \dfrac{1}{2}mv_1^2$, temos:

$$v_1 = 3{,}0\ \text{m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

(b) Qual é a localização do ponto de retorno da partícula?





Cálculos Como K é a diferença entre E_{mec} e U, estamos interessados em determinar o ponto da Fig. 8-10a em que o gráfico de U encontra a reta horizontal de E_{mec}, como mostra a Fig. 8-10b. Como o gráfico de U é uma linha reta na Fig. 8-10b, podemos traçar dois triângulos retângulos semelhantes e usar o fato de que a razão entre os catetos é a mesma nos dois triângulos:

$$\frac{16 - 7{,}0}{d} = \frac{20 - 7{,}0}{4{,}0 - 1{,}0},$$

o que nos dá $d = 2{,}08$ m. Assim, o ponto de retorno está localizado em

$$x = 4{,}0\ \text{m} - d = 1{,}9\ \text{m}. \qquad \text{(Resposta)}$$

(c) Determine a força que age sobre a partícula quando ela se encontra na região $1{,}9\ \text{m} < x < 4{,}0$ m.

Cálculos Examinando o gráfico da Fig. 8-10b, vemos que na região $1{,}0\ \text{m} < x < 4{,}0$ m a força é

$$F = -\frac{20\ \text{J} - 7{,}0\ \text{J}}{1{,}0\ \text{m} - 4{,}0\ \text{m}} = 4{,}3\ \text{N}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Assim, a força tem módulo 4,3 N e está orientada no sentido positivo do eixo x. Este resultado é coerente com o fato de que a partícula, que inicialmente está se movendo para a esquerda, é freada pela força e depois passa a se mover para a direita.

8.7 Trabalho Realizado por uma Força Externa Sobre um Sistema

O trabalho é transferido de um sistema ou para um sistema através de uma força externa que age sobre o sistema.

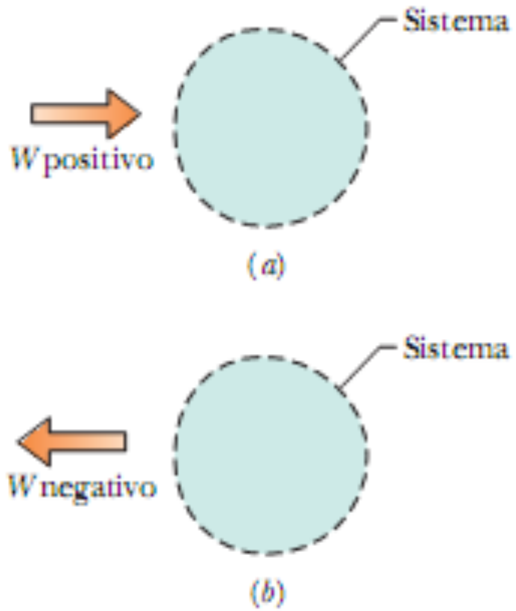


Figura 8-11 (*a*) O trabalho positivo *W* realizado sobre um sistema corresponde a uma transferência de energia para o sistema. (*b*) O trabalho negativo *W* corresponde a uma transferência de energia para fora do sistema.

8.7 Trabalho Realizado por uma Força Externa Sobre um Sistema

SEM ATRITO

$$W = \Delta K + \Delta U,$$

$$\boxed{W = \Delta E_{\text{mec}}}$$

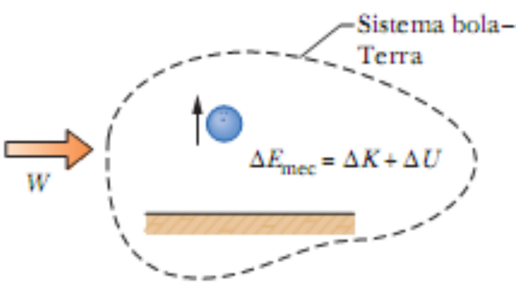
COM ATRITO

$$F - f_k = ma.$$

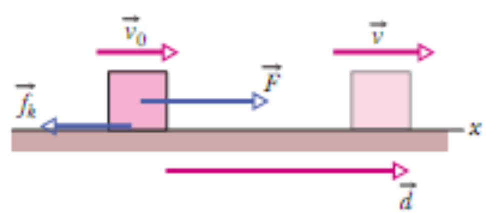
$$Fd = \Delta K + f_k d.$$

$$Fd = \Delta E_{\text{mec}} + f_k d.$$

A força usada para levantar a bola transfere energia para energia cinética e energia potencial.

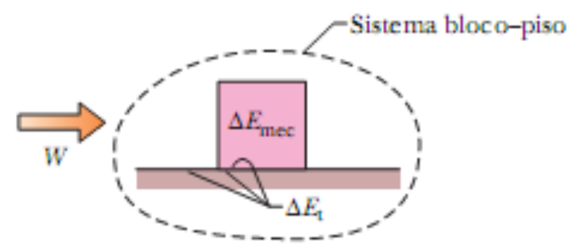


A força aplicada fornece energia. A força de atrito transfere dessa energia para energia térmica.



(a)

O trabalho realizado pela força aplicada modifica a energia mecânica e a energia térmica.



(b)

Exemplo: Variação de energia térmica

Um operário empurra um caixote de repolhos (massa total $m = 14$ kg) sobre um piso de concreto com uma força horizontal constante $\vec{F}$ de módulo 40 N. Em um deslocamento retilíneo de módulo $d = 0{,}50$ m, a velocidade do caixote diminui de $v_0 = 0{,}60$ m/s para $v = 0{,}20$ m/s.

(a) Qual foi o trabalho realizado pela força $\vec{F}$ e sobre que sistema o trabalho foi realizado?

IDEIA-CHAVE

Como a força aplicada $\vec{F}$ é constante, podemos calcular o trabalho realizado pela força usando a Eq. 7-7 ($W = Fd \cos \phi$).

Cálculo Substituindo os valores conhecidos e levando em conta o fato de que a força $\vec{F}$ e o deslocamento $\vec{d}$ apontam na mesma direção, temos:

$$W = Fd \cos \phi = (40 \text{ N})(0{,}50 \text{ m}) \cos 0°$$

$$= 20 \text{ J.} \qquad \text{(Resposta)}$$

Raciocínio Para determinar qual é o sistema sobre o qual o trabalho é realizado, devemos examinar quais são as energias que variam. Como a velocidade do caixote varia, certamente existe uma variação ΔK da energia cinética do caixote. Existe atrito entre o piso e o caixote e, portanto, uma variação da energia térmica? Observe que $\vec{F}$ e a velocidade do caixote apontam no mesmo sentido. Assim, se não existisse atrito, $\vec{F}$ aceleraria o caixote, fazendo a velocidade *aumentar*. Como a velocidade do caixote está *diminuindo*, deve existir atrito e, portanto, deve ocorrer uma variação ΔE_t da energia térmica do caixote e do piso. Assim, o sistema sobre o qual o trabalho é realizado é o sistema caixote–piso, já que as variações de energia ocorrem nesse sistema.

(b) Qual é o aumento ΔE_t da energia térmica do caixote e do piso?

IDEIA-CHAVE

Podemos relacionar ΔE_t ao trabalho W realizado pela força $\vec{F}$ usando a definição de energia da Eq. 8-33 para um sistema no qual existe atrito:

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t. \qquad (8\text{-}34)$$

Cálculos O valor de W foi calculado no item (a). Como a energia potencial não variou, a variação ΔE_{mec} da energia mecânica do caixote é igual à variação da energia cinética e podemos escrever:

$$\Delta E_{mec} = \Delta K = \tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2.$$

Substituindo esta expressão na Eq. 8-34 e explicitando ΔE_t, obtemos

$$\Delta E_t = W - (\tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2) = W - \tfrac{1}{2}m(v^2 - v_0^2)$$

$$= 20 \text{ J} - \tfrac{1}{2}(14 \text{ kg})[(0{,}20 \text{ m/s})^2 - (0{,}60 \text{ m/s})^2]$$

$$= 22{,}2 \text{ J} \approx 22 \text{ J.} \qquad \text{(Resposta)}$$

8.8 Conservação da Energia

Lei da Conservação de Energia

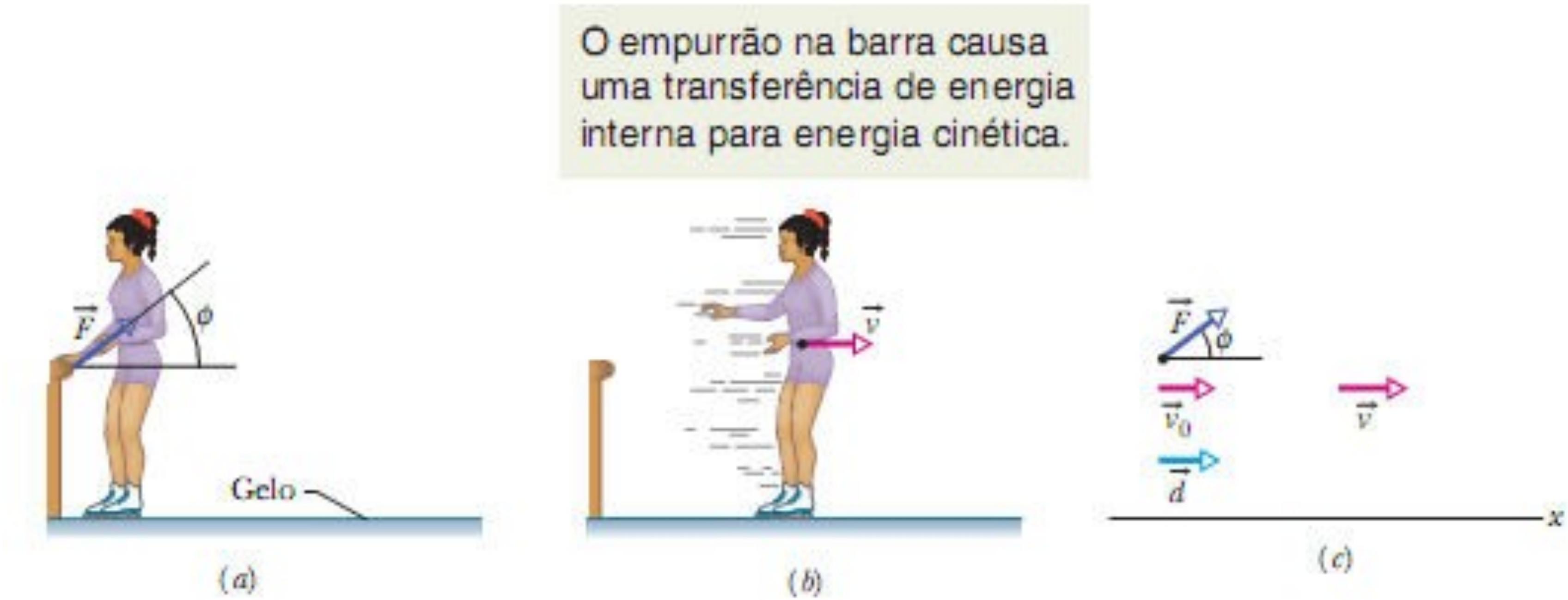
A energia total *E* de um sistema pode mudar apenas através da transferência de energia para dentro ou para fora do sistema

onde E_{mec} é a variação da energia mecânica do sistema, E_t é a variação da energia térmica do sistema e E_{int} é a variação de qualquer outro tipo de energia do sistema.

A energia total E de um *sistema isolado* não varia.

$$\Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int} = 0 \qquad \text{(sistema isolado).}$$

8.8 Conservação da Energia
Forças Externas e Transferências Internas de Energia



Uma força externa pode mudar a energia cinética ou a energia potencial de um objeto sem realizar trabalho, ou seja, sem transferir energia para o objeto. Para isso, basta transferir energia de um tipo para outro dentro do objeto.

8.8 Conservação da Energia: Potência

Potência é a taxa com a qual a energia é transferida por uma força de um tipo para outro. Se uma energia E é transferida em um intervalo de tempo t, a potência média desenvolvida pela força é dada por

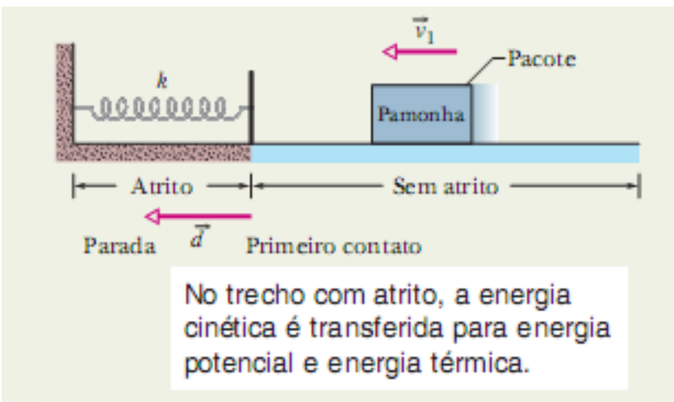
$$P_{\text{méd}} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

e a potência instantânea é dada por

$$P = \frac{dE}{dt}.$$

Exemplo: energia, atrito, mola e pamonha

Na Fig. 8-17, um pacote com 2,0 kg de pamonha, depois de deslizar sobre um piso com velocidade $v_1 = 4{,}0$ m/s, choca-se com uma mola, comprimindo-a até ficar momentaneamente em repouso. Até o ponto em que o pacote entra em contato com a mola inicialmente relaxada, o piso não possui atrito, mas enquanto o pacote está comprimindo a mola, o piso exerce sobre o pacote uma força de atrito cinético de módulo 15 N. Se $k = 10.000$ N/m, qual é a variação d do comprimento da mola entre o instante em que começa a ser comprimida e o instante em que o pacote para?



Forças: A força normal exercida pelo piso sobre o pacote não realiza trabalho. A força gravitacional também não realiza trabalho. Enquanto a mola está sendo comprimida, uma força elástica realiza trabalho. A força da mola também empurra uma parede rígida. Como existe atrito entre o pacote e o piso, o deslizamento do pacote aumenta a energia térmica do pacote e do piso.

Sistema: O sistema pacote-mola-piso-pamonha é um sistema isolado. De acordo com a lei da conservação da energia,

$$E_{mec,2} = E_{mec,1} - \Delta E_t. \tag{8-42}$$

Cálculos Na Eq. 8-42, vamos supor que o índice 1 corresponde ao estado inicial do pacote e o índice 2 corresponde ao estado no qual o pacote está momentaneamente em repouso e a mola foi comprimida de uma distância d. Para os dois estados, a energia mecânica do sistema é a soma da energia cinética do pacote ($K = \frac{1}{2}mv^2$) com a energia potencial da mola ($U = \frac{1}{2}kx^2$). No estado 1, $U = 0$ (pois a mola não está comprimida) e a velocidade do pacote é v_1. Assim, temos:

$$E_{mec,1} = K_1 + U_1 = \tfrac{1}{2}mv_1^2 + 0.$$

No estado 2, $K = 0$ (pois o pacote está parado) e a variação de comprimento da mola é d. Assim, temos:

$$E_{mec,2} = K_2 + U_2 = 0 + \tfrac{1}{2}kd^2.$$

Finalmente, usando a Eq. 8-31, podemos substituir a variação ΔE_t da energia térmica do pacote e do piso por $f_k d$. Nesse caso, a Eq. 8-42 se torna

$$\tfrac{1}{2}kd^2 = \tfrac{1}{2}mv_1^2 - f_k d.$$

Reagrupando os termos e substituindo os valores conhecidos, temos:

$$5000d^2 + 15d - 16 = 0.$$

Resolvendo esta equação do segundo grau, obtemos:

$$d = 0{,}055 \text{ m} = 5{,}5 \text{ cm}. \qquad \text{(Resposta)}$$