O trabalho W_s é positivo se a posição final do bloco está mais próxima da posição no estado relaxado ($x = 0$) que a posição inicial, e negativo se a posição final está mais afastada de $x = 0$ que a posição inicial. O trabalho é zero se a posição final do bloco está à mesma distância de $x = 0$ que a posição inicial.

Supondo que $x_i = 0$ e chamando a posição final de x, a Eq. 7-25 se torna

$$W_s = -\tfrac{1}{2}kx^2 \quad \text{(trabalho de uma força elástica).} \tag{7-26}$$

O Trabalho Realizado por uma Força Aplicada

Suponha agora que deslocamos o bloco ao longo do eixo x mantendo uma força $\vec{F}_a$ aplicada ao bloco. Durante o deslocamento, a força aplicada realiza sobre o bloco um trabalho W_a, enquanto a força elástica realiza um trabalho W_s. De acordo com a Eq. 7-10, a variação ΔK da energia cinética do bloco devido a essas duas transferências de energia é

$$\Delta K = K_f - K_i = W_a + W_s, \tag{7-27}$$

onde K_f é a energia cinética no final do deslocamento e K_i é a energia cinética no início do deslocamento. Se o bloco está em repouso no início e no fim do deslocamento, K_i e K_f são iguais a zero e a Eq. 7-27 se reduz a

$$W_a = -W_s. \tag{7-28}$$

Se um bloco que está preso a uma mola se encontra em repouso antes e depois de um deslocamento, o trabalho realizado sobre o bloco pela força aplicada responsável pelo deslocamento é o negativo do trabalho realizado sobre o bloco pela força elástica.

Atenção: Se o bloco não estiver em repouso antes e depois do deslocamento, esta afirmação não é verdadeira.

TESTE 2 Em três situações, as posições inicial e final, respectivamente, ao longo do eixo x da Fig. 7-11 são: (a) -3 cm, 2 cm; (b) 2 cm, 3 cm; (c) -2 cm, 2 cm. Em cada situação, o trabalho realizado sobre o bloco pela força elástica é positivo, negativo ou nulo?

Exemplo 7-7

Um pacote de pralina está sobre um piso sem atrito, preso à extremidade livre de uma mola, como na Fig. 7-11*a*. Uma força aplicada para a direita, de módulo $F_a = 4{,}9$ N, seria necessária para manter o bloco em $x_1 = 12$ mm.

(a) Qual é o trabalho realizado sobre o bloco pela força elástica da mola se o bloco é puxado para a direita de $x_0 = 0$ até $x_2 = 17$ mm?

IDÉIA-CHAVE Quando o bloco se move de uma posição para outra, a força elástica realiza trabalho sobre ele, de acordo com a Eq. 7-25 ou a Eq. 7-26.

Cálculos: Sabemos que a posição inicial x_i é 0 e que a posição final é 17 mm, mas não conhecemos a constante elástica k. Podemos calcular k usando a Eq. 7-21 (lei de Hooke), mas precisamos da seguinte informação adicional: Para que o bloco se mantenha em repouso em $x_1 = 12$ mm, a força elástica deve equilibrar a força aplicada (é o que diz a segunda lei de Newton). Assim, a força elástica F_x tem que ser $-4{,}9$ N (para a esquerda na Fig. 7-11*b*) e, portanto, de acordo com a Eq. 7-21 ($F_x = -kx$), temos:

$$k = \frac{F_x}{x_1} = -\frac{-4{,}9\ \text{N}}{12 \times 10^{-3}\ \text{m}} = 408\ \text{N/m}.$$

Com o bloco em $x_2 = 17$ mm, a Eq. 7-26 nos dá

$$W_s = -\tfrac{1}{2}kx_2^2 = -\tfrac{1}{2}(408\ \text{N/m})(17 \times 10^{-3}\ \text{m})^2 = -0{,}059\ \text{J}. \quad \text{(Resposta)}$$

(b) Em seguida, o bloco é deslocado para a esquerda até $x_3 = -12$ mm. Que trabalho a força elástica realiza sobre o bloco neste deslocamento? Explique o sinal deste trabalho.

Cálculo: Agora, $x_i = +17$ mm, $x_f = -12$ mm, e a Eq. 7-25 nos dá

$$\begin{aligned} W_s &= \tfrac{1}{2}kx_i^2 - \tfrac{1}{2}kx_f^2 = \tfrac{1}{2}k(x_i^2 - x_f^2) \\ &= \tfrac{1}{2}(408\ \text{N/m})[(17\times10^{-3}\ \text{m})^2 - (-12\times10^{-3}\ \text{m})^2] \\ &= 0{,}030\ \text{J} = 30\ \text{mJ}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

Este trabalho realizado sobre o bloco pela força elástica é positivo porque a força elástica realiza mais trabalho positivo quando o bloco é deslocado de $x_i = +17$ mm para a posição relaxada da mola do que trabalho negativo quando o bloco é deslocado da posição relaxada da mola até $x_f = -12$ mm.

Exemplo 7-8

Na Fig. 7-12, depois de deslizar sobre uma superfície horizontal sem atrito com velocidade $v = 0{,}50$ m/s, um pote de cominho de massa $m = 0{,}40$ kg colide com uma mola de constante elástica $k = 750$ N/m e começa a comprimi-la. No instante em que o pote pára momentaneamente por causa da força exercida pela mola, de que distância d a mola foi comprimida?

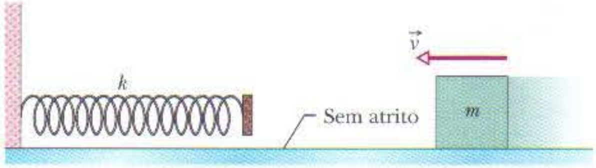


FIG. 7-12 Um pote de massa m se move com velocidade $\vec{v}$ em direção a uma mola de constante k.

IDÉIAS-CHAVE

1. O trabalho W_s realizado sobre o pote pela força elástica está relacionado à distância d pedida através da Eq. 7-26 ($W_s = -\frac{1}{2}kx^2$) com d substituindo x.
2. O trabalho W_s também está relacionado à energia cinética do pote através da Eq. 7-10 ($K_f - K_i = W$).
3. A energia cinética do pote tem um valor inicial $K = \frac{1}{2}mv^2$ e é nula quando o pote está momentaneamente em repouso.

Cálculos: Combinando as duas primeiras idéias, escrevemos o teorema do trabalho e energia cinética para o pote na seguinte forma:

$$K_f - K_i = -\tfrac{1}{2}kd^2.$$

Substituindo as energias cinéticas inicial e final pelos seus valores, obtidos através da terceira idéia, temos:

$$0 - \tfrac{1}{2}mv^2 = -\tfrac{1}{2}kd^2.$$

Simplificando, explicitando d e substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$\begin{aligned} d &= v\sqrt{\frac{m}{k}} = (0{,}50\ \text{m/s})\sqrt{\frac{0{,}40\ \text{kg}}{750\ \text{N/m}}} \\ &= 1{,}2\times10^{-2}\ \text{m} = 1{,}2\ \text{cm}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

7-8 | Trabalho Realizado por uma Força Variável Genérica

Análise Unidimensional

Vamos voltar à situação da Fig. 7-2, mas agora suponha que a força aponta no sentido positivo do eixo x e que o módulo da força varia com a posição x. Assim, quando a conta (partícula) se move, o módulo $F(x)$ da força que realiza trabalho sobre ela varia. Apenas o módulo da força varia; sua orientação permanece a mesma. Além disso, o módulo da força em qualquer posição não varia com o tempo.

A Fig. 7-13*a* mostra o gráfico de uma *força variável unidimensional* como a que acabamos de descrever. Queremos obter uma expressão para o trabalho realizado por esta força sobre a partícula quando ela se desloca de uma posição inicial x_i para uma posição final x_f. Entretanto, não podemos usar a Eq. 7-7 ($W = Fd\cos\phi$) porque ela só é válida no caso de uma força constante $\vec{F}$. Assim, usaremos novamente os métodos do cálculo. Dividimos a área sob a curva da Fig. 7-13*a* em um grande número de faixas estreitas de largura Δx (Fig. 7-13*b*). Escolhemos Δx suficientemente pequeno para que possamos considerar a força $F(x)$ aproximadamente constante nesse intervalo. Vamos chamar de $F_{j,\text{méd}}$ o valor médio de $F(x)$ no intervalo de ordem j. Nesse caso, $F_{j,\text{méd}}$ na Fig. 7-13*b* é a altura da faixa de ordem j.

Com $F_{j,\text{méd}}$ constante, o incremento (pequena quantidade) de trabalho ΔW_j realizado pela força no intervalo de ordem j pode ser calculado usando a Eq. 7-7:

$$\Delta W_j = F_{j,\text{méd}}\,\Delta x. \tag{7-29}$$

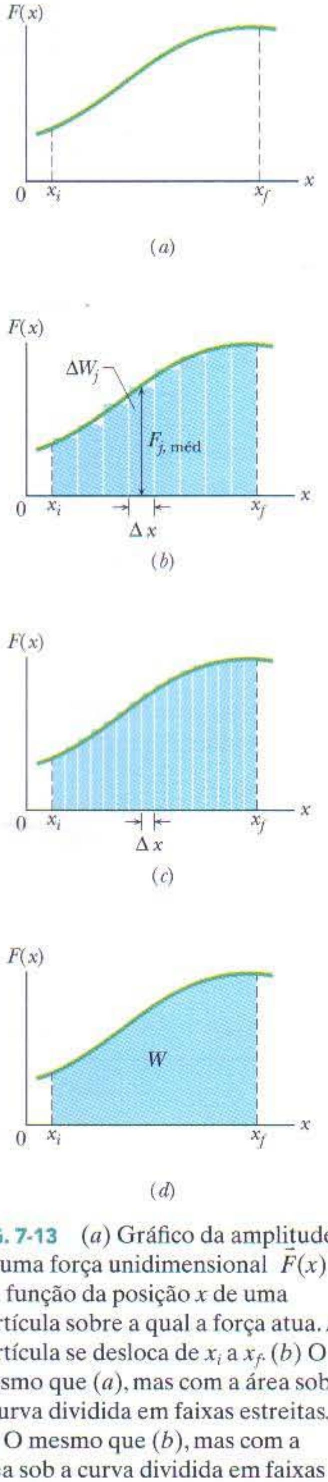


FIG. 7-13 (a) Gráfico da amplitude de uma força unidimensional $\vec{F}(x)$ em função da posição x de uma partícula sobre a qual a força atua. A partícula se desloca de x_i a x_f. (b) O mesmo que (a), mas com a área sob a curva dividida em faixas estreitas. (c) O mesmo que (b), mas com a área sob a curva dividida em faixas mais estreitas. (d) O caso-limite. O trabalho realizado pela força é dado pela Eq. 7-32 e é representado pela área sombreada entre a curva e o eixo x e entre x_i e x_f.

Na Fig. 7-13b, ΔW_j é, portanto, igual à área sob a faixa retangular sombreada de ordem j.

Para determinar o trabalho total W realizado pela força quando a partícula se desloca de x_i para x_f, somamos as áreas de todas as faixas entre x_i e x_f da Fig. 7-13b:

$$W = \Sigma\, \Delta W_j = \Sigma\, F_{j,\text{méd}}\, \Delta x. \tag{7-30}$$

A Eq. 7-30 é uma aproximação, porque a "escada" formada pelos lados superiores dos retângulos da Fig. 7-13b é apenas uma aproximação da curva real de $F(x)$.

Podemos melhorar a aproximação reduzindo a largura Δx dos retângulos e usando mais retângulos, como na Fig. 7-13c. No limite, fazemos a largura dos retângulos tender a zero; nesse caso, o número de retângulos se torna infinitamente grande e temos, como resultado exato,

$$W = \lim_{\Delta x \to 0} \Sigma\, F_{j,\text{méd}}\, \Delta x. \tag{7-31}$$

Este limite é exatamente a definição da integral da função $F(x)$ entre os limites x_i e x_f. Assim, a Eq. 7-31 se torna

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx \quad \text{(trabalho de uma força variável).} \tag{7-32}$$

Se conhecemos a função $F(x)$, podemos substituí-la na Eq. 7-32, introduzir os limites de integração apropriados, efetuar a integração e assim calcular o trabalho. (O Apêndice E contém uma lista das integrais mais usadas.) Geometricamente, o trabalho é igual à área entre a curva de $F(x)$ e o eixo x, entre os limites x_i e x_f (área sombreada na Fig. 7-13d).

Análise Tridimensional

Considere uma partícula sob a ação de uma força tridimensional

$$\vec{F} = F_x\hat{\text{i}} + F_y\hat{\text{j}} + F_z\hat{\text{k}}, \tag{7-33}$$

cujas componentes F_x, F_y e F_z podem depender da posição da partícula, ou seja, elas podem ser funções da posição. Vamos, porém, fazer três simplificações: F_x pode depender de x mas não de y ou z, F_y pode depender de y mas não de x ou z e F_z pode depender de z mas não de x ou y. Suponha que a partícula sofra um deslocamento incremental

$$d\vec{r} = dx\hat{\text{i}} + dy\hat{\text{j}} + dz\hat{\text{k}}. \tag{7-34}$$

De acordo com a Eq. 7-8, o incremento dW do trabalho realizado sobre a partícula pela força $\vec{F}$ durante o deslocamento $d\vec{r}$ é

$$dW = \vec{F}\cdot d\vec{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz. \tag{7-35}$$

O trabalho W realizado por $\vec{F}$ enquanto a partícula se move de uma posição inicial r_i de coordenadas (x_i, y_i, z_i) para uma posição final r_f de coordenadas (x_f, y_f, z_f) é, portanto,

$$W = \int_{r_i}^{r_f} dW = \int_{x_i}^{x_f} F_x\, dx + \int_{y_i}^{y_f} F_y\, dy + \int_{z_i}^{z_f} F_z\, dz. \tag{7-36}$$

Se $\vec{F}$ possui apenas a componente x, os termos da Eq. 7-36 que envolvem y e z são nulos e a equação se reduz à Eq. 7-32.

Teorema do Trabalho e Energia Cinética com uma Força Variável

A Eq. 7-32 permite calcular o trabalho realizado por uma força variável sobre uma partícula em uma situação unidimensional. Vamos agora verificar se o trabalho calculado é realmente igual à variação da energia cinética da partícula, como afirma o teorema do trabalho e energia cinética.

Considere uma partícula de massa m que se move ao longo de um eixo x e está sujeita a uma força $F(x)$ paralela ao eixo x. De acordo com a Eq. 7-32, o trabalho realizado por esta força sobre a partícula quando a partícula se desloca da posição x_i para a posição x_f é dado por

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x)\,dx = \int_{x_i}^{x_f} ma\,dx, \tag{7-37}$$

onde usamos a segunda lei de Newton para substituir $F(x)$ por ma. Podemos escrever o integrando $ma\,dx$ da Eq. 7-37 como

$$ma\,dx = m\frac{dv}{dt}\,dx. \tag{7-38}$$

Usando a regra da cadeia para derivadas, temos:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx}v, \tag{7-39}$$

e a Eq. 7-38 se torna

$$ma\,dx = m\frac{dv}{dt}\,v\,dx = mv\,dv. \tag{7-40}$$

Substituindo a Eq. 7-40 na Eq. 7-37, obtemos

$$\begin{aligned} W &= \int_{v_i}^{v_f} mv\,dv = m\int_{v_i}^{v_f} v\,dv \\ &= \tfrac{1}{2}mv_f^2 - \tfrac{1}{2}mv_i^2. \end{aligned} \tag{7-41}$$

Observe que quando mudamos a variável de integração de x para v tivemos que expressar os limites da integral em termos da nova variável. Observe também que, como a massa m é constante, pudemos colocá-la do lado de fora da integral.

Reconhecendo os termos do lado direito da Eq. 7-41 como energias cinéticas, podemos escrever esta equação na forma

$$W = K_f - K_i = \Delta K,$$

que é o teorema do trabalho e energia cinética.

Exemplo 7-9

Na anestesia epidural, como a usada nos partos, o médico ou anestesista precisa introduzir uma agulha nas costas do paciente e atravessar várias camadas de tecido até chegar a uma região estreita chamada espaço epidural, que envolve a medula espinhal. A agulha é usada para injetar o líquido anestésico. Esse delicado procedimento requer muita prática, já que o médico precisa saber quando chegou ao espaço epidural e não pode ultrapassar a região, um erro que poderia resultar em sérias complicações.

A sensibilidade de um médico em relação à penetração da agulha se baseia no fato de que a força que deve ser aplicada à agulha para fazê-la avançar através dos tecidos é variável. A Fig. 7-14a é um gráfico do módulo F da força em função do deslocamento x da ponta da agulha durante

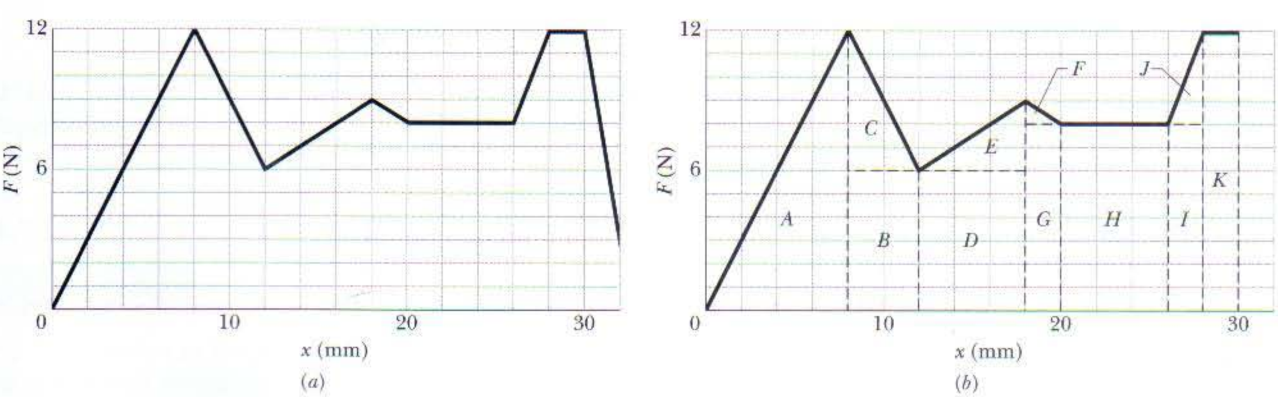


FIG. 7-14 (a) A amplitude F da força em função do deslocamento x da agulha em uma anestesia epidural. (b) Divisão da região entre a curva e o eixo em várias partes para calcular a área.

uma anestesia epidural típica. (Os dados originais foram retificados para produzir os segmentos de reta.) Quando x cresce a partir de 0, a pele oferece resistência à agulha, mas em $x = 8{,}0$ mm a pele é perfurada e a força necessária diminui. Da mesma forma, a agulha perfura o ligamento interespinhoso em $x = 18$ mm e o ligamento amarelo, relativamente duro, em $x = 30$ mm. A agulha entra, então, no espaço epidural (onde deve ser injetado o líquido anestésico) e a força diminui bruscamente. Um médico recém-formado precisa se familiarizar com este comportamento da força com o deslocamento para saber quando parar de empurrar a agulha. (Este é o comportamento a ser programado em uma simulação em realidade virtual de uma anestesia epidural.) Qual é o trabalho W realizado pela força exercida sobre a agulha para levá-la até o espaço epidural em $x = 30$ mm?

IDÉIAS-CHAVE (1) Podemos calcular o trabalho W realizado pela força variável $F(x)$ integrando a força para todas as posições x consideradas. De acordo com a Eq. 7-32,

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

Queremos calcular o trabalho realizado pela força durante o deslocamento de $x_i = 0$ até $x_f = 0{,}030$ m. (2) Podemos calcular a integral determinando a área sob a curva da Fig. 7-14a:

$$W = \begin{pmatrix} \text{área entre a curva da força} \\ \text{e o eixo } x, \text{ de } x_i \text{ a } x_f \end{pmatrix}.$$

Cálculos: Como nosso gráfico é formado por segmentos de reta, podemos calcular a área separando a região sob a curva em regiões retangulares e triangulares, como na Fig. 7-14b. Assim, por exemplo, a área da região triangular A é

$$\text{área}_A = \tfrac{1}{2}(0{,}0080\text{ m})(12\text{ N}) = 0{,}048\text{ N}\cdot\text{m} = 0{,}048\text{ J}.$$

Depois de calcular as áreas de todas as regiões da Fig. 7-14b, descobrimos que o trabalho total é

$$\begin{aligned} W &= (\text{a soma da áreas das regiões de } A \text{ a } K) \\ &= 0{,}048 + 0{,}024 + 0{,}012 + 0{,}036 + 0{,}009 + 0{,}001 \\ &\quad + 0{,}016 + 0{,}048 + 0{,}016 + 0{,}004 + 0{,}024 \\ &= 0{,}238\text{ J}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

Exemplo 7-10

A força $\vec{F} = (3x^2\text{ N})\hat{\imath} + (4\text{ N})\hat{\jmath}$, com x em metros, age sobre uma partícula, mudando apenas a energia cinética da partícula. Qual é o trabalho realizado sobre a partícula quando ela se desloca das coordenadas (2 m, 3 m) para (3 m, 0 m)? A velocidade da partícula aumenta, diminui ou permanece a mesma?

IDÉIA-CHAVE A força é variável porque sua componente x depende do valor de x. Assim, não podemos usar as Eqs. 7-7 e 7-8 para calcular o trabalho realizado. Em vez disso, devemos usar a Eq. 7-36 para integrar a força.

Cálculo: Escrevemos duas integrais, uma para cada eixo:

$$\begin{aligned} W &= \int_2^3 3x^2\,dx + \int_3^0 4\,dy = 3\int_2^3 x^2\,dx + 4\int_3^0 dx^4 \\ &= 3[\tfrac{1}{3}x^3]_2^3 + 4[y]_3^0 = [3^3 - 2^3] + 4[0-3] \\ &= 7{,}0\text{ J}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

O resultado positivo significa que a força $\vec{F}$ transfere energia para a partícula. Assim, a energia cinética da partícula aumenta e, como $K = \tfrac{1}{2}mv^2$, a velocidade escalar também aumenta.

7-9 | Potência

A taxa de variação com o tempo do trabalho realizado por uma força recebe o nome de **potência**. Se uma força realiza um trabalho W em um intervalo de tempo Δt, a **potência média** desenvolvida durante esse intervalo de tempo é

$$P_{\text{méd}} = \frac{W}{\Delta t} \quad \text{(potência média)}. \tag{7-42}$$

A **potência instantânea** P é a taxa de variação instantânea com a qual o trabalho é realizado, que pode ser escrita como

$$p = \frac{dW}{dt} \quad \text{(potência instantânea)}. \tag{7-43}$$

Suponha que conhecemos o trabalho $W(t)$ realizado por uma força em função do tempo. Nesse caso, para determinar a potência instantânea P, digamos, no instante $t = 3{,}0$ s da realização do trabalho, basta derivar $W(t)$ em relação ao tempo e calcular o valor da derivada para $t = 3{,}0$ s.

A unidade de potência no SI é o joule por segundo. Essa unidade é usada com tanta freqüência que recebeu um nome especial, o **watt** (W), em homenagem a James Watt, cuja contribuição foi fundamental para o aumento da potência das máquinas a vapor. No sistema britânico a unidade de potência é o pé-libra por segundo. O horsepower também é freqüentemente usado. Seguem as relações entre essas unidades e a unidade de potência no SI.

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0{,}738 \text{ ft} \cdot \text{lb/s} \tag{7-44}$$

e

$$1 \text{ horsepower} = 1 \text{ hp} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s} = 746 \text{ W}. \tag{7-45}$$

Examinando a Eq. 7-42 vemos que o trabalho pode ser expresso como potência multiplicada por tempo, como na unidade quilowatt-hora, muito usada na prática. A relação entre o quilowatt-hora e o joule é a seguinte:

$$\begin{aligned} 1 \text{ quilowatt-hora} &= 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = (10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) \\ &= 3{,}60 \times 10^6 \text{ J} = 3{,}60 \text{ MJ}. \end{aligned} \tag{7-46}$$

Talvez por aparecer nas contas de luz, o watt e o quilowatt-hora são normalmente associados à energia elétrica. Entretanto, podem ser usados para medir outras formas de potência e energia. Se você apanha um livro do chão e o coloca sobre uma mesa, pode dizer que realizou um trabalho, digamos, de 4×10^{-6} kW·h (ou 4 mW·h).

Também podemos expressar a taxa com a qual uma força realiza trabalho sobre uma partícula (ou um objeto que se comporta como uma partícula) em termos da força e da velocidade da partícula. Para uma partícula que se move em linha reta (ao longo do eixo x, digamos) sob a ação de uma força $\vec{F}$ que faz um ângulo ϕ na direção de movimento da partícula, a Eq. 7-43 se torna

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{F\cos\phi\, dx}{dt} = F\cos\phi\left(\frac{dx}{dt}\right),$$

ou

$$P = Fv\cos\phi. \tag{7-47}$$

Escrevendo o lado direito da Eq. 7-47 como o produto escalar $\vec{F}\cdot\vec{v}$, a equação se torna

$$P = \vec{F}\cdot\vec{v} \quad \text{(potência instantânea).} \tag{7-48}$$

Assim, por exemplo, a picape da Fig. 7-15 exerce uma força $\vec{F}$ sobre a carga que está sendo rebocada, que tem velocidade $\vec{v}$ em um certo instante. A potência instantânea desenvolvida por $\vec{F}$ é a taxa com a qual $\vec{F}$ realiza trabalho sobre a carga nesse instante e é dada pelas Eqs. 7-47 e 7-48. Podemos dizer que essa potência é "a potência da picape", mas devemos ter em mente o que isso significa: Potência é a taxa com a qual a *força* aplicada realiza trabalho.

FIG. 7-15 A potência desenvolvida pela força aplicada à carga pela picape é igual à taxa com a qual a força realiza trabalho sobre a carga. (*REGLAIN FREDERIC/Gamma-Presse, Inc.*)

TESTE 3 Um bloco descreve um movimento circular uniforme sob a ação de uma corda presa ao bloco e ao centro da trajetória. A potência desenvolvida pela força que a corda exerce sobre o bloco é positiva, negativa ou nula?

Exemplo 7-11

A Fig. 7-16 mostra as forças constantes $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ que agem sobre uma caixa enquanto ela desliza para a direita sobre um piso sem atrito. A força $\vec{F}_1$ é horizontal, de módulo 2,0 N; a força $\vec{F}_2$ está inclinada para cima de um ângulo de 60° em relação ao piso e tem um módulo de 4,0 N. A velocidade escalar v da caixa em um certo instante é 3,0 m/s. Quais são as potências desenvolvidas pelas duas forças que agem sobre a caixa nesse instante? Qual é a

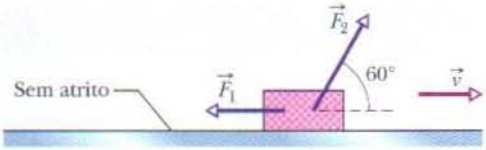


FIG. 7-16 Duas forças, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$, agem sobre uma caixa que desliza para a direita em um piso sem atrito. A velocidade da caixa é $\vec{v}$.

potência total? A potência total está variando nesse instante?

IDÉIA-CHAVE Estamos interessados na potência instantânea, e não na potência média em um intervalo de tempo. Além disso, conhecemos a velocidade da caixa, e não o trabalho realizado sobre a caixa.

Cálculo: Usamos a Eq. 7-47 duas vezes, uma para cada força. Para a força $\vec{F}_1$, que faz um ângulo ϕ_1 com a velocidade $\vec{v}$, temos:

$$P_1 = F_1 v \cos\phi_1 = (2{,}0\ \text{N})(3{,}0\ \text{m/s})\cos 180^\circ = -6{,}0\ \text{W}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Este resultado negativo indica que a força $\vec{F}_1$ está *recebendo* energia da caixa à taxa de 6,0 J/s.

No caso da força $\vec{F}_2$, que faz um ângulo ϕ_2 com a velocidade $\vec{v}$, temos:

$$P_2 = F_2 v \cos\phi_2 = (4{,}0\ \text{N})(3{,}0\ \text{m/s})\cos 60^\circ = 6{,}0\ \text{W}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Este resultado positivo indica que a força $\vec{F}_2$ está *fornecendo* energia à caixa à taxa de 6,0 J/s.

A potência total é a soma das duas potências:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 = -6{,}0\ \text{W} + 6{,}0\ \text{W} = 0, \qquad \text{(Resposta)}$$

que nos diz que a taxa total de transferência de energia é zero. Assim, a energia cinética ($K = \frac{1}{2}mv^2$) da caixa não está variando, e a velocidade da caixa continua a ser 3,0 m/s. Como as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ e a velocidade $\vec{v}$ não variam, vemos pela Eq. 7-48 que P_1 e P_2 são constantes e o mesmo acontece com P_{tot}.

Exemplo 7-12

Contanto que um *funny car* não perca tração, o tempo que leva para percorrer uma distância D a partir do repouso depende principalmente da potência P do motor. Supondo que a potência é constante, determine o valor desse tempo em termos de D e P.

IDÉIAS-CHAVE (1) A potência de um motor é a taxa com a qual o motor pode realizar trabalho, expressa pela Eq. 7-43 ($P = dW/dt$). (2) Podemos relacionar o trabalho realizado durante uma corrida à energia cinética através da Eq. 7-10, o teorema do trabalho e energia cinética ($W = K_f - K_i$).

Potência e energia cinética: De acordo com o teorema do trabalho e energia cinética, uma pequena quantidade de trabalho dW produz uma pequena variação dK na energia cinética: $dW = dK$. Substituindo dW por dK na Eq. 7-43 e explicitando dK, obtemos:

$$dK = P\,dt.$$

Integrando ambos os membros e levando em conta o fato de que a energia cinética K é 0 quando a corrida começa em $t = 0$, temos:

$$\int_0^K dK = \int_0^t P\,dt$$

e

$$K = Pt.$$

Depois de substituir K por $\frac{1}{2}mv^2$, explicitamos v, a velocidade no final da corrida:

$$v = \left(\frac{2Pt}{m}\right)^{1/2} \qquad (7\text{-}49)$$

Distância e velocidade: De acordo com a definição de velocidade do Capítulo 2, $v = dx/dt$. Reagrupando os termos e integrando ambos os membros, obtemos

$$\int_0^D dx = \int_0^t v\,dt.$$

Substituindo a velocidade pelo seu valor, dado pela Eq. 7-49, temos:

$$\int_0^D dx = \int_0^t \left(\frac{2Pt}{m}\right)^{1/2} dt = \left(\frac{2P}{m}\right)^{1/2} \int_0^t t^{1/2}\,dt.$$

Calculando a integral, obtemos

$$D = \left(\frac{2P}{m}\right)^{1/2} \frac{2}{3} t^{3/2}.$$

Explicitando t, encontramos o tempo que um *funny car* leva para percorrer uma distância em termos de D e P:

$$t = \left(\frac{3}{2}D\right)^{2/3} \left(\frac{m}{2P}\right)^{1/3}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Comentários: Em palavras, o tempo é inversamente proporcional à raiz cúbica da potência. Se a equipe consegue extrair mais potência do motor, o tempo diminui porque a proporção é *inversa*, mas apenas modestamente, porque existe uma *raiz cúbica* envolvida.

REVISÃO E RESUMO

Energia Cinética A **energia cinética** K associada ao movimento de uma partícula de massa m e velocidade escalar v, onde v é muito menor que a velocidade da luz, é dada por

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{(energia cinética)}. \tag{7-1}$$

Trabalho **Trabalho** W é a energia transferida para um objeto ou de um objeto através de uma força que age sobre o objeto. Quando o objeto recebe energia o trabalho é positivo; quando o objeto cede energia, o trabalho é negativo.

Trabalho Realizado por uma Força Constante O trabalho realizado sobre uma partícula por uma força constante $\vec{F}$ durante um deslocamento $\vec{d}$ é dado por

$$W = Fd\cos\theta = \vec{F}\cdot\vec{d} \quad \text{(trabalho, força constante)}, \tag{7-7, 7-8}$$

onde ϕ é o ângulo constante entre $\vec{F}$ e $\vec{d}$. Apenas a componente de $\vec{F}$ na direção do deslocamento $\vec{d}$ pode realizar trabalho sobre o objeto. Quando duas ou mais forças agem sobre um objeto, o **trabalho total** é a soma dos trabalhos realizados pelas forças, que também é igual ao trabalho que seria realizado pela força resultante $\vec{F}_{res}$.

Trabalho e Energia Cinética Para uma partícula, uma variação ΔK da energia cinética é igual ao trabalho total W realizado sobre a partícula:

$$\Delta K = K_f - K_i = W \quad \text{(teorema do trabalho e energia cinética)}, \tag{7-10}$$

onde K_i é a energia cinética inicial da partícula e K_f é a energia cinética da partícula após o trabalho ter sido realizado. De acordo com a Eq. 7-10, temos:

$$K_f = K_i + W. \tag{7-11}$$

Trabalho Realizado pela Força Gravitacional O trabalho W_g realizado pela força gravitacional $\vec{F}_g$ sobre um objeto (semelhante a uma partícula) de massa m durante um deslocamento $\vec{d}$ é dado por

$$W_g = mgd\cos\phi, \tag{7-12}$$

onde ϕ é o ângulo entre $\vec{F}_g$ e $\vec{d}$.

Trabalho Realizado para Levantar e Baixar um Objeto O trabalho W_a realizado por uma força aplicada quando um objeto que se comporta como uma partícula é levantado ou baixado está relacionado ao trabalho W_g realizado pela força gravitacional e à variação ΔK da energia cinética do objeto através da equação

$$\Delta K = K_f - K_i = W_a + W_g. \tag{7-15}$$

Se $K_f = K_i$, a Eq. 7-15 se reduz a

$$W_a = -W_g, \tag{7-16}$$

que nos diz que a energia cedida ao objeto pela força aplicada é igual à energia extraída do objeto pela força gravitacional.

Força Elástica A força $\vec{F}_s$ de uma mola é

$$\vec{F}_s = -k\vec{d} \quad \text{(lei de Hooke)}, \tag{7-20}$$

onde $\vec{d}$ é o deslocamento da extremidade livre da mola da sua posição quando a mola está no **estado relaxado** (nem comprimida nem alongada), e k é a **constante elástica** (uma medida da rigidez da mola). Se um eixo x é traçado ao longo do comprimento da mola, com a origem na posição da extremidade livre da mola quando ela está no estado relaxado, a Eq. 7-20 pode ser escrita na forma

$$F_x = -kx \quad \text{(lei de Hooke)}. \tag{7-21}$$

A força elástica é, portanto, uma força variável: ela varia com o deslocamento da extremidade livre da mola.

Trabalho Realizado por uma Força Elástica Se um objeto está preso à extremidade livre da mola, o trabalho W_s realizado sobre o objeto pela força elástica quando o objeto é deslocado de uma posição inicial x_i para uma posição final x_f é dado por

$$W_s = \frac{1}{2}kx_i^2 - \frac{1}{2}kx_f^2. \tag{7-25}$$

Se $x_i = 0$ e $x_f = x$, a Eq. 7-25 se torna

$$W_s = -\frac{1}{2}kx^2. \tag{7-26}$$

Trabalho Realizado por uma Força Variável Quando a força $\vec{F}$ aplicada a um objeto que se comporta como uma partícula depende da posição do objeto, o trabalho realizado por $\vec{F}$ sobre o objeto enquanto o objeto se move de uma posição inicial r_i de coordenadas (x_i, y_i, z_i) para uma posição final r_f de coordenadas (x_f, y_f, z_f) pode ser calculado integrando a força. Supondo que a componente F_x pode depender de x mas não de y ou z, que a componente F_y pode depender de y mas não de x ou z e que a componente F_z pode depender de z mas não de x ou y, o trabalho é dado por

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F_x\,dx + \int_{y_i}^{y_f} F_y\,dy + \int_{z_i}^{z_f} F_z\,dz. \tag{7-36}$$

Se $\vec{F}$ possui apenas a componente x, a Eq. 7-36 se reduz a

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x)\,dx. \tag{7-32}$$

Potência A **potência** desenvolvida por uma força é a taxa com a qual a força realiza trabalho sobre um objeto. Se a força realiza um trabalho W em um intervalo de tempo Δt, a *potência média* desenvolvida pela força neste intervalo de tempo é dada por

$$P_{méd} = \frac{W}{\Delta t}. \tag{7-42}$$

Potência instantânea é a taxa instantânea com a qual o trabalho está sendo realizado:

$$P = \frac{dW}{dt}. \tag{7-43}$$

No caso de uma força $\vec{F}$ que faz um ângulo ϕ com a velocidade instantânea $\vec{v}$ de um objeto, a potência instantânea é

$$P = Fv\cos\phi = \vec{F}\cdot\vec{v}. \tag{7-47, 7-48}$$

PERGUNTAS

1 O trabalho realizado por uma força constante $\vec{F}$ sobre uma partícula durante um deslocamento retilíneo $\vec{d}$ é positivo ou negativo se (a) o ângulo entre $\vec{F}$ e $\vec{d}$ é 30°; (b) o ângulo é 100°; (c) $\vec{F} = 2\hat{i} - 3\hat{j}$ e $\vec{d} = -4\hat{i}$?

2 Em três situações, uma força horizontal aplicada brevemente muda a velocidade de um disco de metal que desliza sobre uma superfície de gelo de atrito desprezível. As vistas superiores da Fig. 7-17 mostram, para cada situação, a velocidade inicial v_i do disco, a velocidade final v_f e as orientações dos vetores velocidade correspondentes. Ordene as situações de acordo com o trabalho realizado sobre o disco pela força aplicada, do mais positivo para o mais negativo.

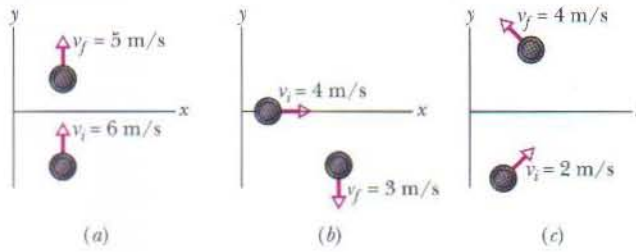


FIG. 7-17 Pergunta 2.

3 Ordene as seguintes velocidades de acordo com a energia cinética que uma partícula teria com cada velocidade, da maior para a menor: (a) $\vec{v} = 4\hat{i} + 3\hat{j}$, (b) $\vec{v} = -4\hat{i} + 3\hat{j}$, (c) $\vec{v} = -3\hat{i} + 4\hat{j}$, (d) $\vec{v} = 3\hat{i} - 4\hat{j}$, (e) $\vec{v} = 5\hat{i}$ e (f) $v = 5$ m/s a 30° com a horizontal.

4 A Fig. 7-18*a* mostra duas forças horizontais que agem sobre um bloco que está deslizando para a direita sobre um piso sem atrito. A Fig. 7-18*b* mostra três gráficos da energia cinética K do bloco em função do tempo t. Qual dos gráficos corresponde melhor às três seguintes situações: (a) $F_1 = F_2$, (b) $F_1 > F_2$, (c) $F_1 < F_2$?

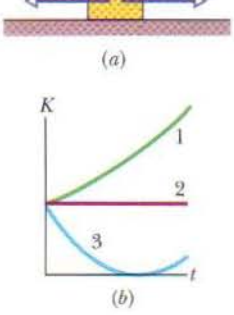


FIG. 7-18 Pergunta 4.

5 Na Fig. 7-19, um porco ensebado pode escolher entre três escorregas para descer. Ordene os escorregas de acordo com o trabalho que a força gravitacional realiza sobre o porco durante cada descida, do maior para o menor.

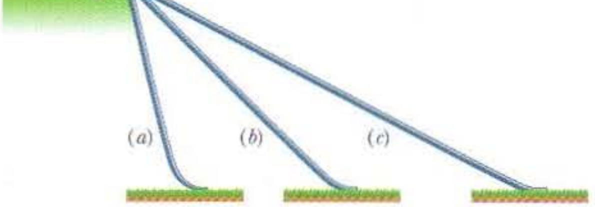


FIG. 7-19 Pergunta 5.

6 A Fig. 7-20*a* mostra quatro situações nas quais uma força horizontal age sobre um mesmo bloco, que está inicialmente em repouso. Os módulos das forças são $F_2 = F_4 = 2F_1 = 2F_3$. A componente horizontal v_x da velocidade do bloco aparece na Fig. 7-20*b* para as quatro situações. (a) Que gráfico da Fig. 7-20*b* melhor corresponde a que força da Fig. 7-20*a*? (b) Que gráfico da Fig. 7-20*c* (da energia cinética K em função do tempo t) melhor corresponde a que gráfico na Fig. 7-20*b*?

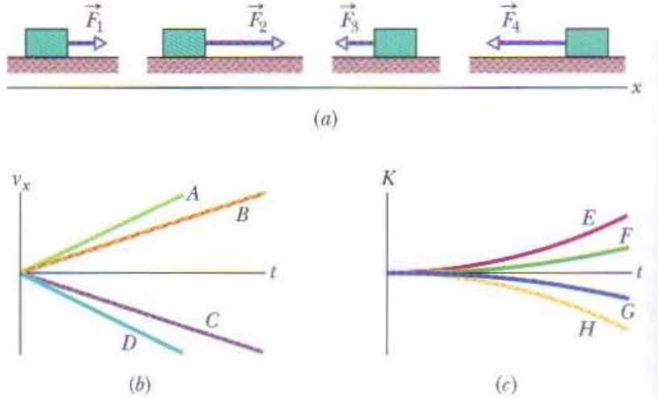


FIG. 7-20 Pergunta 6.

7 A Fig. 7-21 mostra quatro gráficos (traçados na mesma escala) da componente F_x de uma força variável (dirigida ao longo de um eixo x) em função da posição x de uma partícula sobre a qual a força atua. Ordene os gráficos de acordo com o trabalho realizado pela força sobre a partícula de $x = 0$ a $x = x_1$, do mais positivo para o mais negativo.

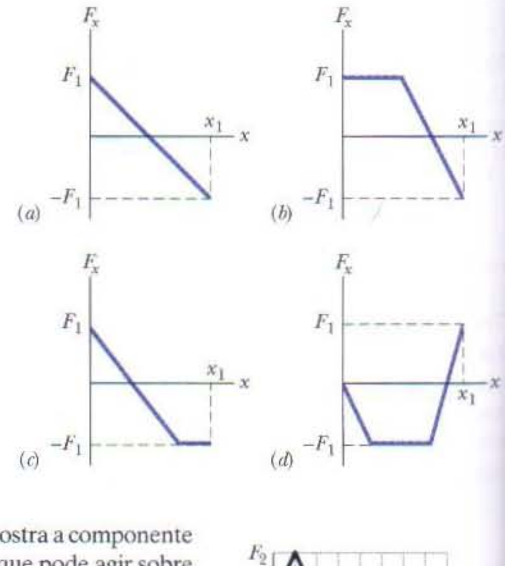


FIG. 7-21 Pergunta 7.

8 A Fig. 7-22 mostra a componente F_x de uma força que pode agir sobre uma partícula. Se a partícula parte do repouso em $x = 0$, qual é sua coordenada quando (a) sua energia cinética é máxima, (b) sua velocidade é máxima e (c) sua velocidade é nula? (d) Qual é o sentido da velocidade da partícula quando ela passa pelo ponto $x = 6$ m?

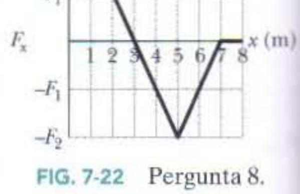


FIG. 7-22 Pergunta 8.

9 Uma mola A é mais rígida que uma mola B ($k_A > k_B$). A força elástica de que mola realiza mais trabalho se as molas são comprimidas (a) de uma mesma distância e (b) por uma mesma força?

10 Uma gota de um líquido viscoso é arremessada ou deixada cair a partir do repouso da borda de um precipício. Qual dos gráficos na Fig. 7-23 poderia mostrar como a energia cinética da gota varia durante a queda?

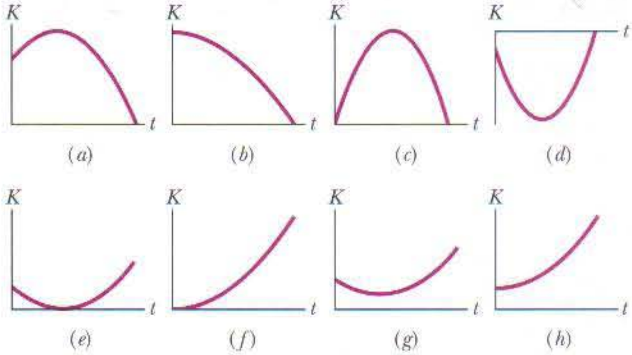


FIG. 7-23 Pergunta 10.

PROBLEMAS

• - ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 7-3 Energia Cinética

•1 Em 10 de agosto de 1972 um grande meteorito atravessou a atmosfera sobre o oeste dos Estados Unidos e do Canadá como uma pedra que ricocheteia na água. A bola de fogo resultante foi tão forte que pôde ser vista à luz do dia, e era mais intensa que o rastro deixado por um meteorito comum. A massa do meteorito era aproximadamente de 4×10^6 kg; sua velocidade, cerca de 15 km/s. Se tivesse entrado verticalmente na atmosfera terrestre ele teria atingido a superfície da Terra com aproximadamente a mesma velocidade. (a) Calcule a perda de energia cinética do meteorito (em joules) que estaria associada ao impacto vertical. (b) Expresse a energia como um múltiplo da energia explosiva de 1 megaton de TNT, que é $4{,}2 \times 10^{15}$ J. (c) A energia associada à explosão da bomba atômica de Hiroshima foi equivalente a 13 quilotons de TNT. A quantas bombas de Hiroshima o impacto do meteorito seria equivalente?

•2 Se um foguete Saturno V e uma espaçonave Apollo acoplada a ele tinham uma massa total de $2{,}9 \times 10^5$ kg, qual era a energia cinética quando atingiram uma velocidade de 11,2 km/s?

•3 Um próton (massa $m = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg) está sendo acelerado em linha reta a $3{,}6 \times 10^{15}$ m/s^2 em um acelerador de partículas. Se o próton tem uma velocidade inicial de $2{,}4 \times 10^7$ m/s e se desloca 3,5 cm, determine (a) sua velocidade e (b) o aumento em sua energia cinética.

•4 Uma força $\vec{F}_a$ é aplicada a uma conta quando esta se move em linha reta, sofrendo um deslocamento de 5,0 cm. O módulo de $\vec{F}_a$ é mantido constante, mas o ângulo ϕ entre $\vec{F}_a$ e o deslocamento da conta pode ser escolhido. A Fig. 7-24 mostra o trabalho W realizado por $\vec{F}_a$ sobre a conta para valores de ϕ dentro de um certo intervalo; $W_0 = 25$ J. Qual é o trabalho realizado por $\vec{F}_a$ se ϕ é igual a (a) 64° e (b) 147°?

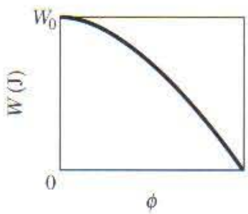


FIG. 7-24 Problema 4.

••5 Em uma corrida, um pai tem metade da energia cinética do filho, que tem metade da massa do pai. Aumentando sua velocidade em 1,0 m/s, o pai passa a ter a mesma energia cinética do filho. Quais são as velocidades escalares iniciais (a) do pai e (b) do filho?

••6 Uma conta com uma massa de $1{,}8 \times 10^{-2}$ kg está se movendo no sentido positivo do eixo x. A partir do instante $t = 0$, em que a conta está passando pela posição $x = 0$ com uma velocidade de 12 m/s, uma força constante passa a agir sobre a conta. A Fig. 7-25 indica a posição da conta nos instantes $t_0 = 0$, $t_1 = 1{,}0$, $t_2 = 2{,}0$ e $t_3 = 3{,}0$ s. A conta pára momentaneamente em $t = 3{,}0$ s. Qual é a energia cinética da conta em $t = 10$ s?

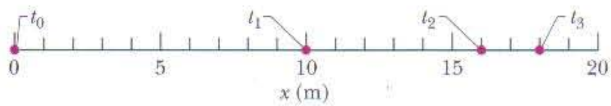


FIG. 7-25 Problema 6.

seção 7-5 Trabalho e Energia Cinética

•7 A única força que age sobre uma lata de 2,0 kg que está se movendo em um plano xy tem um módulo de 5,0 N. Inicialmente, a lata tem uma velocidade de 4,0 m/s no sentido positivo do eixo x; em um instante posterior, a velocidade passa a ser 6,0 m/s no sentido positivo do eixo y. Qual é o trabalho realizado sobre a lata pela força de 5,0 N nesse intervalo de tempo?

•8 Uma moeda desliza sobre um plano sem atrito em um sistema de coordenadas xy, da origem até o ponto de coordenadas (3,0 m; 4,0 m), sob o efeito de uma força constante. A força tem um módulo de 2,0 N e faz um ângulo de 100° no sentido anti-horário com o semi-eixo x positivo. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a moeda durante esse deslocamento?

•9 Um corpo de 3,0 kg está em repouso sobre um colchão de ar horizontal de atrito desprezível quando uma força horizontal $\vec{F}$ no sentido positivo de um eixo x ao longo do colchão é aplicada ao corpo. A Fig. 7-26 mostra um gráfico estroboscópico da posição do corpo quando ele se move para a direita. A força $\vec{F}$ é aplicada ao corpo em $t = 0$, e o gráfico mostra a posição da partícula a intervalos de 0,50 s. Qual é o trabalho realizado sobre o corpo pela força $\vec{F}$ no intervalo de $t = 0$ a $t = 2{,}0$ s?

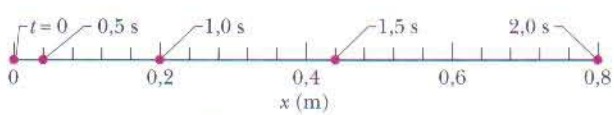


FIG. 7-26 Problema 9.

•10 Um bloco de gelo flutuante é colhido por uma correnteza que aplica ao bloco uma força $\vec{F} = (210\text{ m})\hat{\mathrm{i}} - (150\text{ m})\hat{\mathrm{j}}$, fazendo com que ele sofra um deslocamento $\vec{d} = (15\text{ m})\hat{\mathrm{i}} - (12\text{ m})\hat{\mathrm{j}}$. Qual é o trabalho realizado pela força sobre o bloco durante esse deslocamento?

••11 Um trenó e seu ocupante, com uma massa total de 85 kg, descem uma encosta e atingem um trecho horizontal retilíneo com uma velocidade inicial de 37 m/s. Se uma força desacelera o trenó até o repouso a uma taxa constante de 2,0 m/s², (a) qual é o módulo F da força, (b) que distância d o trenó percorre até parar e (c) que trabalho W é realizado pela força sobre o trenó? Quais são os valores de (d) F, (e) d e (f) W se a taxa de desaceleração é de 4,0 m/s²?

••12 Um objeto de 8,0 kg está se movendo no sentido positivo de um eixo x. Quando passa por $x = 0$, uma força constante dirigida ao longo do eixo passa a atuar sobre ele. A Fig. 7-27 mostra a energia cinética K em função da posição x quando o objeto se desloca de $x = 0$ a $x = 5{,}0$ m; $K_0 = 30{,}0$ J. A força continua a agir. Qual é a velocidade do objeto quando ele passa de volta por $x = -3{,}0$ m?

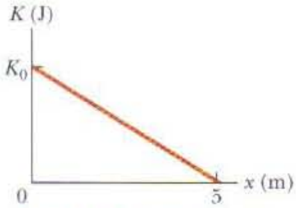


FIG. 7-27 Problema 12.

••13 A Fig. 7-28 mostra três forças aplicadas a um baú que se desloca 3,00 m para a esquerda sobre um piso sem atrito. Os módulos das forças são $F_1 = 5{,}00$ N, $F_2 = 9{,}00$ N, e $F_3 = 3{,}00$ N; o ângulo indicado é $\theta = 60°$. Nesse deslocamento, (a) qual é o trabalho total realizado sobre o baú pelas três forças e (b) a energia cinética do baú aumenta ou diminui?

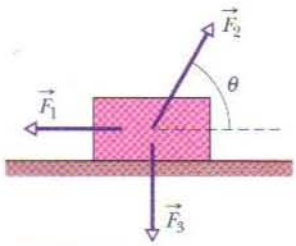


FIG. 7-28 Problema 13.

••14 Uma lata de parafusos e porcas é empurrada por 2,00 m ao longo de um eixo x por uma vassoura ao longo de um piso sujo de óleo (sem atrito) de uma oficina de automóveis. A Fig. 7-29 mostra o trabalho W realizado sobre a lata pela força horizontal constante da vassoura em função da posição x da lata. A escala vertical do gráfico é definida por $W_s = 6{,}0$ J. (a) Qual é o módulo da força? (b) Se a lata tivesse uma energia cinética inicial de 3,00 J, movendo-se no sentido positivo do eixo x, qual seria a energia cinética ao final do deslocamento de 2,00 m?

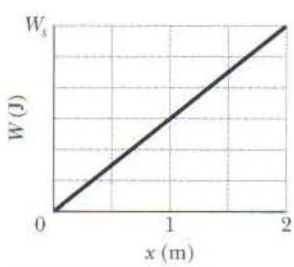


FIG. 7-29 Problema 14.

••15 Uma força de 12,0 N e orientação fixa realiza trabalho sobre uma partícula que sofre um deslocamento $\vec{d} = (2{,}00\hat{\mathrm{i}} - 4{,}00\hat{\mathrm{j}} + 3{,}00\hat{\mathrm{k}})$ m. Qual é o ângulo entre a força e o deslocamento se a variação da energia cinética da partícula é (a) +30,0 J e (b) −30,0 J?

••16 A Fig. 7-30 mostra uma vista superior de três forças horizontais atuando sobre uma caixa que estava inicialmente em repouso e passou a se mover sobre um piso sem atrito. Os módulos das forças são $F_1 = 3{,}00$ N, $F_2 = 4{,}00$ N e $F_3 = 10{,}0$ N, e os ângulos indicados são $\theta_2 = 50{,}0°$ e $\theta_3 = 35{,}0°$. Qual é o trabalho total realizado sobre a caixa pelas três forças nos primeiros 4,00 m de deslocamento?

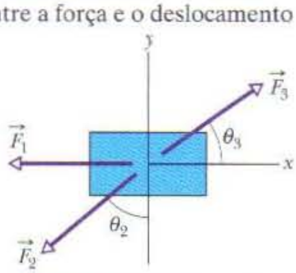


FIG. 7-30 Problema 16.

seção 7-6 Trabalho Realizado pela Força Gravitacional

•17 Um helicóptero levanta verticalmente uma astronauta de 72 kg 15 m acima da superfície do oceano, por meio de um cabo. A aceleração da astronauta é $g/10$. Qual é o trabalho realizado sobre a astronauta (a) pela força do helicóptero e (b) pela força gravitacional? Imediatamente antes de a astronauta chegar ao helicóptero, quais são (c) sua energia cinética e (d) sua velocidade?

•18 (a) Em 1975, o teto do velódromo de Montreal, com um peso de 360 kN, foi levantado 10 cm para que pudesse ser centralizado. Que trabalho foi realizado sobre o teto pelas forças que o ergueram? (b) Em 1960, uma mulher de Tampa, na Flórida, levantou uma das extremidades de um carro que havia caído sobre seu filho quando um macaco quebrou. Se a aflição a levou a levantar 4000 N (cerca de 1/4 do peso do carro) por uma distância de 5,0 cm, que trabalho sua força realizou sobre o carro?

••19 Uma corda é usada para baixar verticalmente um bloco de massa M, inicialmente em repouso, com uma aceleração constante para baixo de $g/4$. Após o bloco descer uma distância d, determine (a) o trabalho realizado pela força da corda sobre o bloco, (b) o trabalho realizado pela força gravitacional sobre o bloco, (c) a energia cinética do bloco, (d) a velocidade do bloco.

••20 Na Fig. 7-31, uma força horizontal $\vec{F}_a$ de módulo 20,0 N é aplicada a um livro de psicologia de 3,00 kg enquanto o livro escorrega por uma distância $d = 0{,}500$ m ao longo de uma rampa de inclinação $\theta = 30{,}0°$, subindo sem atrito. (a) Nesse deslocamento, qual é o trabalho total realizado sobre o livro por $\vec{F}_a$, pela força gravitacional e pela força normal? (b) Se o livro tem energia cinética nula no início do deslocamento, qual é sua energia cinética no final?

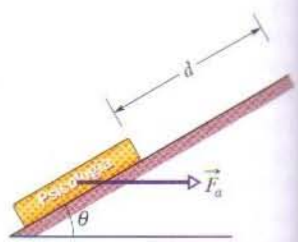


FIG. 7-31 Problema 20.

••21 Na Fig. 7-32, uma força constante $\vec{F}_a$ de módulo 82,0 N é aplicada a uma caixa de sapatos de 3,00 kg a um ângulo $\phi = 53{,}0°$, fazendo com que a caixa se mova para cima ao longo de uma rampa sem atrito com velocidade constante. Qual é o trabalho realizado sobre a caixa por $\vec{F}_a$ após ela ter subido uma distância vertical $h = 0{,}150$ m?

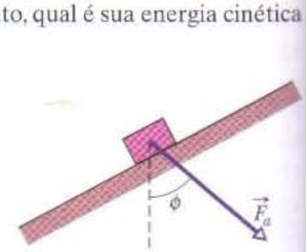


FIG. 7-32 Problema 21.

••22 Um bloco é lançado para cima em uma rampa sem atrito, ao longo de um eixo x que aponta para cima. A Fig. 7-33 mostra a energia cinética do bloco em função da posição x; a escala vertical do gráfico é definida por $K_s = 40{,}0$ J. Se a velocidade inicial do bloco é de 4,00 m/s, qual é a força normal que age sobre o bloco?

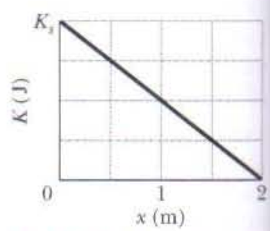


FIG. 7-33 Problema 22.

••23 Na Fig. 7-34 um bloco de gelo escorrega para baixo em uma rampa sem atrito com $\theta = 50°$ enquanto um operário puxa o bloco (através de uma corda) com uma força $\vec{F}_r$ que tem um módulo de 50 N e aponta para cima ao longo da rampa. Quando o bloco desliza uma distância $d = 0{,}50$ m ao longo da rampa, sua energia cinética aumenta 80 J. Quão maior seria a energia cinética se o bloco não estivesse sendo puxado por uma corda?

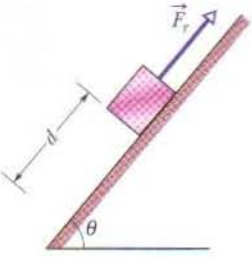


FIG. 7-34 Problema 23.

••24 Uma equipe especializada em resgate em cavernas levanta um espeleólogo ferido com o auxílio de um cabo ligado a um motor. O levantamento é realizado em três estágios, cada um requerendo uma distância vertical de 10,0 m: (a) o espeleólogo está inicialmente em repouso e é acelerado até uma velocidade de 5,00 m/s; (b) ele é levantado com velocidade constante de 5,00 m/s; (c) finalmente, é desacelerado até o repouso. Qual é o trabalho realizado sobre o espeleólogo de 80,0 kg pela força que o levanta em cada estágio?

•••25 Na Fig. 7-35, um bloco de queijo de 0,250 kg está sobre o piso de um elevador de 900 kg que está sendo puxado para cima por um cabo, primeiro por uma distância $d_1 = 2{,}40$ m e depois por uma distância $d_2 = 10{,}5$ m. (a) No deslocamento d_1, se a força normal exercida sobre o bloco pelo piso do elevador tem um módulo constante $F_N = 3{,}00$ N, qual é o trabalho realizado pela força do cabo sobre o elevador? (b) No deslocamento d_2, se o trabalho realizado sobre o elevador pela força (constante) do cabo é 92,61 kJ, qual é o módulo de $\vec{F}_N$?


FIG. 7-35 Problema 25.

seção 7-7 Trabalho Realizado por uma Força Elástica

•26 Durante o semestre de primavera do MIT, os estudantes de dois dormitórios vizinhos travam batalhas com grandes catapultas feitas com meias elásticas montadas nas molduras das janelas. Uma bola de aniversário cheia de corante é colocada em uma bolsa presa na meia, que é esticada até a extremidade do quarto. Suponha que a meia esticada obedeça à lei de Hooke com uma constante elástica de 100 N/m. Se a meia é esticada 5,00 m e liberada, que trabalho a força elástica da meia realiza sobre a bola quando a meia volta ao comprimento normal?

•27 Uma mola e um bloco são montados como na Fig. 7-11. Quando o bloco é puxado para o ponto $x = +4{,}0$ cm devemos aplicar uma força de 360 N para mantê-lo nessa posição. Puxamos o bloco para o ponto $x = 11$ cm e o liberamos. Qual é o trabalho realizado pela mola sobre o bloco quando este se desloca de $x_i = +5{,}0$ cm para (a) $x = +3{,}0$ cm, (b) $x = -3{,}0$ cm, (c) $x = -5{,}0$ cm e (d) $x = -9{,}0$ cm?

•28 Na Fig. 7-11 devemos aplicar uma força de módulo 80 N para manter o bloco em repouso em $x = -2{,}0$ cm. A partir dessa posição, deslocamos o bloco lentamente de tal modo que nossa força realiza um trabalho de $+4{,}0$ J sobre o sistema massa-mola; a partir daí, o bloco permanece em repouso. Qual é a posição do bloco? (*Sugestão:* Existem duas respostas possíveis.)

••29 A única força que age sobre um corpo de 2,0 kg enquanto ele se move no semi-eixo positivo de um eixo x tem uma componente $F_x = -6x$ N, com x em metros. A velocidade do corpo em $x = 3{,}0$ m é 8,0 m/s. (a) Qual é a velocidade do corpo em $x = 4{,}0$ m? (b) Para que valor positivo de x o corpo tem uma velocidade de 5,0 m/s?

••30 A Fig. 7-36 mostra a força elástica F_x em função da posição x para o sistema massa-mola da Fig. 7-11. A escala vertical do gráfico é definida por $F_s = 160{,}0$ N. Puxamos o bloco até $x = 12$ cm e o liberamos. Qual é o trabalho realizado pela mola sobre o bloco enquanto se desloca de $x_i = +8{,}0$ cm para (a) $x = +5{,}0$ cm, (b) $x = -5{,}0$ cm, (c) $x = -8{,}0$ cm e (d) $x = -10{,}0$ cm?

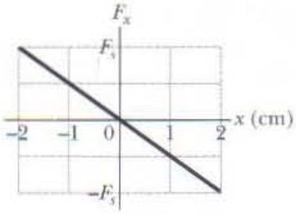


FIG. 7-36 Problema 30.

••31 No arranjo da Fig. 7-11, puxamos gradualmente o bloco de $x = 0$ até $x = +3{,}0$ cm, onde fica em repouso. A Fig. 7-37 mostra o trabalho que nossa força realiza sobre o bloco. A escala vertical do gráfico é definida por $W_s = 1{,}0$ J. Em seguida, puxamos o bloco até $x = +5{,}0$ cm e o liberamos a partir do repouso. Qual é o trabalho realizado pela mola sobre o bloco quando este se desloca de $x_i = +5{,}0$ cm até (a) $x = +4{,}0$ cm, (b) $x = -2{,}0$ cm e (c) $x = -5{,}0$ cm?

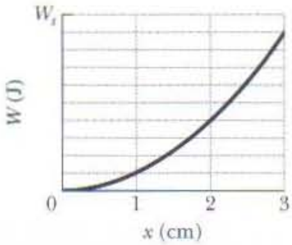


FIG. 7-37 Problema 31.

••32 Na Fig. 7-11a, um bloco de massa m repousa em uma superfície horizontal sem atrito e está preso a uma mola horizontal (de constante elástica k) cuja outra extremidade é mantida fixa. O bloco está em repouso na posição onde a mola está relaxada ($x = 0$) quando uma força $\vec{F}$ no sentido positivo do eixo x é aplicada. A Fig. 7-38 mostra o gráfico da energia cinética do bloco em função da posição x após a aplicação da força. A escala vertical do gráfico é definida por $K_s = 4{,}0$ J. (a) Qual é o módulo de $\vec{F}$? (b) Qual é o valor de k?

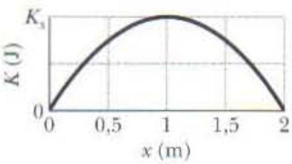


FIG. 7-38 Problema 32.

•••33 O bloco na Fig. 7-11a está sobre uma superfície horizontal sem atrito, e a constante elástica é 50 N/m. Inicialmente a mola está relaxada e o bloco está parado no ponto $x = 0$. Uma força com módulo constante de 3,0 N é aplicada ao bloco, puxando-o no sentido positivo do eixo x e alongando a mola até o bloco parar. Quando este ponto é atingido, quais são (a) a posição do bloco, (b) o trabalho realizado sobre o bloco pela força aplicada e (c) o trabalho realizado sobre o bloco pela força elástica? Durante o deslocamento do bloco, quais são (d) a posição do bloco na qual a energia cinética é máxima e (e) o valor desta energia cinética máxima?

seção 7-8 Trabalho Realizado por uma Força Variável Genérica

•34 Um bloco de 5,0 kg se move em uma linha reta sobre uma superfície horizontal sem atrito sob a influência de uma força que varia com a posição, como mostra a Fig. 7-39. A escala vertical do gráfico é definida por $F_s = 10{,}0$ J. Qual é o trabalho realizado pela força enquanto o bloco se desloca da origem até $x = 8{,}0$ cm?

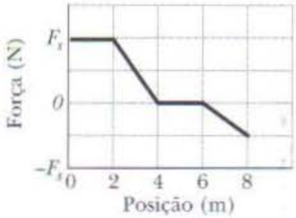


FIG. 7-39 Problema 34.

•35 A força a que uma partícula está submetida aponta ao longo de um eixo x e é dada por $F = F_0(x/x_0 - 1)$. Determine o trabalho realizado pela força ao mover a partícula de $x = 0$ a $x = 2x_0$ (a) a partir do gráfico de $F(x)$ e (b) integrando $F(x)$.

•36 Um tijolo de 10 kg se move ao longo de um eixo x. A Fig. 7-37 mostra a aceleração do bloco em função da posição. A escala vertical do gráfico é definida por $a_s = 20{,}0$ m/s^2. Qual é o trabalho total realizado sobre o tijolo pela força responsável pela aceleração quando o bloco se desloca de $x = 0$ a $x = 8{,}0$ m?

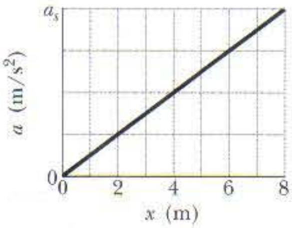


FIG. 7-40 Problema 36.

••37 Uma única força atua sobre um objeto de 3,0 kg que se comporta como uma partícula, de tal forma que a posição do objeto em função do tempo é dada por $x = 3{,}0t - 4{,}0t^2 + 1{,}0t^3$, com x em metros e t em segundos. Determine o trabalho realizado pela força sobre o objeto de $t = 0$ a $t = 4{,}0$ s.

••38 Uma lata de sardinha é deslocada ao longo de um eixo x, de $x = 0{,}25$ m até $x = 1{,}25$ m, por uma força cujo módulo é dado por $F = e^{-4x^2}$, com x em metros e F em newtons. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a lata?

••39 A Fig. 7-41 mostra a aceleração de uma partícula de 2,00 kg sob a ação de uma força $\vec{F}_a$ que desloca a partícula ao longo de um eixo x, a partir do repouso, de $x = 0$ a $x = 9{,}0$ m. A escala vertical do gráfico é definida por $a_s = 6{,}0$ m/s^2. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a partícula até a partícula atingir o ponto (a) $x = 4{,}0$ m, (b) $x = 7{,}0$ m e (c) $x = 9{,}0$ m? Quais são o módulo e o sentido da velocidade da partícula quando ela atinge o ponto (d) $x = 4{,}0$ m, (b) $x = 7{,}0$ m e (c) $x = 9{,}0$ m?

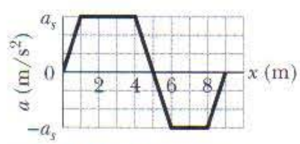


FIG. 7-41 Problema 39.

••40 Um bloco de 1,5 kg está em repouso sobre uma superfície horizontal sem atrito quando uma força ao longo de um eixo x é aplicada ao bloco. A força é dada por $\vec{F}(x) = (2{,}5 - x^2)\hat{\mathrm{i}}$ N, onde x está em metros e a posição inicial do bloco é $x = 0$. (a) Qual é a energia cinética do bloco ao passar pelo ponto $x = 2{,}0$ m? (b) Qual é a energia cinética máxima do bloco entre $x = 0$ e $x = 2{,}0$ m?

••41 Uma força $\vec{F} = (cx - 3{,}00x^2)\hat{\mathrm{i}}$ age sobre uma partícula enquanto a partícula se desloca ao longo de um eixo x, com $\vec{F}$ em newtons, x em metros e c uma constante. Em $x = 0$, a energia cinética da partícula é 20,0 J; em $x = 3{,}00$ m, é 11,0 J. Determine o valor de c.

•••42 A Fig. 7-42 mostra uma corda presa a um carrinho que pode deslizar sobre um trilho horizontal sem atrito ao longo de um eixo x. A extremidade esquerda da corda é puxada através de uma polia de massa e atrito desprezíveis a uma altura $h = 1{,}20$ m em relação ao ponto onde está presa no carrinho, fazendo o carrinho deslizar de $x_1 = 3{,}00$ m até $x_2 = 1{,}00$ m. Durante o deslocamento, a tensão da corda se mantém constante e igual a 25,0 N. Qual é a variação da energia cinética do carrinho durante o deslocamento?

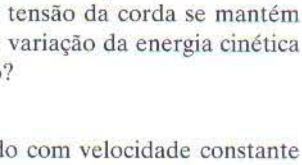


FIG. 7-42 Problema 42.

seção 7-9 Potência

•43 Um bloco de 100 kg é puxado com velocidade constante de 5,0 m/s através de um piso horizontal por uma força de 122 N que faz um ângulo de 37° acima da horizontal. Qual é a taxa com a qual a força realiza trabalho sobre o bloco?

•44 Um elevador carregado tem uma massa de $3{,}0 \times 10^3$ kg e sobe 210 m em 23 s, com velocidade constante. Qual é a taxa média com a qual a força do cabo do elevador realiza trabalho sobre o elevador?

•45 Uma força de 5,0 N age sobre um corpo de 15 kg inicialmente em repouso. Calcule o trabalho realizado pela força (a) no primeiro, (b) no segundo e (c) no terceiro segundo, assim como (d) a potência instantânea da força no fim do terceiro segundo.

•46 Um esquiador é puxado por uma corda para o alto de uma encosta que faz um ângulo de 12° com a horizontal. A corda se move paralelamente à encosta com uma velocidade constante de 1,0 m/s. A força da corda realiza 900 J de trabalho sobre o esquiador quando este percorre uma distância de 8,0 m encosta acima. (a) Se a velocidade constante da corda tivesse sido 2,0 m/s, que trabalho a força da corda teria realizado sobre o esquiador para o mesmo deslocamento? A que taxa a força da corda realiza trabalho sobre o esquiador quando a corda se desloca com uma velocidade de (b) 1,0 m/s e (c) 2,0 m/s?

••47 Um elevador de carga totalmente carregado tem uma massa total de 1200 kg, que deve içar 54 m em 3,0 min, iniciando e terminando a subida em repouso. O contrapeso do elevador tem uma massa de apenas 950 kg e, portanto, o motor do elevador deve ajudar. Que potência média é exigida da força que o motor exerce sobre o elevador através do cabo?

••48 (a) Em um certo instante, um objeto que se comporta como uma partícula sofre a ação de uma força $\vec{F} = (4{,}0\text{ N})\hat{\mathrm{i}} - (2{,}0\text{ N})\hat{\mathrm{j}} + (9{,}0\text{ N})\hat{\mathrm{k}}$ quando sua velocidade é $\vec{v} = -(2{,}0\text{ m/s})\hat{\mathrm{i}} + (4{,}0\text{ m/s})\hat{\mathrm{k}}$. Qual é a taxa instantânea com a qual a força realiza trabalho sobre o objeto? (b) Em outro instante, a velocidade tem apenas a componente y. Se a força não muda e a potência instantânea é -12 W, qual é a velocidade do objeto nesse instante?

••49 Uma máquina transporta um pacote de 4,0 kg de uma posição inicial $\vec{d}_i = (0{,}50\text{ m})\hat{\mathrm{i}} + (0{,}75\text{ m})\hat{\mathrm{j}} + (0{,}20\text{ m})\hat{\mathrm{k}}$ em $t = 0$ até uma posição final $\vec{d}_f = (7{,}50\text{ m})\hat{\mathrm{i}} + (12{,}0\text{ m})\hat{\mathrm{j}} + (7{,}20\text{ m})\hat{\mathrm{k}}$ em $t = 12$ s. A força constante aplicada pela máquina ao pacote é $\vec{F} = (2{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{i}} + (4{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{j}} + (6{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{k}}$. Para esse deslocamento, determine (a) o trabalho realizado pela força da máquina sobre o pacote e (b) a potência média dessa força.

••50 Uma concha de 0,30 kg escorrega sobre uma superfície horizontal sem atrito presa a uma das extremidades de uma mola horizontal ($k = 500$ N/m) cuja outra extremidade é mantida fixa. A concha possui uma energia cinética de 10 J ao passar pela posição de equilíbrio (o ponto em que a força elástica da mola é zero). (a) Com que taxa a mola está realizando trabalho sobre a concha quando esta passa pela posição de equilíbrio? (b) Com que taxa a mola está realizando trabalho sobre a concha quando a mola está comprimida de 0,10 m e a concha está se afastando da posição de equilíbrio?

••51 Uma força $\vec{F} = (3{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{i}} + (7{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{j}} + (7{,}00\text{ N})\hat{\mathrm{k}}$ age sobre um objeto de 2,00 kg que se move de uma posição inicial $\vec{d}_i = (3{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{i}} - (2{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{j}} + (5{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{k}}$ para uma posição final $\vec{d}_f = -(5{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{i}} + (4{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{j}} + (7{,}00\text{ m})\hat{\mathrm{k}}$ em 4,00 s. Determine (a) o trabalho realizado pela força sobre o objeto no intervalo de 4,00 s, (b) a potência média desenvolvida pela força nesse intervalo e (c) o ângulo entre os vetores $\vec{d}_i$ e $\vec{d}_f$.

•••52 Um *funny car* acelera a partir do repouso, percorrendo uma certa distância no tempo T, com o motor funcionando com potência constante P. Se os mecânicos conseguem aumentar a potência do motor de um pequeno valor dP, qual é a variação do tempo necessário para percorrer a mesma distância?

Problemas Adicionais

53 Uma explosão no nível do solo produz uma cratera com um diâmetro proporcional à raiz cúbica da energia da explosão; uma explosão de 1 megaton de TNT deixa uma cratera de 1 km de diâmetro. Sob o lago Huron, em Michigan, existe uma cratera com 50 km de diâmetro, atribuída ao impacto de um asteróide no passado remoto. Qual é a energia cinética associada a esse impacto, em unidades (a) de megatons de TNT (1 megaton equivale a $4{,}2 \times 10^{15}$ J) e (b) bombas de Hiroshima (uma bomba de Hiroshima equivale a 13 quilotons de TNT)? (Impactos de meteoritos e cometas podem ter alterado significativamente o clima da Terra no passado e contribuído para a extinção de dinossauros e de outras formas de vida.)

54 Um bloco de 250 g é deixado cair em uma mola vertical, inicialmente relaxada, com uma constante elástica k = 2,5 N/cm (Fig. 7-43). O bloco fica acoplado à mola, comprimindo-a em 12 cm até parar momentaneamente. Nesta compressão, que trabalho é realizado sobre o bloco (a) pela força gravitacional e (b) pela força elástica? (c) Qual é a velocidade do bloco imediatamente antes de se chocar com a mola? (d) Se a velocidade no momento do impacto é duplicada, qual é a compressão máxima da mola?

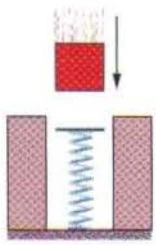


FIG. 7-43 Problema 54.

55 Qual é o trabalho realizado por uma força $\vec{F} = (2x\text{ N})\hat{\text{i}} + (3\text{ N})\hat{\text{j}}$, com x em metros, ao deslocar uma partícula de uma posição $\vec{r}_i = (2\text{ m})\hat{\text{i}} + (3\text{ m})\hat{\text{j}}$ para uma posição $\vec{r}_f = -(4\text{ m})\hat{\text{i}} - (3\text{ m})\hat{\text{j}}$?

56 Para puxar um engradado de 50 kg sobre um piso horizontal sem atrito, um operário aplica uma força de 210 N fazendo um ângulo 20° para cima com a horizontal. Em um deslocamento de 3,0 m, qual é o trabalho realizado sobre o engradado (a) pela força do operário, (b) pela força gravitacional e (c) pela força normal do piso? (d) Qual é o trabalho total realizado sobre o engradado?

57 Na Fig. 7-44, uma corda passa por duas polias ideais. Uma lata com uma massa m = 20 kg está pendurada em uma das polias, e você pode aplicar uma força $\vec{F}$ à extremidade livre da corda. (a) Qual deve ser o módulo de $\vec{F}$ para que você levante a lata com velocidade constante? (b) Qual deve ser o deslocamento da corda para levantar a lata 2,0 cm? Durante esse deslocamento, qual é o trabalho realizado sobre a lata (c) pela sua força (através da corda) e (d) pela força gravitacional? (*Sugestão:* Quando uma corda envolve uma polia da forma mostrada na figura, puxa a polia com uma força total que é duas vezes maior que a tensão da corda.)

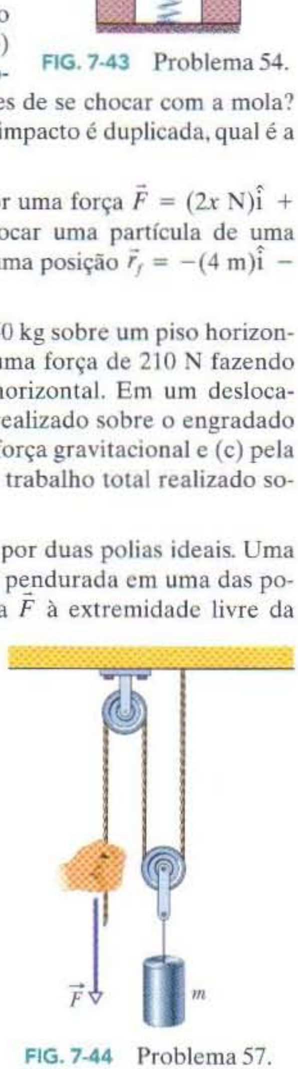


FIG. 7-44 Problema 57.

58 Uma força $\vec{F} = (4{,}0\text{ N})\hat{\text{i}} + c\hat{\text{j}}$ age sobre uma partícula enquanto a partícula sofre um deslocamento $\vec{d} = (3{,}0\text{ m})\hat{\text{i}} - (2{,}0\text{ m})\hat{\text{j}}$. (Outras forças também agem sobre a partícula.) Qual é o valor de c se o trabalho realizado sobre a partícula pela força $\vec{F}$ é (a) 0, (b) 17 J e (c) −18 J?

59 Uma força constante de módulo 10 N faz um ângulo de 150° (no sentido anti-horário) com o sentido positivo do eixo x ao agir sobre um objeto de 2,0 kg que se move em um plano xy. Qual é o trabalho realizado pela força sobre o objeto quando ele se move da origem até o ponto de vetor cujo vetor posição é $(2{,}0\text{ m})\hat{\text{i}} - (4{,}0\text{ m})\hat{\text{j}}$?

60 Um objeto de 2,0 kg inicialmente em repouso acelera uniformemente na horizontal até uma velocidade de 10 m/s em 3,0 s. (a) Nesse intervalo de 3,0 s, qual é o trabalho realizado sobre o objeto pela força que o acelera? Qual é a potência instantânea desenvolvida pela força (b) no final do intervalo e (c) no fim da primeira metade do intervalo?

61 Se um elevador de uma estação de esquiação transporta 100 passageiros com um peso médio de 660 N até uma altura de 150 m em 60,0 s, com velocidade constante, que potência média é exigida da força que realiza esse trabalho?

62 Caixas são transportadas de um local para outro de um armazém por meio de uma esteira que se move com uma velocidade constante de 0,50 m/s. Em um certo local, a esteira se move 2,0 m ao longo de uma rampa que faz um ângulo de 10° para cima com a horizontal, por 2,0 m na horizontal e, finalmente, 2,0 m ao longo de uma rampa que faz um ângulo de 10° para baixo com a horizontal. Suponha que uma caixa de 2,0 kg é transportada pela esteira sem escorregar. Com que taxa a força da esteira sobre a caixa realiza trabalho quando a caixa se move (a) para cima na rampa de 10°, (b) horizontalmente e (c) para baixo na rampa de 10°?

63 Um cavalo puxa uma carroça com uma força de 40 lb a um ângulo de 30° para cima com a horizontal e se move com uma velocidade de 6,0 mi/h. (a) Que trabalho a força realiza em 10 min? (b) Qual é a potência média desenvolvida pela força em horsepower?

64 Um trenó a vela está em repouso sobre a superfície de um lago congelado quando um vento repentino exerce sobre ele uma força constante de 200 N, na direção leste. Devido ao ângulo da vela, o vento faz com que o trenó se desloque em linha reta por uma distância de 8,0 m em uma direção 20° ao norte do leste. Qual é a energia cinética do trenó ao final desses 8,0 m?

65 Um caixote de 230 kg está pendurado na extremidade de uma corda de comprimento L = 12,0 m. Você puxa o caixote horizontalmente com uma força variável $\vec{F}$, deslocando-o para o lado de uma distância d = 4,00 m (Fig. 7-45). (a) Qual é o módulo de $\vec{F}$ quando o caixote está na posição final? Neste deslocamento, quais são (b) o trabalho total realizado sobre o caixote, (c) o trabalho realizado pela força gravitacional sobre o caixote e (d) o trabalho realizado pela corda sobre o caixote? (e) Sabendo que o caixote está em repouso antes e depois do deslocamento, use as respostas dos itens (b), (c) e (d) para determinar o trabalho que sua força $\vec{F}$ realiza sobre o caixote. (f) Por que o trabalho da sua força não é igual ao produto do deslocamento horizontal pela resposta do item (a)?

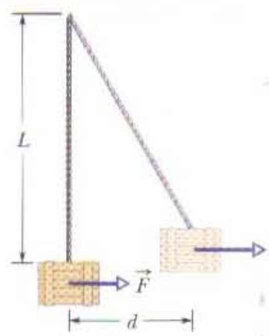


FIG. 7-45 Problema 65.

66 A única força que age sobre um corpo de 2,0 kg quando ele se desloca ao longo de um eixo x varia da forma indicada na Fig. 7-46. A escala vertical do gráfico é definida por $F_s = 4{,}0$ N. A velocidade do corpo em $x = 0$ é 4,0 m/s. (a) Qual é a energia cinética do corpo em $x = 3{,}0$ m? (b) Para que valor de x o corpo possui uma energia cinética de 8,0 J? (c) Qual é a energia cinética máxima do corpo entre $x = 0$ e $x = 5{,}0$ m?

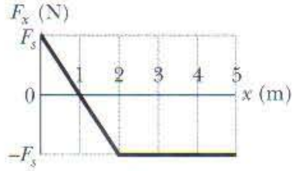


FIG. 7-46 Problema 66.

67 A Fig. 7-47 mostra um pacote de cachorros-quentes escorregando para a direita em um piso sem atrito por uma distância $d = 20{,}0$ cm, enquanto três forças agem sobre o pacote. Duas são horizontais e têm módulos $F_1 = 5{,}00$ N e $F_2 = 1{,}00$ N; a terceira faz um ângulo $\theta = 60{,}0°$ para baixo e tem um módulo $F_3 = 4{,}00$ N. (a) Qual é o trabalho *total* realizado sobre o pacote pelas três forças mais a força gravitacional e a força normal? (b) Se o pacote tem uma massa de 2,0 kg e uma energia cinética inicial igual a zero, qual é sua velocidade no final do deslocamento?

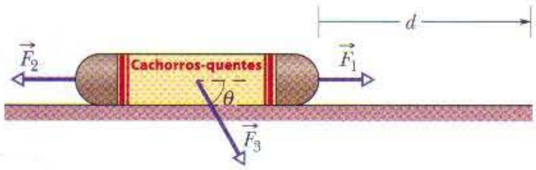


FIG. 7-47 Problema 67.

68 Uma criança assustada desce por um escorrega de atrito desprezível em um parque de diversões com o apoio da mãe. Se a força da mãe sobre a criança é de 100 N para cima ao longo do escorrega, a energia cinética da criança aumenta de 30 J quando ela desce uma distância de 1,8 m ao longo do escorrega. (a) Qual é o trabalho realizado sobre a criança pela força gravitacional durante a descida de 1,8 m? (b) Se a criança não tivesse o apoio da mãe, qual seria o aumento em sua energia cinética quando ela tivesse escorregado a mesma distância de 1,8 m?

69 Para empurrar um engradado de 25,0 kg para cima em um plano inclinado de 25° em relação à horizontal, um operário exerce uma força de 209 N paralela ao plano. Quando o engradado percorre 1,50 m, qual o trabalho realizado sobre ele (a) pela força aplicada pelo trabalhador, (b) pela força gravitacional e (c) pela força normal? (d) Qual é o trabalho total realizado sobre o engradado?

70 Se um carro com uma massa de 1200 kg viaja a 120 km/h em uma rodovia, qual é a energia cinética do carro medida por alguém que está parado no acostamento?

71 Uma mola com um ponteiro está pendurada perto de uma régua graduada em milímetros. Três pacotes diferentes são pendurados na mola, um de cada vez, como mostra a Fig. 7-48. (a) Que marca o ponteiro indica na régua quando não há nenhum pacote pendurado na mola? (b) Qual é o peso P do terceiro pacote?

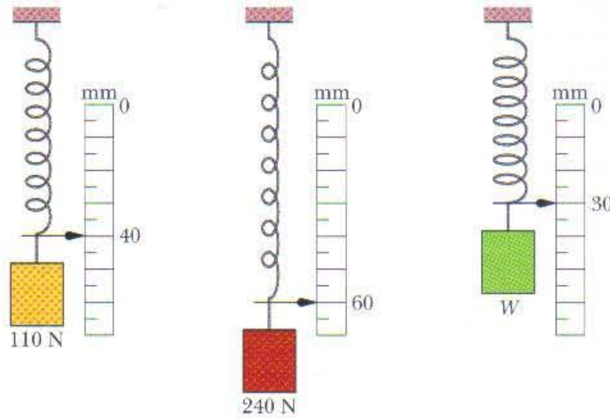


FIG. 7-48 Problema 71.

72 Uma partícula que se move em linha reta sofre um deslocamento retilíneo $\vec{d} = (8\text{ m})\hat{\text{i}} + c\hat{\text{j}}$ sob a ação de uma força $\vec{F} = (2\text{ N})\hat{\text{i}} - (4\text{ N})\hat{\text{j}}$. (Outras forças também agem sobre a partícula.) Qual é o valor de c se o trabalho realizado por $\vec{F}$ sobre a partícula é (a) zero, (b) positivo e (c) negativo?

73 Um elevador tem uma massa de 4500 kg e pode transportar uma carga máxima de 1800 kg. Se o elevador está subindo com a carga máxima a 3,80 m/s, que potência a força que move o elevador deve desenvolver para manter essa velocidade?

74 Um bloco de gelo de 45 kg desliza para baixo em um plano inclinado sem atrito de 1,5 m de comprimento e 0,91 m de altura. Um operário empurra o bloco para cima com uma força paralela ao plano, fazendo o bloco descer com velocidade constante. (a) Determine o módulo da força exercida pelo operário. Qual é o trabalho realizado sobre o bloco (b) pela força do operário, (c) pela força gravitacional, (d) pela força normal do plano inclinado e (e) pela força resultante?

75 Uma força $\vec{F}$ no sentido positivo de um eixo x age sobre um objeto que se move ao longo desse eixo. Se o módulo da força é $F = 10e^{-x/2{,}0}$ N, com x em metros, determine o trabalho realizado por $\vec{F}$ quando o objeto se desloca de $x = 0$ a $x = 2{,}0$ m (a) plotando $F(x)$ e estimando a área sob a curva e (b) integrando $F(x)$.

76 Na Fig. 7-49*a*, uma força de 2,0 N é aplicada em um bloco de 4,0 kg fazendo um ângulo θ para baixo com a horizontal enquanto o bloco desliza 1,0 m para a direita em um piso horizontal sem atrito. Escreva uma expressão para a velocidade v_f do bloco após ser percorrida essa distância para uma velocidade inicial de (a) 0 e (b) 1,0 m/s para a direita. (c) A situação da Fig. 7-49*b* é semelhante à anterior, pois o bloco está inicialmente se deslocando para a direita com uma velocidade de 1,0 m/s, mas agora a força de 2,0 N está dirigida para baixo e para a esquerda. Escreva uma expressão para a velocidade v_f do bloco após ser percorrida uma distância de 1,0 m. (d) Plote as três expressões de v_f em função do ângulo θ de $\theta = 0$ a $\theta = 90°$. Interprete os gráficos.

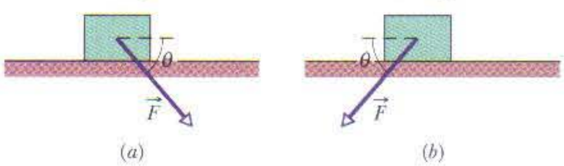


FIG. 7-49 Problema 76.

77 Uma merendeira de 2,0 kg escorrega em uma superfície sem atrito no sentido positivo de um eixo x. A partir do instante $t = 0$, um vento constante aplica uma força à merendeira no sentido negativo do eixo x. A Fig. 7-50 mostra a posição x da merendeira em função do tempo t. A partir do gráfico, estime a energia cinética da merendeira (a) em $t = 1{,}0$ s e (b) em $t = 5{,}0$ s. (c) Qual é o trabalho realizado pelo vento sobre a merendeira entre $t = 1{,}0$ s e $t = 5{,}0$ s?

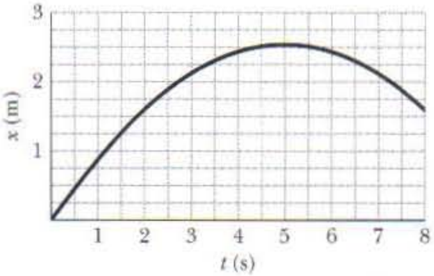


FIG. 7-50 Problema 77.

78 *Integração numérica.* Uma caixa é deslocada ao longo de um eixo x de $x = 0{,}15$ m a $x = 1{,}20$ m por uma força cujo módulo é dado por $\vec{F} = e^{-2x^2}$, com x em metros e F em newtons. Qual é o trabalho realizado pela força sobre a caixa?

79 Quando uma partícula se move ao longo de um eixo x, uma força atua sobre ela no sentido positivo do eixo. A Fig. 7-51 mostra o módulo F da força em função da posição x da partícula. A curva é dada por $F = a/x^2$, com $a = 9{,}0\ \text{N}\cdot\text{m}^2$. Determine o trabalho realizado pela força sobre a partícula quando a partícula se desloca de $x = 1{,}0$ m para $x = 3{,}0$ m (a) estimando o trabalho a partir do gráfico e (b) integrando a função da força.

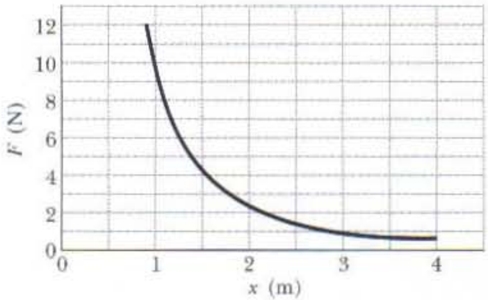


FIG. 7-51 Problema 79.

80 Uma caixa de CD escorrega em um piso no sentido positivo de um eixo x enquanto uma força aplicada $\vec{F}_a$ age sobre a caixa. A força está orientada ao longo do eixo x, e sua componente x é dada por $F_{ax} = 9x - 3x^2$, com x em metros e F_{ax} em newtons. A caixa parte do repouso na posição $x = 0$ e se move até ficar novamente em repouso. (a) Plote o trabalho realizado por $\vec{F}_a$ sobre a caixa em função de x. (b) Em que posição o trabalho é máximo e (c) qual é o valor deste trabalho máximo? (d) Em que posição o trabalho se torna nulo? (e) Em que posição a caixa fica novamente em repouso?

8 Energia Potencial e Conservação da Energia

Cortesia de Mark Reid, USGS

Quando uma avalanche de pedras desce a encosta de uma montanha e chega a um vale, o atrito entre as pedras e o solo acaba por imobilizar as pedras. A distância que as pedras percorrem em um vale é, normalmente, cerca de 2/3 da altura de onde caíram. Nas grandes avalanches, porém, quando uma grande quantidade de pedras desce uma montanha essa distância pode ser até 30 vezes maior, o suficiente para colher de surpresa os moradores de uma cidade próxima.

Por que uma grande avalanche pode atingir uma distância quase 30 vezes maior que uma avalanche pequena?

A resposta está neste capítulo.

8-1 O QUE É FÍSICA?

Uma das tarefas da física é identificar os diferentes tipos de energia que existem no mundo, especialmente os que têm utilidade prática. Uma forma comum de energia é a **energia potencial** U. 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.

Esta é uma definição muito formal para algo que na verdade é extremamente familiar. Um exemplo pode ser mais esclarecedor que a definição. Um praticante de *bungee-jump* salta de uma plataforma (Fig. 8-1). O sistema de objetos é formado pela Terra e o atleta. A força entre os objetos é a força gravitacional. A configuração do sistema varia (a distância entre o atleta e a Terra diminui, e isso, é claro, é que torna o salto emocionante). Podemos descrever o movimento do atleta e o aumento de sua energia cinética definindo uma **energia potencial gravitacional** U. Trata-se de uma energia associada ao estado de separação entre dois objetos que se atraem mutuamente através da força gravitacional, no caso o atleta e a Terra.

Quando o atleta começa a esticar a corda elástica no final do salto, o sistema de objetos é formado pela corda e o atleta. A força entre os objetos é uma força elástica (como a de uma mola). A configuração do sistema varia (a corda estica). Podemos relacionar a diminuição da energia cinética do saltador ao aumento do comprimento da corda definindo uma **energia potencial elástica** U. Trata-se da energia associada ao estado de compressão ou distensão de um objeto elástico, a corda, no caso.

A física ensina a calcular a energia potencial de um sistema, o que ajuda a escolher a melhor forma de usá-la ou armazená-la. Antes que um praticante de *bungee-jump* inicie um salto, por exemplo, alguém (provavelmente um engenheiro mecânico) deve ter verificado se a corda que será usada é segura, determinando a energia gravitacional e a energia elástica que podem ser esperadas. Nesse caso, o salto pode ser emocionante, mas não será fatal.

FIG. 8-1 A energia cinética de um praticante de *bungee-jump* aumenta durante a queda livre; em seguida, a corda começa a esticar, desacelerando o atleta. *(KOFUJIWARA/amana images/ Getty Images News and Sport Services)*

8-2 | Trabalho e Energia Potencial

No Capítulo 7 discutimos a relação entre o trabalho e a variação da energia cinética. Agora, vamos discutir a relação entre trabalho e uma variação da energia potencial.

Suponha que um tomate seja arremessado para cima (Fig. 8-2). Já sabemos que, enquanto o tomate está subindo, o trabalho W_g realizado pela força gravitacional sobre o tomate é negativo, porque a força extrai energia *da* energia cinética do tomate. Podemos agora concluir a história dizendo que esta energia é transferida pela força gravitacional da energia cinética do tomate para a energia potencial gravitacional do sistema tomate-Terra.

O tomate perde velocidade, pára e começa a cair de volta por causa da força gravitacional. Durante a queda, a transferência se inverte: o trabalho W_g realizado sobre o tomate pela força gravitacional agora é positivo e a força gravitacional passa a transferir energia *da* energia potencial do sistema tomate-Terra *para* a energia cinética do tomate.

Tanto na subida como na descida a variação ΔU da energia potencial gravitacional é definida como o negativo do trabalho realizado sobre o tomate pela força gravitacional. Usando o símbolo geral W para o trabalho, podemos expressar esta definição através da seguinte equação:

$$\Delta U = -W. \tag{8-1}$$

Esta equação também se aplica a um sistema massa-mola como o da Fig. 8-3. Se empurramos bruscamente o bloco, movimentando-o para a direita, a força da mola atua para a esquerda e, portanto, realiza trabalho negativo sobre o bloco, transferindo energia da energia cinética do bloco para a energia potencial elástica do sistema bloco-mola. O bloco perde velocidade até parar; em seguida, começa a se mover para a esquerda, já que a força da mola ainda está dirigida para a esquerda. A

FIG. 8-2 Um tomate é arremessado para cima. Enquanto sobe, a força gravitacional realiza um trabalho negativo sobre o tomate, diminuindo sua energia cinética. Quando desce, a força gravitacional realiza um trabalho positivo, aumentando sua energia cinética.

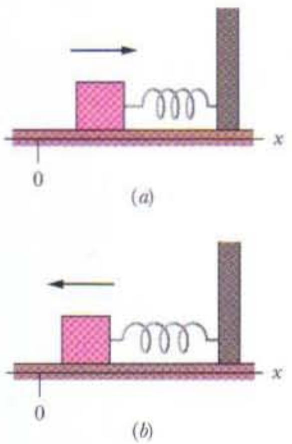


FIG. 8-3 Um bloco, preso a uma mola e inicialmente em repouso em $x = 0$, é colocado em movimento para a direita. (a) Quando o bloco se move para a direita (no sentido indicado pela seta) a força elástica da mola realiza trabalho negativo sobre o bloco. (b) Mais tarde, quando o bloco se move para a esquerda,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

partir desse momento, a transferência de energia se inverte: a energia passa a ser transferida da energia potencial do sistema bloco-mola para a energia cinética do bloco.

Forças Conservativas e Dissipativas

Vamos fazer uma lista dos elementos principais das duas situações que acabamos de discutir:

1. O *sistema* é formado por dois ou mais objetos.
2. Uma *força* atua entre um objeto do sistema que se comporta como partícula (o tomate ou o bloco) e o resto do sistema.
3. Quando a configuração do sistema varia, a força realiza *trabalho* (W_1, digamos) sobre o objeto, transferindo energia cinética K do objeto para alguma outra forma de energia do sistema.
4. Quando a mudança da configuração se inverte, a força inverte o sentido da transferência de energia, realizando um trabalho W_2 no processo.

Nas situações em que a relação $W_1 = -W_2$ é sempre observada, a outra forma de energia é uma energia potencial, e dizemos que a força é uma **força conservativa**. Como o leitor já deve ter desconfiado, a força gravitacional e a força elástica são conservativas (de outra forma, não poderíamos ter falado em energia potencial gravitacional e da energia potencial elástica, como fizemos anteriormente).

Uma força que não é conservativa é chamada de **força dissipativa**. A força de atrito cinético e a força de arrasto são forças dissipativas. Imagine, por exemplo, um bloco deslizando em um piso que não seja sem atrito. Durante o deslizamento a força de atrito cinético exercida pelo piso realiza um trabalho negativo sobre o bloco, reduzindo sua velocidade e transferindo a energia cinética do bloco para uma outra forma de energia, chamada *energia térmica* (que está associada ao movimento aleatório de átomos e moléculas). Os experimentos mostram que essa transferência de energia não pode ser revertida (a energia térmica não pode ser transferida de volta para a energia cinética do bloco pela força de atrito cinético). Assim, embora tenhamos um sistema (composto pelo bloco e pelo piso), uma força que atua entre partes do sistema e uma transferência de energia causada pela força, a força não é conservativa. Assim, a energia térmica não é uma energia potencial.

Quando um objeto que se comporta como uma partícula está sujeito apenas a forças conservativas, certos problemas que envolvem o movimento do objeto se tornam muito mais simples. Na próxima seção, em que apresentamos um método para identificar forças conservativas, será apresentado um exemplo desse tipo de simplificação.

8-3 | Independência da Trajetória para o Trabalho de Forças Conservativas

O teste principal para determinar se uma força é conservativa ou dissipativa é o seguinte: deixa-se a força atuar sobre uma partícula que se move ao longo de um *percurso fechado*, começando em uma certa posição e retornando a essa posição (ou seja, fazendo uma *viagem de ida e volta*). A força é conservativa se e apenas se a energia total transferida durante a viagem de ida e volta, ao longo deste ou de qualquer outro percurso fechado, for nula. Em outras palavras:

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

Sabemos, através de experimentos, que a força gravitacional passa neste *teste do percurso fechado*. Um exemplo é o tomate da Fig. 8-2. O tomate deixa o ponto de lançamento com velocidade v_0 e energia cinética $\frac{1}{2}mv_0^2$. A força gravitacional que age sobre o tomate reduz sua velocidade a zero e depois o faz cair de volta. Quando o tomate retorna ao ponto de partida ele possui novamente uma velocidade v_0 e uma energia cinética $\frac{1}{2}mv_0^2$. Assim, a força gravitacional extrai tanta energia *do* tomate durante a subida quanto fornece energia *ao* tomate durante a descida. O trabalho total realizado sobre o tomate pela força gravitacional durante a viagem de ida e volta é, portanto, nulo.

Uma conseqüência importante do teste do percurso fechado é a seguinte:

O trabalho realizado por uma força conservativa sobre uma partícula que se move entre dois pontos não depende da trajetória seguida pela partícula.

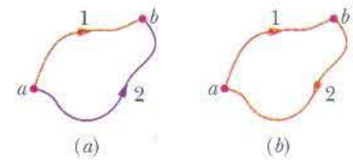


FIG. 8-4 (*a*) Uma partícula pode se mover do ponto *a* ao ponto *b*, sob a ação de uma força conservativa, seguindo a trajetória 1 ou a trajetória 2. (*b*) A partícula descreve um percurso fechado, seguindo a trajetória 1 para ir do ponto *a* ao ponto *b* e a trajetória 2 para voltar ao ponto *a*.

Suponha, por exemplo, que a partícula se move do ponto *a* para o ponto *b* da Fig. 8-4*a* seguindo a trajetória 1 ou a trajetória 2. Se todas as forças que agem sobre a partícula são conservativas, o trabalho realizado sobre a partícula é o mesmo para as duas trajetórias. Em símbolos, podemos escrever este resultado como

$$W_{ab,1} = W_{ab,2}, \qquad (8\text{-}2)$$

onde o índice *ab* indica os pontos inicial e final, respectivamente, e os índices 1 e 2 indicam a trajetória.

Este resultado é importante porque permite simplificar problemas difíceis quando apenas uma força conservativa está envolvida. Suponha que você precise calcular o trabalho realizado por uma força conservativa ao longo de uma certa trajetória entre dois pontos e que o cálculo seja difícil ou mesmo impossível sem informações adicionais. Você pode determinar o trabalho substituindo a trajetória entre estes dois pontos por outra para a qual o cálculo seja mais fácil. O Exemplo 8-1 mostra uma aplicação dessas idéias, mas antes vamos demonstrar a Eq. 8-2.

Demonstração da Equação 8-2

A Fig. 8-4*b* mostra um percurso fechado arbitrário de uma partícula sujeita à ação de uma única força. A partícula se desloca de um ponto inicial *a* para um ponto *b* seguindo a trajetória 1 e volta ao ponto *a* seguindo a trajetória 2. A força realiza trabalho sobre a partícula enquanto ela se desloca em cada uma das trajetórias. Sem nos preocuparmos em saber se o trabalho realizado é positivo ou negativo, vamos representar o trabalho realizado de *a* até *b* ao longo da trajetória 1 como $W_{ab,1}$ e o trabalho realizado de *b* até *a* ao longo da trajetória 2 como $W_{ba,2}$. Se a força é conservativa, o trabalho total realizado durante a viagem de ida e volta deve ser zero:

$$W_{ab,1} + W_{ba,2} = 0,$$

e, portanto,

$$W_{ab,1} = -W_{ba,2}. \qquad (8\text{-}3)$$

Em palavras, o trabalho realizado ao longo da trajetória de ida deve ser o negativo do trabalho realizado ao longo da trajetória de volta.

Consideremos agora o trabalho $W_{ab,2}$ realizado pela força sobre a partícula quando ela se move de *a* para *b* ao longo da trajetória 2 (Fig. 8-4*a*). Se a força é conservativa, este trabalho é o negativo de $W_{ba,2}$:

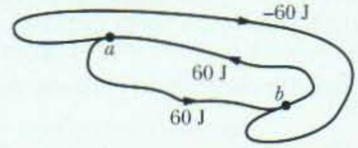
$$W_{ab,2} = -W_{ba,2}. \qquad (8\text{-}4)$$

Substituindo $-W_{ba,2}$ por $W_{ab,2}$ na Eq. 8-3, obtemos

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

como queríamos demonstrar.

TESTE 1 A figura mostra três trajetórias ligando os pontos a e b. Uma única força $\vec{F}$ realiza o trabalho indicado sobre uma partícula que se move ao longo de cada trajetória no sentido indicado. Com base nessas informações, podemos afirmar que a força $\vec{F}$ é conservativa?



Exemplo 8-1

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?

IDÉIAS-CHAVE (1) *Não podemos* usar a Eq. 7-12 ($W_g = mgd\cos\phi$) para calcular o trabalho, pois o ângulo ϕ entre a força gravitacional $\vec{F}_g$ e o deslocamento $\vec{d}$ varia de ponto para ponto de forma desconhecida. (Mesmo que conhecêssemos a forma da trajetória e pudéssemos calcular ϕ para todos os pontos, o cálculo poderia ser muito difícil.) (2) Como $\vec{F}_g$ é uma força conservativa, podemos calcular o trabalho escolhendo outra trajetória entre a e b, uma que torne os cálculos mais simples.

Cálculos: Vamos escolher o percurso tracejado da Fig. 8-5*b*; ele é formado por dois segmentos de reta. Ao longo do segmento horizontal o ângulo ϕ é constante e igual a 90°. Não conhecemos o deslocamento horizontal de a para b, mas a Eq. 7-12 nos diz que o trabalho W_h realizado ao longo deste segmento é

$$W_h = mgd\cos 90° = 0.$$

No segmento vertical, o deslocamento d é 0,80 m e, com $\vec{F}_g$ e $\vec{d}$ apontando verticalmente para baixo, o ângulo ϕ é constante e igual a 0°. Assim, a Eq. 7-12 nos fornece, para o trabalho W_v realizado ao longo do trecho vertical do percurso tracejado,

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

O trabalho total realizado sobre o queijo por $\vec{F}_g$ quando o queijo se desloca do ponto a para o ponto b ao longo do percurso tracejado é, portanto,

$$W = W_h + W_v = 0 + 15{,}7\ \text{J} \approx 16\ \text{J}. \quad \text{(Resposta)}$$

Este é também o trabalho realizado quando o queijo escorrega ao longo do trilho de a até b.

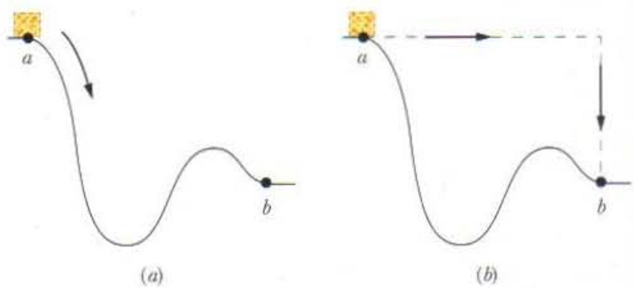


FIG. 8-5 (*a*) Um pedaço de queijo desliza ao longo de uma superfície curva sem atrito do ponto a para o ponto b. (*b*) O trabalho realizado pela força gravitacional sobre o queijo é mais fácil de calcular para a trajetória tracejada do que para a trajetória real, mas o resultado é o mesmo nos dois casos.

8-4 | Determinação de Valores de Energia Potencial

Os valores dos dois tipos de energia potencial discutidos neste capítulo, a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica, podem ser calculados com o auxílio de equações. Para chegar a essas equações, porém, precisamos encontrar uma relação geral entre uma força conservativa e a energia potencial a ela associada.

Considere um objeto que se comporta como uma partícula e que faz parte de um sistema no qual atua uma força conservativa $\vec{F}$. Quando essa força realiza um trabalho W sobre o objeto, a variação ΔU da energia potencial associada ao sistema é o negativo do trabalho realizado. Este fato é expresso pela Eq. 8-1 ($\Delta U = -W$). No caso mais geral em que a força varia com a posição, podemos escrever o trabalho W como na Eq. 7-32:

$$W = \int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx. \tag{8-5}$$

Esta equação fornece o trabalho realizado pela força quando o objeto se desloca do ponto x_i para o ponto x_f, mudando a configuração do sistema. (Como a força é conservativa, o trabalho é o mesmo para qualquer percurso entre esses dois pontos.)

Substituindo a Eq. 8-5 na Eq. 8-1, descobrimos que a variação de energia potencial associada à mudança de configuração é

$$\Delta U = -\int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx. \tag{8-6}$$

Energia Potencial Gravitacional

Consideremos inicialmente uma partícula de massa m que se move verticalmente ao longo de um eixo y (com o sentido positivo para cima). Quando a partícula se move do ponto y_i para o ponto y_f a força gravitacional $\vec{F}_g$ realiza trabalho sobre ela. Para determinar a variação correspondente da energia potencial gravitacional do sistema partícula-Terra usamos a Eq. 8-6 com duas modificações: (1) integramos ao longo do eixo y em vez do eixo x, já que a força gravitacional age na direção vertical. (2) Substituímos a força F por $-mg$, pois $\vec{F}_g$ possui módulo mg e está orientada no sentido negativo do y. Temos:

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

e, portanto,

$$\Delta U = mg(y_f - y_i) = mg\, \Delta y. \tag{8-7}$$

São apenas as *variações* ΔU da energia potencial gravitacional (ou de qualquer outro tipo de energia) que possuem significado físico. Entretanto, para simplificar um cálculo ou uma discussão às vezes gostaríamos de dizer que um certo valor de energia potencial gravitacional U está associado a um certo sistema partícula-Terra quando a partícula está a uma certa altura y. Para isso, escrevemos a Eq. 8-7 na forma

$$U - U_i = mg(y - y_i). \tag{8-8}$$

e tomamos U_i como sendo a energia potencial gravitacional do sistema quando ele se encontra em uma **configuração de referência** na qual a partícula está em um **ponto de referência** y_i. Normalmente tomamos $U_i = 0$ e $y_i = 0$. Fazendo isso, a Eq. 8-8 se torna

$$U(y) = mgy \quad \text{(energia potencial gravitacional).} \tag{8-9}$$

Esta equação nos diz o seguinte:

A energia potencial gravitacional associada a um sistema partícula-Terra depende apenas da posição vertical y (ou altura) da partícula em relação à posição de referência $y = 0$, e não da posição horizontal.

Energia Potencial Elástica

Consideramos a seguir o sistema massa-mola da Fig. 8-3, com o bloco se movendo na extremidade de uma mola de constante elástica k. Enquanto o bloco se desloca do ponto x_i para o ponto x_f, a força elástica $F_x = -kx$ realiza trabalho sobre o bloco. Para determinar a variação correspondente da energia potencial elástica do sistema bloco-mola substituímos $F(x)$ por $-kx$ na Eq. 8-6, obtendo

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

ou

$$\Delta U = \tfrac{1}{2}kx_f^2 - \tfrac{1}{2}kx_i^2. \tag{8-10}$$

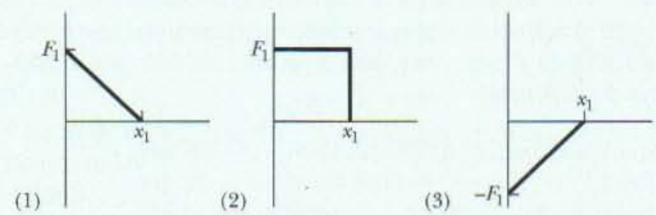
Para associar um valor de energia potencial U ao bloco na posição x escolhemos a configuração de referência como sendo aquela na qual a mola se encontra no estado relaxado e o bloco está em $x_i = 0$. Nesse caso, a energia potencial elástica U_i é zero e a Eq. 8-10 se torna

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

o que nos dá

$$U(x) = \tfrac{1}{2}kx^2 \quad \text{(energia potencial elástica).} \tag{8-11}$$

TESTE 2 Uma partícula se move ao longo de um eixo x de $x = 0$ para x_1 enquanto uma força conservativa, orientada ao longo do eixo x, atua sobre a partícula. A figura mostra três situações nas quais a força varia com x. A força possui a mesma intensidade máxima F_1 nas três situações. Ordene as situações de acordo com a variação da energia potencial associada ao movimento da partícula, começando pela mais positiva.



TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 1: *Uso do Termo "Energia Potencial"* Embora a energia potencial esteja associada ao sistema como um todo, na prática ela é muitas vezes associada a apenas uma parte do sistema. Afirmações como "uma maçã em uma árvore possui uma energia potencial de 30 J" são bastante comuns. Essas afirmações geralmente são aceitáveis, mas você deve ter sempre em mente que a energia potencial está na verdade associada a um sistema; no caso, o sistema maçã-Terra. Lembre-se também de que atribuir um valor particular de energia potencial, como 30 J, a um objeto ou mesmo a um sistema faz sentido *apenas* se o valor da energia potencial de referência for conhecido, como mostra o Exemplo 8-2.

Exemplo 8-2

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 tomamos 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 sendo nula em $y = 0$.

IDÉIA-CHAVE Uma vez escolhido o ponto de referência para $y = 0$, podemos calcular a energia potencial gravitacional U do sistema *em relação a esse ponto de referência* usando a Eq. 8-9.

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

(3) $U = mgy = mg(0) = 0$ J,

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

IDÉIA-CHAVE A *variação* da energia potencial não depende da escolha do ponto de referência, mas apenas de Δy, a variação de altura.

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

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

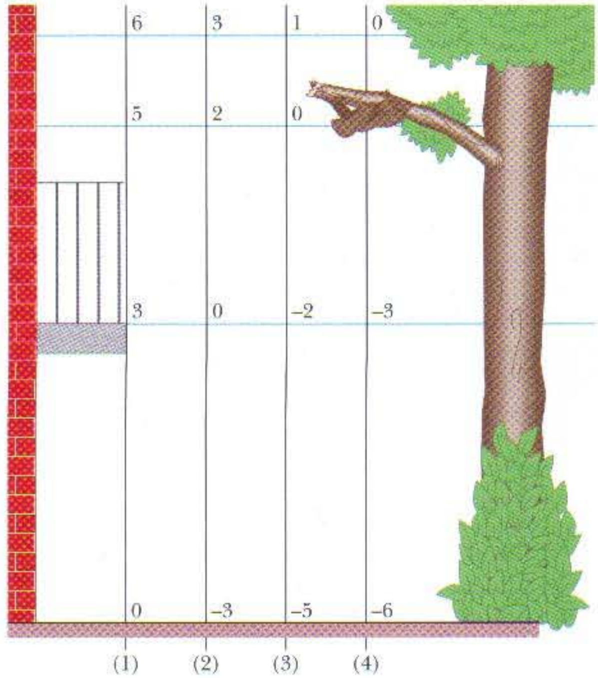


FIG. 8-6 Quatro escolhas para o ponto de referência $y = 0$. Em cada eixo y estão assinalados alguns valores da altura em metros. A escolha afeta o valor da energia potencial U do sistema preguiça-Terra, mas não a variação ΔU da energia potencial do sistema se a preguiça se mover descendo da árvore, por exemplo.

8-5 | Conservação da Energia Mecânica

A **energia mecânica** E_{mec} de um sistema é a soma da energia potencial U do sistema com a energia cinética K dos objetos que compõem o sistema:

$$E_{mec} = K + U \qquad \text{(energia mecânica)}. \tag{8-12}$$

Nesta seção, vamos discutir o que acontece com essa energia mecânica quando as transferências de energia dentro do sistema são produzidas apenas por forças conservativas, ou seja, quando os objetos do sistema não estão sujeitos a forças de atrito e de arrasto. Além disso, vamos supor que o sistema está *isolado* do ambiente, isto é, que nenhuma *força externa* produzida por um objeto fora do sistema causa variações de energia dentro do sistema.

Quando uma força conservativa realiza um trabalho W sobre um objeto dentro do sistema, essa força é responsável por uma transferência de energia entre a energia cinética K do objeto e a energia potencial U do sistema. De acordo com a Eq. 7-10, a variação ΔK da energia cinética é

$$\Delta K = W \tag{8-13}$$

e, de acordo com a Eq. 8-1, a variação ΔU da energia potencial é

$$\Delta U = -W. \tag{8-14}$$

Combinando as Eqs. 8-13 e 8-14, temos:

$$\Delta K = -\Delta U. \tag{8-15}$$

Em palavras, uma dessas energias aumenta exatamente da mesma quantidade que a outra diminui.

Podemos escrever a Eq. 8-15 na forma

$$K_2 - K_1 = -(U_2 - U_1), \tag{8-16}$$

onde os índices se referem a dois instantes diferentes e, portanto, a duas configurações distintas dos objetos do sistema. Reagrupando os termos da Eq. 8-16, obtemos a seguinte equação:

No passado costumava-se arremessar as pessoas para o alto, usando um cobertor, para que pudessem enxergar mais longe. Hoje em dia isto é feito apenas por diversão. Durante a subida da pessoa que aparece na fotografia a energia é transferida da energia cinética para energia potencial gravitacional. A altura máxima é atingida quando a transferência se completa. Durante a queda a transferência ocorre no sentido inverso. *(©AP/Wide World Photos)*

$$K_2 + U_2 = K_1 + U_1 \quad \text{(conservação da energia mecânica).} \tag{8-17}$$

Em palavras, esta equação diz o seguinte:

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

quando o sistema é isolado e apenas forças conservativas atuam sobre os objetos do sistema. Em outras palavras:

Em um sistema isolado, onde apenas forças conservativas causam variações de energia, a energia cinética e a energia potencial podem variar, mas sua soma, a energia mecânica E_{mec} do sistema, não pode variar.

Este resultado é conhecido como **princípio de conservação da energia mecânica**. (Agora você pode entender a origem do nome *força conservativa.*) Com o auxílio da Eq. 8-15, podemos escrever este princípio de outra forma:

$$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0. \tag{8-18}$$

O princípio de conservação da energia mecânica permite resolver problemas que seriam bastante difíceis de resolver usando apenas as leis de Newton:

Quando a energia mecânica de um sistema é conservada, podemos relacionar a soma da energia cinética com a energia potencial em um instante à soma em outro instante *sem levar em conta o movimento intermediário e sem calcular o trabalho realizado pelas forças envolvidas.*

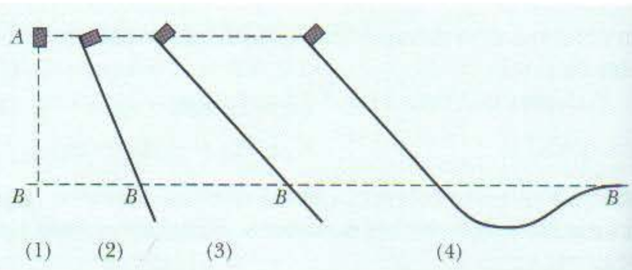
A Fig. 8-7 mostra um exemplo no qual o princípio de conservação da energia mecânica pode ser aplicado. Enquanto um pêndulo oscila, a energia do sistema pêndulo-Terra é transferida da energia cinética K para a energia potencial gravitacional U e vice-versa, com a soma $K + U$ permanecendo constante. Se conhecemos a energia potencial gravitacional quando o peso do pêndulo está no ponto mais alto (Fig. 8-7*c*), a Eq. 8-17 nos fornece a energia cinética do peso no ponto mais baixo (Fig. 8-7*e*).

Vamos, por exemplo, escolher o ponto mais baixo como o ponto de referência, com a energia potencial gravitacional $U_2 = 0$. Suponha que a energia potencial no ponto mais alto seja $U_1 = 20$ J em relação ao ponto de referência. Como o peso se imobiliza momentaneamente ao atingir o ponto mais alto, a energia cinética nesse ponto é $K_1 = 0$. Substituindo estes valores na Eq. 8-17, obtemos a energia cinética K_2 no ponto mais baixo:

$$K_2 + 0 = 0 + 20 \text{ J} \qquad \text{ou} \qquad K_2 = 20 \text{ J}.$$

Observe que obtivemos este resultado sem considerar o movimento entre os pontos mais baixo e mais alto (como na Fig. 8-7*d*) e sem determinar o trabalho realizado pelas forças envolvidas no movimento.

TESTE 3 A figura mostra quatro situações: uma na qual um bloco inicialmente em repouso é deixado cair e três outras nas quais o bloco desce deslizando em rampas sem atrito. (a) Ordene as situações de acordo com a energia cinética do bloco no ponto B, em ordem decrescente. (b) Ordene as situações de acordo com a velocidade do bloco no ponto B, em ordem decrescente.



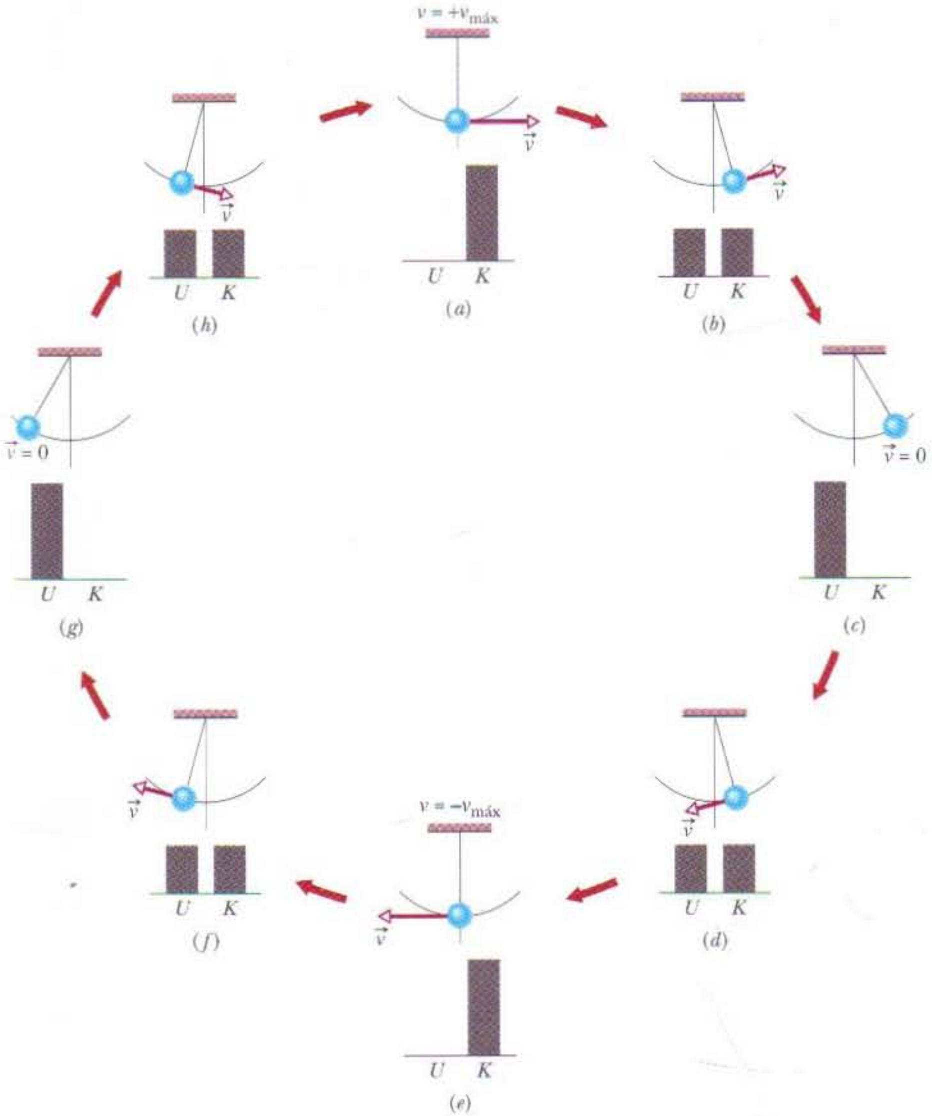


FIG. 8-7 Um pêndulo, com a massa concentrada em um peso na extremidade inferior, oscila de um lado para o outro. É mostrado um ciclo completo do movimento. Durante o ciclo os valores da energia potencial e cinética do sistema pêndulo-Terra variam quando o peso sobe e desce, mas a energia mecânica E_{mec} do sistema permanece constante. Pode-se dizer que a energia E_{mec} se alterna continuamente entre as formas de energia cinética e energia potencial. Nos estágios (*a*) e (*e*) toda a energia está na forma de energia cinética, o peso tem velocidade máxima e se encontra no ponto mais baixo de sua trajetória. Nos estágios (*c*) e (*g*) toda a energia está na forma de energia potencial, o peso tem velocidade nula e se encontra no ponto mais alto da trajetória. Nos estágios (*b*), (*d*), (*f*) e (*h*) metade da energia é energia cinética e a outra metade é energia potencial. Se a oscilação do pêndulo envolvesse uma força de atrito no ponto onde o pêndulo está preso ao teto ou uma força de arrasto devido ao ar, E_{mec} não seria conservada e o pêndulo acabaria parando.

Exemplo 8-3 Aumente sua capacidade

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, encontre a velocidade da criança ao chegar à base do toboágua.

IDÉIAS-CHAVE (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 ela. A *força normal* exercida pelo toboágua sobre a criança não realiza trabalho, pois sua direção em qualquer ponto da descida é sempre perpendicular à direção em que a criança se move.

Sistema: Como a única força que realiza trabalho sobre a criança é a força gravitacional, escolhemos o sistema criança-Terra como o nosso sistema, que podemos considerar isolado.

Assim, temos apenas uma força conservativa realizando trabalho em um sistema isolado e, portanto, podemos usar o princípio de conservação da energia mecânica.

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,

$$E_{mec,b} = E_{mec,a}. \quad (8\text{-}19)$$

Explicitando os dois tipos de energia mecânica, escrevemos

$$K_b + U_b = K_a + U_a, \quad (8\text{-}20)$$

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:

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

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.

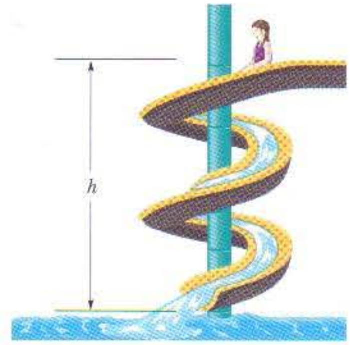


FIG. 8-8 Uma criança desce uma altura h escorregando em um toboágua.

Comentários: Embora este problema seja difícil de ser resolvido aplicando diretamente as leis de Newton, o uso da conservação da energia mecânica torna a solução bem simples. Entretanto, se alguém perguntar qual é o tempo que a criança leva para chegar à base do toboágua, os métodos baseados em energia são inúteis; precisaríamos conhecer a forma do toboágua, e mesmo assim ainda teríamos um problema difícil.

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 2: *Conservação da Energia Mecânica* As respostas às perguntas que se seguem o ajudarão a resolver problemas que envolvem o princípio de conservação da energia mecânica.

Em que sistema a energia mecânica é conservada? Você deve ser capaz de separar do ambiente o sistema de interesse. Verifique se é possível imaginar uma superfície fechada tal que tudo que está do lado de dentro é o sistema de interesse e tudo que está do lado de fora é o ambiente externo.

Existem forças de atrito ou arrasto envolvidas? Quando existe atrito ou arrasto no sistema a energia mecânica não é conservada.

O sistema é isolado? O princípio de conservação da energia mecânica se aplica apenas a sistemas isolados. Isso significa que nenhuma *força externa* (força exercida por um objeto que não pertence ao sistema) deve realizar trabalho sobre um objeto do sistema.

Quais são os estados inicial e final do sistema? O sistema passa de uma certa configuração inicial para uma certa configuração final. Aplicamos o princípio de conservação da energia mecânica dizendo que E_{mec} tem o mesmo valor nas duas configurações. É preciso definir com precisão quais são essas duas configurações.

8-6 | Interpretação de uma Curva de Energia Potencial

Mais uma vez vamos considerar uma partícula pertencente a um sistema no qual atua uma força conservativa. Desta vez supomos que o movimento da partícula se dá ao longo de um eixo x, enquanto uma força conservativa realiza trabalho sobre ela. Podemos obter muitas informações a respeito do movimento da partícula a partir do gráfico da energia potencial do sistema, $U(x)$. Antes de discutirmos esse tipo de gráfico, porém, precisamos de mais uma relação.

Cálculo da Força

A Eq. 8-6 pode ser usada para calcular a variação ΔU da energia potencial entre dois pontos em uma situação unidimensional a partir da força $F(x)$. Agora estamos interessados em fazer o contrário, ou seja, calcular a força a partir da função energia potencial $U(x)$.

No caso do movimento em uma dimensão, o trabalho W realizado por uma força que age sobre uma partícula quando a partícula percorre uma distância Δx é $F(x)\,\Delta x$. Nesse caso, a Eq. 8-1 pode ser escrita na forma

$$\Delta U(x) = -W = -F(x)\,\Delta x. \tag{8-21}$$

Explicitando $F(x)$ e fazendo o acréscimo Δx tender a zero, temos:

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx} \quad \text{(movimento em uma dimensão),} \tag{8-22}$$

que é a equação procurada.

Podemos verificar se este resultado está correto fazendo $U(x) = \frac{1}{2}kx^2$, que é a função energia potencial elástica associada a uma força elástica. Nesse caso, o uso da Eq. 8-22 leva, como seria de se esperar, à equação $F(x) = -kx$, que é a lei de Hooke. Da mesma forma, podemos fazer $U(x) = mgx$, que é a energia potencial gravitacional de um sistema partícula-Terra, com uma partícula de massa m a uma altura x acima da superfície da Terra. Nesse caso, a Eq. 8-22 nos dá $F = -mg$, que é a força gravitacional a que a partícula está submetida.

A Curva de Energia Potencial

A Fig. 8-9*a* é um gráfico de uma função energia potencial $U(x)$ para um sistema no qual uma partícula se move em uma dimensão enquanto uma força conservativa $F(x)$ realiza trabalho sobre ela. Podemos facilmente calcular $F(x)$ determinando (graficamente) a inclinação da curva de $U(x)$ em vários pontos. (De acordo com a Eq. 8-22, $F(x)$ é o negativo da inclinação da curva $U(x)$.) A Fig. 8-9*b* é um gráfico de $F(x)$ obtido dessa forma.

Pontos de Retorno

A energia mecânica E de um sistema com o da Fig. 8-9 tem um valor constante dado por

$$U(x) + K(x) = E_{mec}. \tag{8-23}$$

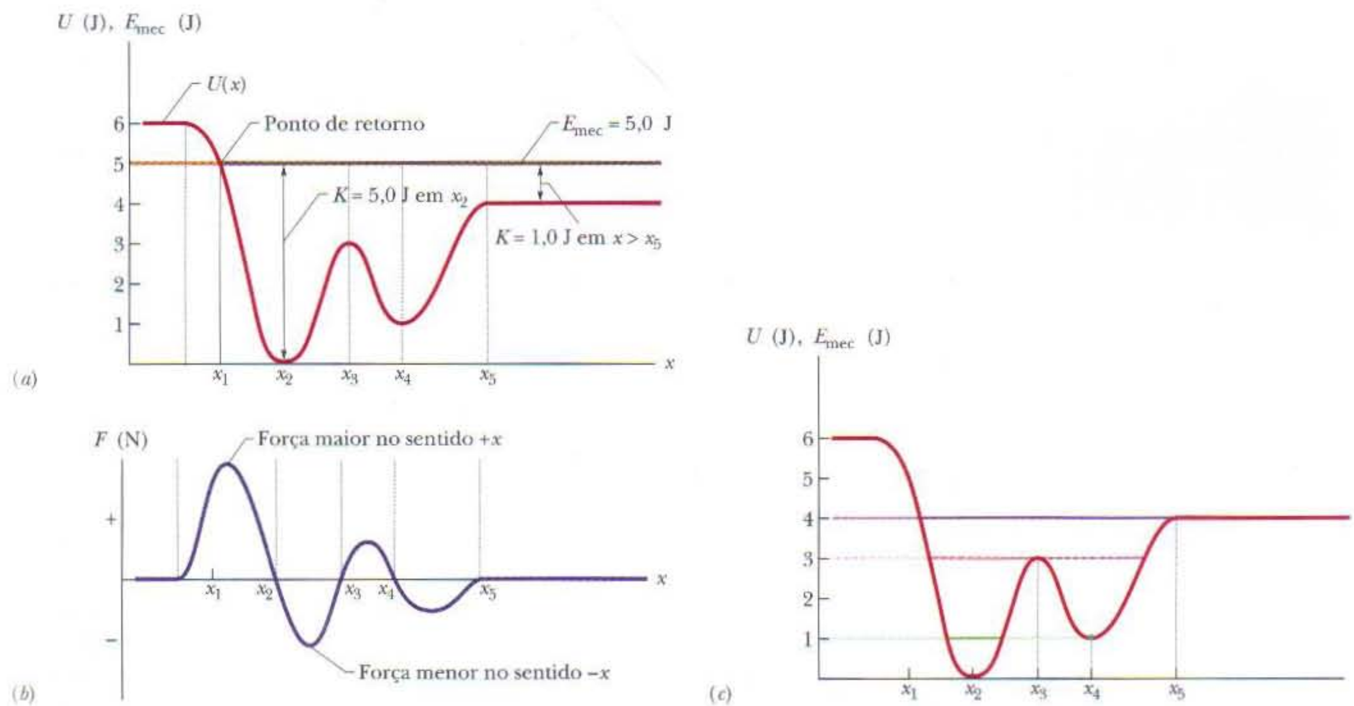


FIG. 8-9 (*a*) Gráfico de $U(x)$, a função energia potencial de um sistema com uma partícula que se move ao longo de um eixo x. Como não existe atrito, a energia mecânica é conservada. (*b*) Gráfico da força $F(x)$ que age sobre a partícula, obtido a partir do gráfico da energia potencial determinando a inclinação do gráfico em vários pontos. (*c*) O mesmo gráfico de (*a*), com três possíveis valores de E_{mec}.

onde a energia potencial $U(x)$ e a energia cinética $K(x)$ são funções da posição x da partícula. Podemos reescrever a Eq. 8-23 na forma

$$K(x) = E_{mec} - U(x). \tag{8-24}$$

Suponha que E_{mec} (que, como sabemos, tem um valor constante) seja, por exemplo, igual a 5,0 J. Este valor pode ser representado na Fig. 8-9*a* por uma reta horizontal que intercepta o eixo das energias no ponto correspondente a 5,0 J. (A reta aparece na figura.)

Podemos usar a Eq. 8-24 para determinar a energia cinética K correspondente a qualquer localização x da partícula a partir do gráfico de $U(x)$. Para isso, determinamos, na curva de $U(x)$, o valor de U para essa localização x e, em seguida, subtraímos U de E_{mec}. Assim, por exemplo, se a partícula se encontra em qualquer ponto à direita de x_5, $K = 1{,}0$ J. O valor de K é máximo (5,0 J) quando a partícula está em x_2 e mínimo (0 J) quando a partícula está em x_1.

Como K não pode ser negativa (pois v^2 é necessariamente um número positivo), a partícula não pode passar para a região à esquerda de x_1, na qual $E_{mec} - U$ é um número negativo. Quando a partícula se move a partir de x_2 em direção a x_1, K diminui (a velocidade da partícula diminui) até que $K = 0$ em $x = x_1$ (a velocidade da partícula se anula).

Observe que quando a partícula chega a x_1 a força que age sobre a partícula, dada pela Eq. 8-22, é positiva (pois a derivada dU/dx é negativa). Isso significa que a partícula não fica parada em x_1, mas começa a se mover para a direita, invertendo seu movimento. Assim, x_1 é um **ponto de retorno**, um lugar onde $K = 0$ (já que $U = E$) e a partícula inverte o sentido de movimento. Não existe ponto de retorno (em que $K = 0$) no lado direito do gráfico. Quando a partícula se desloca para a direita ela continua a se mover indefinidamente nesse sentido.

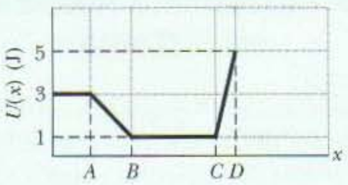
Pontos de Equilíbrio

A Fig. 8-9*c* mostra três valores diferentes de E_{mec} superpostos ao gráfico da função energia potencial $U(x)$ da Fig. 8-9*a*. Vejamos como esses valores alteram a situação. Se $E_{mec} = 4{,}0$ J (reta violeta), o ponto de retorno muda de x_1 para um ponto entre x_1 e x_2. Além disso, em qualquer ponto à direita de x_5, a energia mecânica do sistema é igual à energia potencial; assim, a partícula não possui energia cinética, e (de acordo com a Eq. 8-22) nenhuma força atua sobre a mesma, de modo que permanece em repouso. Diz-se que uma partícula nesta situação está em **equilíbrio indiferente**. (Uma bola de gude sobre uma mesa horizontal é um exemplo desse tipo de equilíbrio.)

Se $E_{mec} = 3{,}0$ J (reta rosa), existem dois pontos de retorno, um entre x_1 e x_2 e o outro entre x_4 e x_5. Além disso, x_3 é um terceiro ponto no qual $K = 0$. Se a partícula estiver exatamente neste 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. Diz-se que uma partícula nesta situação está em **equilíbrio instável**. (Uma bola de gude equilibrada no alto de uma bola de boliche é um exemplo deste tipo de equilíbrio.)

Considere agora o comportamento da partícula se $E_{mec} = 1{,}0$ J (reta verde). Se a partícula for colocada em x_4, ficará indefinidamente nesta posição. Ela não pode se mover nem para a direita nem para a esquerda, pois para isso seria necessária uma energia cinética negativa. Se a empurrarmos ligeiramente para a esquerda ou para a direita surge uma força restauradora que a faz retornar ao ponto x_4. Diz-se que uma partícula nesta situação está em **equilíbrio estável**. (Uma bola de gude no fundo de uma tigela hemisférica é um exemplo deste tipo de equilíbrio.) Se colocarmos a partícula no *poço de potencial* em forma de taça com centro em x_2, ela estará entre dois pontos de retorno. Poderá se mover, mas apenas entre x_1 e x_3.

TESTE 4 A figura mostra a função energia potencial $U(x)$ de um sistema no qual uma partícula se move em uma dimensão. (a) Ordene as regiões AB, BC e CD de acordo com o módulo da força que age sobre a partícula, em ordem decrescente. (b) Qual é o sentido da força quando a partícula está na região AB?



Exemplo 8-4

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. Isso significa que se a partícula for colocada em qualquer posição entre $x = 0$ e $x = 7{,}00$ terá o valor indicado de U. Em $x = 6{,}5$ m, a velocidade da partícula é $v_0 = (-4{,}00\text{ m/s})\hat{\text{i}}$.

(a) Determine a velocidade da partícula em $x_1 = 4{,}5$ m a partir da Fig. 8-10a.

IDÉIAS-CHAVE (1) A energia cinética da partícula é dada pela Eq. 7-1 ($K = \frac{1}{2}mv^2$). (2) Como apenas uma força conservativa age sobre a partícula, a energia mecânica E_{mec} ($= K + U$) é conservada quando a partícula se move. (3) Assim, em um gráfico de $U(x)$ como o da Fig. 8-10a a energia cinética é igual à diferença entre E_{mec} e U.

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

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

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

IDÉIA-CHAVE O ponto de retorno é o ponto em que a força anula momentaneamente e depois inverte o movimento da partícula. Neste ponto, $v = 0$ e, portanto, $K = 0$.

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 a proporcionalidade dos catetos

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

para obter $d = 2{,}08$ 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 $1{,}9\text{ m} < x < 4{,}0\text{ m}$.

IDÉIA-CHAVE A força é dada pela Eq. 8-22 [$F(x) = -dU(x)/dx$]. De acordo com esta equação, a força é o negativo da inclinação da curva de $U(x)$.

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

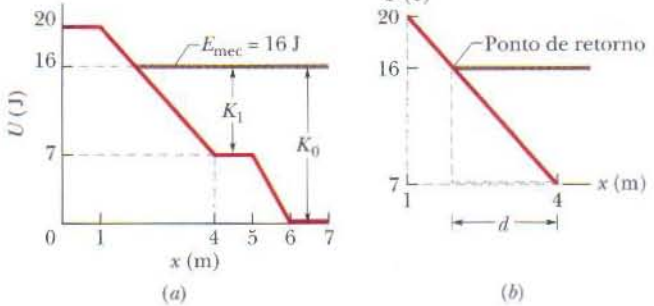


FIG. 8-10 (a) Gráfico da energia potencial U em função da posição x. (b) Parte do gráfico usada para determinar o ponto de retorno da partícula.

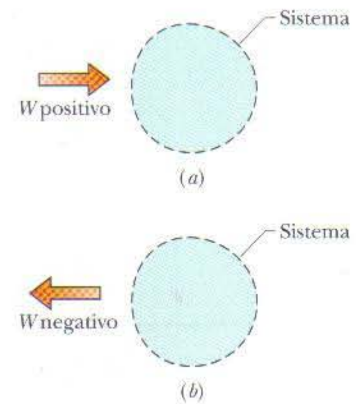


FIG. 8-11 (*a*) O trabalho positivo *W* realizado sobre um sistema corresponde a uma transferência de energia para o sistema. (*b*) O trabalho negativo corresponde a uma transferência de energia para fora do sistema.

8-7 | Trabalho Realizado por uma Força Externa sobre um Sistema

No Capítulo 7 definimos o trabalho como a energia transferida para um objeto ou de um objeto através de uma força que age sobre o sistema. Podemos agora estender essa definição para uma força externa que age sobre um sistema de objetos.

Trabalho é a energia transferida para um sistema ou de um sistema através de uma força externa que age sobre o sistema.

A Fig. 8-11*a* mostra um trabalho positivo (uma transferência de energia *para* um sistema) e a Fig. 8-11*b* mostra um trabalho negativo (uma transferência de energia *de* um sistema). Quando mais de uma força age sobre um sistema, o *trabalho total* dessas forças é a energia transferida para o sistema ou retirada do sistema.

Essas transferências são semelhantes às transferências de dinheiro em uma conta bancária através de depósitos e saques. Se um sistema contém uma única partícula ou um único objeto que se comporta como uma partícula, como no Capítulo 7, o trabalho realizado por uma força sobre o sistema pode mudar apenas a energia cinética do sistema. Esta transferência é governada pelo teorema do trabalho e energia cinética expresso pela Eq. 7-10 ($\Delta K = W$), ou seja, uma única partícula possui apenas uma conta de energia, chamada energia cinética. Forças externas podem apenas transferir energia para esta conta ou retirar energia desta conta. Se um sistema é mais complicado, porém, uma força externa pode alterar outras formas de energia (como a energia potencial), ou seja, um sistema mais complexo pode ter várias contas de energia.

Vamos formular definições de energia para esses sistemas mais complexos examinando duas situações básicas, uma que não envolve o atrito e outra que envolve o atrito.

Na Ausência de Atrito

Em uma competição de arremesso de bolas de boliche, primeiro você se agacha e coloca as mãos em concha debaixo da bola. Em seguida, você se levanta rapidamente e ao mesmo tempo levanta as mãos, lançando a bola quando as mãos atingem o nível do rosto. Durante o movimento para cima a força que você aplica à bola obviamente realiza trabalho. Ela é uma força externa que transfere energia, mas para qual sistema?

Para responder a essa pergunta vamos verificar quais são as energias que mudam. Há uma variação ΔK da energia cinética da bola e, como a bola e a Terra ficaram mais afastadas uma da outra, há também uma variação ΔU da energia potencial gravitacional do sistema bola-Terra. Para levar em conta essas duas variações é preciso considerar o sistema bola-Terra. Assim, a força que você aplica é uma força externa que realiza trabalho sobre esse sistema, e o trabalho é dado por

$$W = \Delta K + \Delta U, \tag{8-25}$$

ou

$$W = \Delta E_{mec} \quad \text{(trabalho realizado sobre um sistema sem atrito)}, \tag{8-26}$$

onde ΔE_{mec} é a variação da energia mecânica do sistema. Essas duas equações, que estão representadas na Fig. 8-12, são equivalentes no caso de um trabalho realizado por uma força externa sobre o sistema na ausência de atrito.

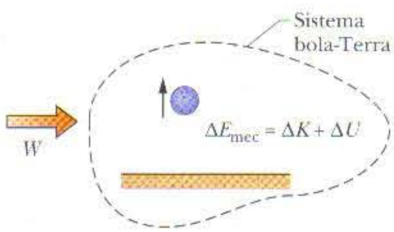


FIG. 8-12 Um trabalho positivo *W* é realizado sobre um sistema composto por uma bola de boliche e a Terra, causando uma variação ΔE_{mec} da energia mecânica do sistema, uma variação ΔK da energia cinética da bola e uma variação ΔU da energia potencial gravitacional do sistema.

Na Presença de Atrito

Vamos agora considerar o exemplo da Fig. 8-13*a*. Uma força horizontal constante $\vec{F}$ puxa um bloco ao longo de um eixo *x*, deslocando-o de uma distância *d* e aumentando a velocidade do bloco de $\vec{v}_0$ para $\vec{v}$. Durante o movimento o piso exerce uma força de atrito cinético constante $\vec{f}_k$ sobre o bloco. Inicialmente, vamos escolher o bloco como nosso sistema e aplicar a ele a segunda lei de Newton. Podemos escrever essa lei para as componentes ao longo do eixo x ($F_{res,x} = ma_x$) na forma

$$F - f_k = ma. \qquad (8\text{-}27)$$

Como as forças são constantes, a aceleração $\vec{a}$ também é constante. Assim, podemos usar a Eq. 2-16 para escrever

$$v^2 = v_0^2 + 2ad.$$

Explicitando a nesta equação, substituindo o resultado na Eq. 8-27 e reagrupando os termos, obtemos

$$Fd = \tfrac{1}{2}mv^2 - \tfrac{1}{2}mv_0^2 + f_k d \qquad (8\text{-}28)$$

ou, como $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \Delta K$ para o bloco,

$$Fd = \Delta K + f_k d. \qquad (8\text{-}29)$$

Em uma situação mais geral (na qual, por exemplo, o bloco esteja subindo uma rampa) pode haver uma variação da energia potencial. Para levar em conta essa possível variação generalizamos a Eq. 8-39, escrevendo

$$Fd = \Delta E_{mec} + f_k d. \qquad (8\text{-}30)$$

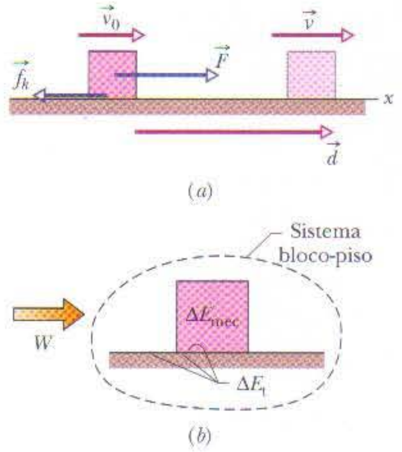


FIG. 8-13 (*a*) Um bloco é puxado por uma força $\vec{F}$ enquanto uma força de atrito cinético $\vec{f}_k$ se opõe ao movimento. O bloco tem uma velocidade $\vec{v}_0$ no início do deslocamento e uma velocidade $\vec{v}$ no final do deslocamento. (*b*) Um trabalho positivo W é realizado pela força $\vec{F}$ sobre o sistema bloco-piso, produzindo uma variação ΔE_{mec} da energia mecânica do bloco e uma variação ΔE_t da energia térmica do bloco e do piso.

Observamos experimentalmente que o bloco e a parte do piso ao longo da qual o bloco se desloca ficam mais quentes quando o bloco está se movendo. Como vamos ver no Capítulo 18, a temperatura de um objeto está relacionada à sua energia térmica E_t (energia associada ao movimento aleatório dos átomos e moléculas do objeto). Neste caso, a energia térmica do bloco e do piso aumenta porque (1) existe atrito entre eles e (2) há movimento. Lembre-se de que o atrito é causado pelas soldas a frio entre as duas superfícies. Quando o bloco desliza sobre o piso as soldas são repetidamente rompidas e refeitas, o que aquece o bloco e o piso. Assim, o deslizamento aumenta a energia térmica E_t do bloco e do piso.

Experimentalmente, observa-se que o aumento ΔE_t da energia térmica é igual ao produto do módulo da força de atrito cinético, f_k, por d, o módulo do deslocamento:

$$\Delta E_t = f_k d \qquad \text{(aumento da energia térmica causado pelo atrito).} \qquad (8\text{-}31)$$

Assim, podemos reescrever a Eq. 8-30 na forma

$$Fd = \Delta E_{mec} + \Delta E_t. \qquad (8\text{-}32)$$

Fd é o trabalho W realizado pela força externa $\vec{F}$ (a energia transferida pela força), mas sobre que sistema o trabalho é realizado (onde são feitas as transferências de energia)? Para responder a esta pergunta, verificamos quais são as energias que variam. A energia mecânica do bloco varia e as energias térmicas do bloco e do piso também variam. Assim, o trabalho realizado pela força $\vec{F}$ é realizado sobre o sistema bloco-piso. Esse trabalho é dado por

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t \qquad \text{(trabalho realizado em um sistema com atrito).} \qquad (8\text{-}33)$$

Esta equação, que está representada na Fig. 8-13*b*, é a definição do trabalho realizado por uma força externa sobre um sistema no qual existe atrito.

TESTE 5 Em três tentativas, um bloco é empurrado por uma força horizontal em um piso com atrito, como na Fig. 8-13*a*. Os módulos F da força aplicada e os efeitos da força sobre a velocidade do bloco são mostrados na tabela. Nas três tentativas o bloco percorre a mesma distância d. Ordene as três tentativas de acordo com a variação da energia térmica do bloco e do piso, em ordem decrescente.

Tentativa	F	Velocidade do Bloco
a	5,0 N	diminui
b	7,0 N	permanece constante
c	8,0 N	aumenta

Exemplo 8-5

Os habitantes pré-históricos da ilha da Páscoa esculpiram centenas de gigantescas estátuas de pedra em uma pedreira e depois as espalharam por toda a ilha (Fig. 8-14). A forma como transportaram essas estátuas por até 10 km sem usar máquinas sofisticadas até hoje é motivo para acaloradas discussões. Provavelmente colocaram as estátuas, uma a uma, em uma espécie de trenó de madeira e puxaram o trenó por uma "pista" formada por toras de madeira quase do mesmo tamanho, que funcionavam como roletes. Em uma reconstituição moderna dessa técnica, 25 homens conseguiram transportar uma estátua de 9000 kg, semelhante às da ilha da Páscoa, a uma distância de 45 m, em terreno plano, em 2 min.

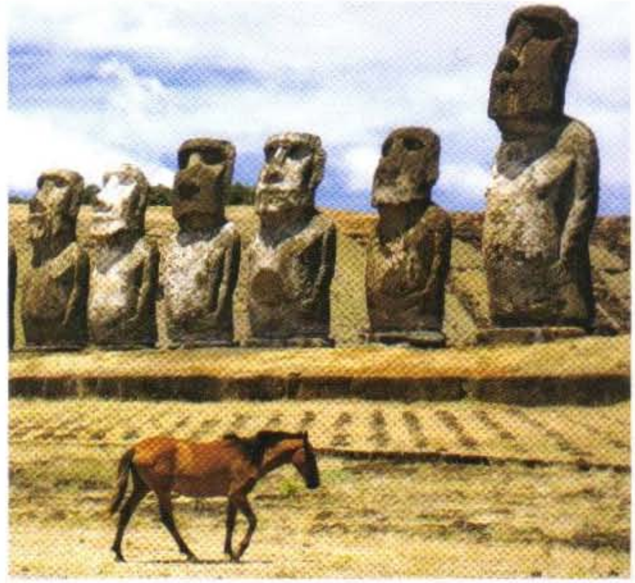


FIG. 8-14 Estátuas de pedra da ilha da Páscoa. *(©LMR Group/Alamy Images)*

(a) Estime o trabalho realizado pela força total $\vec{F}$ exercida pelos 25 homens durante o transporte da estátua e determine o sistema sobre o qual a força realizou o trabalho.

IDÉIAS-CHAVE (1) Podemos calcular o trabalho realizado usando a Eq. 7-7 ($W = Fd \cos \phi$). (2) Para determinar qual é o sistema sobre o qual a força realizou o trabalho, vamos verificar quais foram as energias que mudaram.

Cálculos: Na Eq. 7-7, d é a distância percorrida, 45 m, F é o módulo da força exercida pelos 25 homens sobre a estátua e $\phi = 0°$. Vamos supor que cada homem puxou a estátua com uma força cujo módulo era igual ao dobro do seu peso, que consideraremos como tendo o mesmo valor mg para todos os homens. Assim, o módulo da força resultante era $F = (25)(2mg) = 50mg$. Estimando a massa de um homem em 80 kg, podemos escrever a Eq. 7-7 como

$$\begin{aligned} W &= Fd\cos\phi = 50mgd\cos\phi \\ &= (50)(80\text{ kg})(9{,}8\text{ m/s}^2)(45\text{ m})\cos 0° \\ &= 1{,}8\times 10^6\text{ J} \approx 2\text{ MJ}. \qquad \text{(Resposta)} \end{aligned}$$

Como a estátua se moveu, houve certamente uma mudança ΔK da energia cinética durante o movimento. Podemos supor que houve um atrito cinético considerável entre o trenó, os troncos e o solo, o que resultou em uma variação ΔE_t da energia térmica desses objetos. Assim, o sistema sobre o qual o trabalho foi realizado era formado pela estátua, o trenó, os troncos e o solo.

(b) Qual foi o aumento ΔE_t da energia térmica do sistema durante o deslocamento de 45 m?

IDÉIA-CHAVE Podemos relacionar ΔE_t ao trabalho W realizado por $\vec{F}$ através da Eq. 8-33 para um sistema no qual existe atrito:

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t.$$

Cálculos: O valor de W foi determinado no item (a). A variação ΔE_{mec} da energia mecânica da estátua foi nula, pois a estátua estava em repouso no início e no fim do deslocamento e não mudou de altura. Assim, temos:

$$\Delta E_t = W = 1{,}8\times 10^6\text{ J} \approx 2\text{ MJ}. \qquad \text{(Resposta)}$$

(c) Estime o trabalho que teria sido realizado pelos 25 homens se eles tivessem transportado a estátua por 10 km sobre um terreno plano na ilha da Páscoa. Estime também a variação total ΔE_t que teria ocorrido no sistema estátua-trenó-troncos-solo.

Cálculo: Calculamos W como em (a), mas com $d = 1\times 10^4$ m. Além disso, podemos igualar ΔE_t a W. O resultado é o seguinte:

$$W = \Delta E_t = 3{,}9\times 10^8\text{ J} \approx 400\text{ MJ}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Isso mostra que a quantidade de energia transferida pelos homens durante o movimento da estátua teria sido enorme. Mesmo assim, os 25 homens *poderiam* ter transportado a estátua por 10 km sem recorrer a nenhuma fonte misteriosa de energia.

Exemplo 8-6

Um operário empurra um engradado 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 engradado 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 esse trabalho foi realizado?

IDÉIA-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:

$$W = Fd\cos\phi = (40\ \text{N})(0{,}50\ \text{m})\cos 0^\circ$$
$$= 20\ \text{J}. \qquad \text{(Resposta)}$$

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

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

IDÉIA-CHAVE Podemos relacionar ΔE_t ao trabalho W realizado pela força $\vec{F}$ à 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 engradado 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

Já discutimos várias situações nas quais a energia era transferida para ou de objetos e sistemas, da mesma forma como o dinheiro é transferido entre contas bancárias. Em cada uma dessas situações supusemos que a energia envolvida podia ser contabilizada, ou seja, que a energia não podia aparecer ou desaparecer magicamente. Em linguagem mais formal, supusemos (corretamente) que a energia obedece a uma lei conhecida como **lei de conservação da energia**, que se refere à **energia total** E de um sistema. Esse total é a soma da energia mecânica com a energia térmica e com qualquer outro tipo de *energia interna* do sistema, além da energia térmica. (Ainda não discutimos outros tipos de energia interna.) De acordo com a lei,

> A energia total E de um sistema pode mudar apenas através da transferência de energia para o sistema ou do sistema.

O único tipo de transferência de energia que consideramos até agora foi o trabalho W realizado sobre um sistema. Assim, para nós, nesse ponto, essa lei estabelece que

$$W = \Delta E = \Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int}, \qquad (8\text{-}35)$$

onde ΔE_{mec} é uma variação da energia mecânica do sistema, ΔE_t é uma variação da energia térmica do sistema e ΔE_{int} é uma variação de qualquer outro tipo de energia interna do sistema. Em ΔE_{mec} estão incluídas as variações ΔK da energia cinética e as variações ΔU da energia potencial (elástica, gravitacional ou qualquer outra forma que exista).

Esta lei de conservação da energia *não* é algo que deduzimos a partir de princípios básicos da física, mas se baseia em resultados experimentais. Os cientistas e engenheiros nunca encontraram uma exceção.

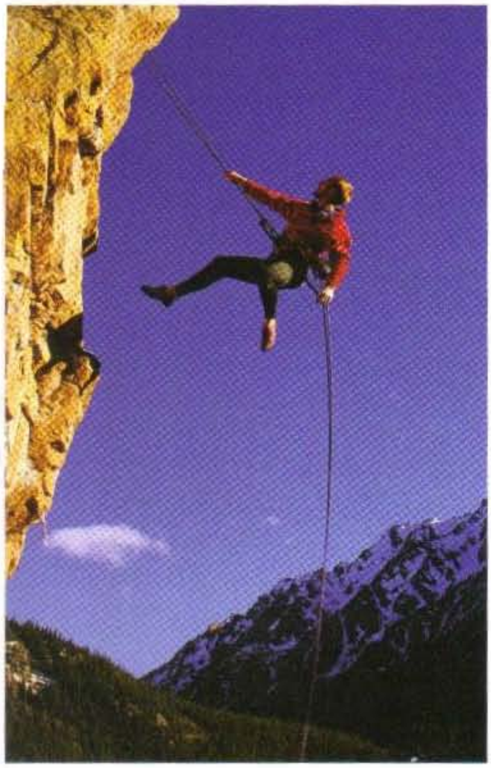


FIG. 8-15 Para descer, o alpinista precisa transferir energia da energia potencial gravitacional de um sistema formado por ele, seu equipamento e a Terra. Ele enrolou a corda em anéis de metal, para que haja atrito entre a corda e os anéis. Isso permite que a maior parte da energia potencial gravitacional seja transferida para a energia térmica da corda e dos anéis, e não para a energia cinética do alpinista. *(Tyler Stableford/The Image Bank/Getty Images)*

Sistema Isolado

Um sistema isolado não pode trocar energia com o ambiente. Nesse caso, a lei de conservação da energia pode ser expressa da seguinte forma:

A energia total, E, de um sistema isolado não pode variar.

Muitas transferências de energia podem acontecer *dentro* de um sistema isolado, como, por exemplo, entre energia cinética e alguma forma de energia potencial ou entre energia cinética e energia térmica. Entretanto, a energia total do sistema não pode variar.

Para dar um exemplo, considere a alpinista da Fig. 8-15, seu equipamento e a Terra como um sistema isolado. Enquanto ela desce a encosta de uma montanha, fazendo variar a configuração do sistema, ela precisa controlar a transferência de energia potencial do sistema. (Essa energia não pode simplesmente desaparecer.) Parte dessa energia é convertida em energia cinética. Entretanto, a alpinista não quer transferir muita energia para essa forma, pois nesse caso passaria a se mover muito depressa. Por essa razão, ela passa a corda por argolas de metal de modo a produzir atrito entre a corda e as argolas durante a descida. A passagem da corda pelas argolas transfere energia potencial gravitacional do sistema para energia térmica das argolas e da corda de uma forma controlável. A energia total do sistema montanhista-equipamento-Terra (a soma das energias potencial gravitacional, cinética e térmica) não varia durante a descida.

No caso de um sistema isolado, a lei de conservação da energia pode ser escrita de duas formas. Primeiro, fazendo $W = 0$ na Eq. 8-35, obtemos

$$\Delta E_{\text{mec}} + \Delta E_{\text{t}} + \Delta E_{\text{int}} = 0 \quad \text{(sistema isolado).} \tag{8-36}$$

Podemos também fazer $\Delta E_{\text{mec}} = E_{\text{mec},2} - E_{\text{mec},1}$, onde os índices 1 e 2 se referem a dois instantes diferentes, antes e depois da ocorrência de um certo processo, digamos. Nesse caso, a Eq. 8-36 se torna

$$E_{\text{mec},2} = E_{\text{mec},1} - \Delta E_{\text{t}} - \Delta E_{\text{int}}. \tag{8-37}$$

De acordo com a Eq. 8-37,

Em um sistema isolado, podemos relacionar a energia total em um dado instante à energia total em outro instante *sem considerar as energias em instantes intermediários.*

Este fato pode ser uma ferramenta bastante poderosa para a solução de problemas que envolvem sistemas isolados quando precisamos relacionar as energias de um sistema antes e depois da ocorrência de um certo processo.

Na Seção 8-5 discutimos uma situação especial de sistemas isolados, aquela na qual forças dissipativas (como a força de atrito cinético) não atuavam no sistema. Nesse caso especial, ΔE_{t} e ΔE_{int} são nulas e a Eq. 8-37 se reduz à Eq. 8-18. Em outras palavras, a energia mecânica de um sistema isolado é conservada quando não existem forças dissipativas atuando no sistema.

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 sobre o objeto, ou seja, sem transferir energia para o objeto. Em vez disso, a força se limita a transferir energia de uma forma para outra no interior do objeto.

A Fig. 8-16 mostra um exemplo. Uma patinadora, inicialmente em repouso, empurra um corrimão e passa a deslizar sobre o gelo (Fig. 8-16a e b). A energia cinética da patinadora aumenta porque o corrimão exerce uma força externa $\vec{F}$ sobre ela.

Entretanto, a força não transfere energia do corrimão para ela e, portanto, não realiza trabalho sobre ela; o aumento da energia cinética se deve a transferências internas a partir da energia bioquímica dos músculos da moça.

A Fig. 8-17 mostra outro exemplo. Um motor de combustão interna aumenta a velocidade de um carro que possui tração nas quatro rodas (as quatro rodas são acionadas pelo motor). Durante a aceleração o motor faz os pneus empurrarem o pavimento para trás. Esse empurrão dá origem a uma força de atrito $\vec{f}$ que empurra os pneus para a frente. A força externa resultante $\vec{F}$ exercida pelo pavimento, que é a soma dessas forças de atrito, acelera o carro, aumentando sua energia cinética. Entretanto, $\vec{F}$ não transfere energia do pavimento para o carro e, portanto, não realiza trabalho; o aumento da energia cinética do carro se deve à transferência de energia interna armazenada no combustível.

Em situações semelhantes a essas duas às vezes podemos relacionar a força externa $\vec{F}$ que age sobre um objeto à variação da energia mecânica do objeto se conseguirmos simplificar a situação. Considere o exemplo da patinadora no gelo. Enquanto ela empurra o corrimão e percorre a distância d da Fig. 8-16*c*, podemos simplificar a situação supondo que a aceleração é constante, com a velocidade variando de $v_0 = 0$ para v. (Isso equivale a supor que o módulo e a orientação de $\vec{F}$ são constantes.) Após o empurrão podemos simplificar a situação considerando a patinadora como uma partícula e desprezando o fato de que o esforço muscular aumentou a energia térmica do corpo da patinadora, além de alterar outros parâmetros fisiológicos. Sendo assim, podemos aplicar a Eq. 7-5 ($\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = F_x d$) e escrever

$$K - K_0 = (F\cos\phi)d,$$

ou

$$\Delta K = Fd\cos\phi. \tag{8-38}$$

Se a situação também envolve uma mudança na altura do objeto, podemos levar em conta a variação ΔU da energia potencial gravitacional escrevendo

$$\Delta U + \Delta K = Fd\cos\phi. \tag{8-39}$$

A força do lado direito dessa equação não realiza trabalho sobre o objeto, mas é responsável pelas variações de energia que aparecem do lado esquerdo da equação.

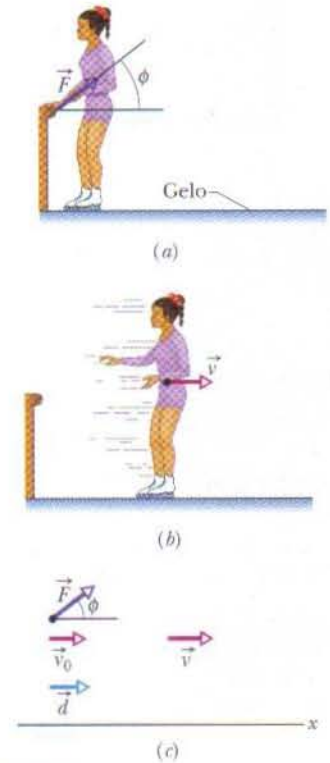


FIG. 8-16 (*a*) Quando uma patinadora empurra um corrimão, o corrimão exerce uma força $\vec{F}$ sobre ela. (*b*) Depois que a patinadora larga o corrimão ela possui uma velocidade $\vec{v}$. (*c*) A força externa $\vec{F}$ age sobre a patinadora, formando um ângulo ϕ com o eixo horizontal x. Quando a patinadora sofre um deslocamento $\vec{d}$, sua velocidade muda de $\vec{v}_0$ (= 0) para $\vec{v}$ por causa da componente horizontal de $\vec{F}$.

Potência

Agora que sabemos que uma força pode transferir energia de uma forma para outra sem realizar trabalho, podemos ampliar a definição de potência apresentada no capítulo anterior. Na Seção 7-9 a potência foi definida como a taxa com a qual uma força realiza trabalho. Em um sentido mais geral, a potência P é a taxa com a qual uma força transfere energia de uma forma para outra. Se uma certa quantidade de energia ΔE é transferida durante um intervalo de tempo Δt, a **potência média** desenvolvida pela força é dada por

$$P_{\text{méd}} = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \tag{8-40}$$

Analogamente, a **potência instantânea** desenvolvida pela força é dada por

$$P = \frac{dE}{dt}. \tag{8-41}$$

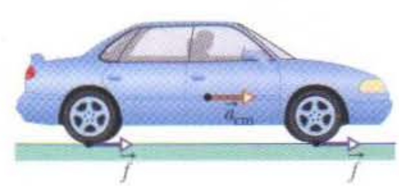


FIG. 8-17 Um veículo acelera para a direita usando tração nas quatro rodas. O pavimento exerce quatro forças de atrito (duas das quais aparecem na figura) sobre a superfície inferior dos pneus. A soma dessas quatro forças é a força externa resultante $\vec{F}$ que age sobre o carro.

Exemplo 8-7

Na Fig. 8-18 um pacote com 2,0 kg de pamonha, depois de deslizar ao longo de 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

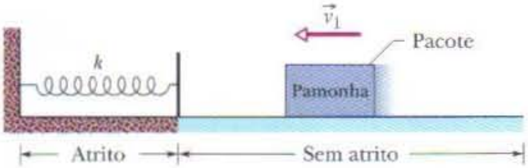


FIG. 8-18 Um pacote desliza sobre um piso sem atrito com velocidade $\vec{v}_1$ em direção a uma mola de constante elástica k. Quando o pacote entra em contato com a mola uma força de atrito do piso passa a atuar sobre ele.

do comprimento da mola entre o instante em que começa a ser comprimida e o instante em que o pacote pára?

IDÉIAS-CHAVE Precisamos examinar todas as forças para determinar se temos um sistema isolado ou um sistema no qual uma força externa está realizando trabalho.

Forças: A força normal exercida pelo piso sobre o pacote não realiza trabalho, porque a direção da força é sempre perpendicular à direção de deslocamento do pacote. Pela mesma razão, a força gravitacional também não realiza trabalho sobre o pacote. Entretanto, enquanto a mola está sendo comprimida a força aplicada pela mola realiza trabalho sobre o pacote, transferindo energia para a energia potencial elástica da mola. A força da mola também empurra uma parede rígida. Como existe atrito entre o pacote e o piso, o deslizamento do pacote sobre o piso aumenta a energia térmica do pacote e do piso.

Sistema: O sistema pacote-mola-piso-parede, que inclui todas estas forças e transferências de energia, é um sistema isolado. Assim, sua energia total não pode variar. Podemos, portanto, aplicar ao sistema a lei de conservação da energia na forma da Eq. 8-37:

$$E_{\text{mec},2} = E_{\text{mec},1} - \Delta E_t. \qquad (8\text{-}42)$$

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 ($K = \frac{1}{2}mv^2$) e a energia potencial da mola ($U = \frac{1}{2}kx^2$). No caso do estado 1, $U = 0$ (pois a mola não está comprimida) e a velocidade do pacote é v_1. Assim, temos:

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

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

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

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:

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

Exemplo 8-8

A Fig. 8-19*a* mostra uma encosta e um vale ao longo dos quais acontece uma avalanche de pedras. As pedras têm uma massa total m, caem de uma altura $y = H$, percorrem uma distância d_1 em uma encosta de ângulo $\theta = 45°$ e percorrem uma distância d_2 em um vale plano. Determine a razão d_2/H entre a distância percorrida no vale e a altura da queda se o coeficiente de atrito cinético é 0,60 (um valor razoável).

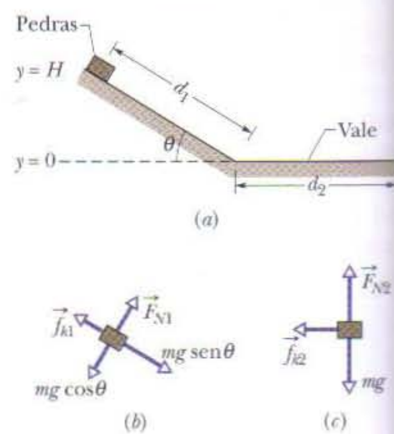


FIG. 8-19 (*a*) Trajetória de uma avalanche de pedra na encosta de uma montanha e em um vale vizinho. Forças que agem sobre uma pedra (*b*) na encosta da montanha e (*c*) no vale.

IDÉIAS-CHAVE (1) A energia mecânica E_{mec} do sistema pedras-Terra é a soma da energia cinética ($K = \frac{1}{2}mv^2$) e da energia potencial gravitacional ($U = mgy$). (2) A energia mecânica não é conservada durante a avalanche porque uma força de atrito (dissipativa) age sobre as pedras, transferindo uma certa quantidade de energia ΔE_t para a energia térmica das pedras e do solo. (3) A energia transferida ΔE_t está relacionada ao módulo da força de atrito cinético e à distância percorrida pelas pedras através da Eq. 8-31 ($\Delta E_t = f_k d$). (4) A energia mecânica $E_{\text{mec},2}$ em qualquer ponto durante a avalanche está relacionada à energia mecânica inicial $E_{\text{mec},1}$ e à energia transferida ΔE_t através da Eq. 8-37, que pode ser escrita na forma $E_{\text{mec},2} = E_{\text{mec},1} - \Delta E_t$.

Cálculos: A energia mecânica final $E_{\text{mec},2}$ é igual à energia mecânica inicial $E_{\text{mec},1}$ menos a energia convertida em energia térmica, ΔE_t:

$$E_{mec,2} = E_{mec,1} - \Delta E_t. \tag{8-43}$$

Inicialmente as pedras possuem uma energia potencial $U = mgH$ e uma energia cinética $K = 0$; assim, a energia mecânica inicial é $E_{mec,1} = mgH$. Quando a avalanche termina (ou seja, quando as pedras param), as pedras possuem energia potencial $U = 0$ e energia cinética $K = 0$, de modo que $E_{mec,2} = 0$. A energia convertida em energia térmica é $\Delta E_{t,1} = f_{k1}d_1$ enquanto as pedras estão descendo a encosta e $\Delta E_{t,2} = f_{k2}d_2$ depois que as pedras chegam ao vale. Substituindo essas expressões na Eq. 8-43, obtemos

$$0 = mgH - f_{k1}d_1 - F_{k2}d_2. \tag{8-44}$$

De acordo com a Fig. 8-19*a*, $d_1 = H/(\text{sen}\ \theta)$. Para obter expressões para as forças de atrito cinético, usamos a Eq. 6-2 ($f_k = \mu_k F_N$). Como vimos no Capítulo 6, em um plano inclinado a força normal se opõe à componente $mg\cos\theta$ da força gravitacional (Fig. 8-19*b*). Por outro lado, como vimos no Capítulo 5, em uma superfície horizontal a força normal se opõe ao módulo completo mg da força gravitacional (Fig. 8-19*c*). Substituindo essas expressões na Eq. 8-44 e explicitando a razão d_2/H, temos:

$$0 = mgH - \mu_k(mg\cos\theta)\frac{H}{\text{sen}\,\theta} - \mu_k mgd_2$$

e

$$\frac{d_2}{H} = \left(\frac{1}{\mu_k} - \frac{1}{\tan\theta}\right). \tag{8-45}$$

Fazendo $\mu_k = 0{,}60$ e $\theta = 45°$, obtemos

$$\frac{d_2}{H} = 0{,}67. \qquad \text{(Resposta)}$$

Comentários: Este resultado é típico para uma pequena avalanche. No caso de uma grande avalanche, porém, a razão d_2/H pode chegar a 20. Substituindo esta razão na Eq. 8-45 e explicitando o coeficiente de atrito cinético, obtemos $\mu_k = 0{,}05$. Os cientistas não compreendem por que uma grande avalanche de pedras irregulares pode ter um valor de μ_k comparável ao do gelo. Uma das hipóteses mais promissoras é a de que as pedras são continuamente levitadas por uma fina camada de pequenos detritos oscilantes e quase nunca entram em contato com a encosta da montanha ou o solo do vale até a avalanche parar.

Exemplo 8-9

Na Fig. 8-20*a* um bloco de 20 kg está prestes a colidir com uma mola no estado relaxado. Quando o bloco comprime a mola uma força de atrito cinético entre o bloco e o piso age sobre o bloco. A Fig. 8-20*b* mostra a energia cinética do bloco, $K(x)$, e a energia potencial da mola, $U(x)$, em função da posição x do bloco, enquanto a mola é comprimida. Qual é o coeficiente de atrito cinético, μ_k, entre o bloco e o piso?

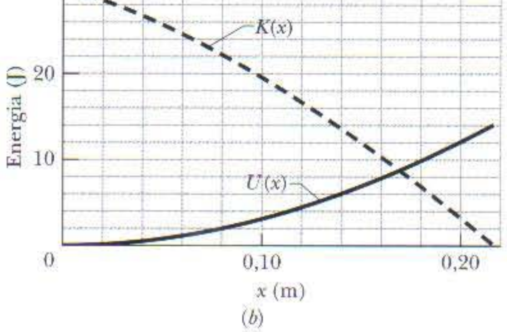


FIG. 8-20 (*a*) Bloco prestes a colidir com uma mola. (*b*) Variação da energia cinética K e da energia potencial U quando a mola é comprimida e o bloco é freado até parar.

IDÉIAS-CHAVE (1) A energia mecânica E_{mec} ($= K + U$) não é conservada durante a compressão porque a força de atrito, uma força dissipativa, age sobre o bloco, convertendo uma quantidade de energia ΔE_t em energia térmica do bloco e do piso. (2) A energia ΔE_t está relacionada ao módulo da força de atrito cinético e à distância percorrida pelo bloco através da Eq. 8-31 ($\Delta E_t = f_k d$). (3) A energia mecânica $E_{mec,2}$ em qualquer ponto durante a compressão está relacionada à energia mecânica inicial $E_{mec,1}$ e a E_t através da Eq. 8-37, que pode ser escrita na forma $E_{mec,2} = E_{mec,1} - \Delta E_t$.

Determinação de ΔE_t: De acordo com a Fig. 8-20*b*, quando o bloco está em $x = 0$, prestes a comprimir a mola, sua energia cinética é $K = 30$ J e a energia potencial da mola é $U = 0$. Assim, a soma de K e U é

$$E_{mec,1} = 30\ \text{J}.$$

A mola atinge a máxima compressão quando o bloco pára, ou seja, quando a energia cinética se anula. De acordo com a figura, isso acontece para $x \approx 0{,}215$ m, posição na qual $K = 0$ e $U = 14$ J. Assim, no ponto de parada a soma de K e U é

$$E_{mec,2} = 14\ \text{J}.$$

Para determinar a quantidade de energia convertida em energia térmica escrevemos $E_{mec,2} = E_{mec,1} - \Delta E_t$ como

$$14\ \text{J} = 30\ \text{J} - \Delta E_t$$

ou

$$\Delta E_t = 16\ \text{J}.$$

Determinação de μ_k: De acordo com a Eq. 6-2, a força de atrito cinético é dada por $f_k = \mu_k F_N$, onde a força normal é dada pela Eq. 5-14 ($F_N = mg$). Em nosso caso, a força de atrito f_k converte 16 J em energia térmica em uma distância d = 0,215 m, de acordo com a equação $\Delta E_t = f_k d$. Combinando várias expressões, obtemos

$$\Delta E_t = f_k d = \mu_k F_N d = \mu_k mgd$$

e substituímos os valores conhecidos ΔE_t = 16 J, m = 20 kg, g = 9,8 m/s e d = 0,215 para obter

$$\mu_k = 0{,}38. \qquad \text{(Resposta)}$$

REVISÃO E RESUMO

Forças Conservativas Uma força é **conservativa** se o trabalho que realiza sobre uma partícula se anula ao longo de um percurso fechado. Podemos dizer também que uma força é conservativa se o trabalho que realiza sobre uma partícula que se move entre dois pontos não depende da trajetória seguida pela partícula. A força gravitacional e a força elástica são forças conservativas; a força de atrito cinético é uma **força dissipativa** (não-conservativa).

Energia Potencial **Energia potencial** é a energia associada à configuração de um sistema submetido à ação de uma força conservativa. Quando a força conservativa realiza um trabalho W sobre uma partícula do sistema, a variação ΔU da energia potencial do sistema é dada por

$$\Delta U = -W. \qquad (8\text{-}1)$$

Se a partícula se desloca do ponto x_i para o ponto x_f, a variação de energia potencial do sistema é

$$\Delta U = -\int_{x_i}^{x_f} F(x)\, dx. \qquad (8\text{-}6)$$

Energia Potencial Gravitacional A energia potencial associada a um sistema constituído pela Terra e uma partícula próxima é chamada de **energia potencial gravitacional**. Se uma partícula se desloca de uma altura y_i para uma altura y_f, a variação da energia potencial gravitacional do sistema partícula-Terra é dada por

$$\Delta U = mg(y_f - y_i) = mg\,\Delta y. \qquad (8\text{-}7)$$

Se o **ponto de referência** de uma partícula é tomado como sendo $y_i = 0$ e a energia potencial gravitacional correspondente do sistema é tomada como sendo $U_i = 0$, a energia potencial gravitacional U de uma partícula a uma altura y é dada por

$$U(y) = mgy. \qquad (8\text{-}9)$$

Energia Potencial Elástica **Energia potencial elástica** é a energia associada ao estado de compressão ou distensão de um objeto elástico. No caso de uma mola que exerce uma força elástica $F = -kx$ quando sua extremidade livre sofre um deslocamento x, a energia potencial elástica é dada por

$$U(x) = \tfrac{1}{2}kx^2. \qquad (8\text{-}11)$$

Na **configuração de referência**, quando a mola está no estado relaxado $x = 0$ e $U = 0$.

Energia Mecânica A **energia mecânica** E_{mec} de um sistema é a soma da energia cinética K e da energia potencial U do sistema:

$$E_{mec} = K + U. \qquad (8\text{-}12)$$

Sistema isolado é um sistema no qual nenhuma *força externa* produz variações de energia. Se apenas forças conservativas realizam trabalho em um sistema isolado, a energia mecânica E_{mec} do sistema não pode variar. Este **princípio de conservação da energia mecânica** pode ser escrito na forma

$$K_2 + U_2 = K_1 + U_1, \qquad (8\text{-}17)$$

onde os índices se referem a diferentes instantes de um processo de transferência de energia. Este princípio de conservação pode também ser escrito como

$$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0. \qquad (8\text{-}18)$$

Curvas de Energia Potencial Se conhecemos a função energia potencial $U(x)$ de um sistema no qual uma força unidimensional $F(x)$ age sobre uma partícula, podemos determinar a força usando a equação

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx}. \qquad (8\text{-}22)$$

Se $U(x)$ é dada na forma de um gráfico, para qualquer valor de x a força $F(x)$ é o negativo da inclinação da curva no ponto considerado e a energia cinética da partícula é dada por

$$K(x) = E_{mec} - U(x), \qquad (8\text{-}24)$$

onde E_{mec} é a energia mecânica do sistema. Um **ponto de retorno** é um ponto x no qual o movimento de uma partícula muda de sentido (nesse ponto, $K = 0$). A partícula se encontra em **equilíbrio** nos pontos onde a inclinação da curva de $U(x)$ é nula [nesses pontos, $F(x) = 0$)].

Trabalho Realizado sobre um Sistema por uma Força Externa O trabalho W é a energia transferida para um sistema ou de um sistema por uma força externa que age sobre o sistema. Quando mais de uma força externa age sobre o sistema, o *trabalho total* dessas forças é igual à energia transferida. Quando não existe atrito o trabalho realizado sobre o sistema e a variação ΔE_{mec} da energia mecânica do sistema são iguais:

$$W = \Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U. \qquad (8\text{-}26, 8\text{-}25)$$

Quando uma força de atrito cinético age dentro do sistema, a energia térmica E_t do sistema varia. (Esta energia está associada ao movimento aleatório dos átomos e moléculas do sistema.) Nesse caso, o trabalho realizado sobre o sistema é dado por

$$W = \Delta E_{mec} + \Delta E_t. \qquad (8\text{-}33)$$

A variação ΔE_t está relacionada ao módulo f_k da força de atrito e ao módulo d do deslocamento causado pela força externa através da equação

$$\Delta E_t = f_k d. \qquad (8\text{-}31)$$

Conservação da Energia A **energia total** E de um sistema (a soma da energia mecânica e das energias internas, incluindo a energia térmica) só pode variar se uma certa quantidade de energia é transferida para o sistema ou retirada do sistema. Este fato experimental é conhecido como **lei de conservação da energia**. Se um trabalho W é realizado sobre o sistema,

$$W = \Delta E = \Delta E_{\text{mec}} + \Delta E_t + \Delta E_{\text{int}}. \qquad (8\text{-}35)$$

Se o sistema é isolado ($W = 0$), isso nos dá

$$\Delta E_{\text{mec}} + \Delta E_t + \Delta E_{\text{int}} = 0 \qquad (8\text{-}36)$$

e

$$E_{\text{mec},2} = E_{\text{mec},1} - \Delta E_t - \Delta E_{\text{int}}, \qquad (8\text{-}37)$$

onde os índices 1 e 2 indicam dois instantes diferentes.

Potência A **potência** desenvolvida por uma força é a *taxa* com a qual essa força transfere energia. Se uma certa quantidade de energia ΔE é transferida por uma força em um certo intervalo de tempo Δt, a **potência média** desenvolvida pela força é dada por

$$P_{\text{méd}} = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \qquad (8\text{-}40)$$

A **potência instantânea** desenvolvida por uma força é dada por

$$P = \frac{dE}{dt}. \qquad (8\text{-}41)$$

PERGUNTAS

1 A Fig. 8-21 mostra um caminho direto e quatro caminhos indiretos do ponto i ao ponto f. Ao longo do caminho direto e de três dos caminhos indiretos apenas uma força conservativa F_c age sobre um certo objeto. Ao longo do quarto caminho indireto tanto F_c como uma força dissipativa F_d agem sobre o objeto. A variação ΔE_{mec} da energia mecânica do objeto (em joules) ao se deslocar de i para f está indicada ao lado de cada segmento dos caminhos indiretos. Qual é o valor de ΔE_{mec} (a) de i para f ao longo do caminho direto e (b) produzida por F_d ao longo do caminho em que essa força atua?

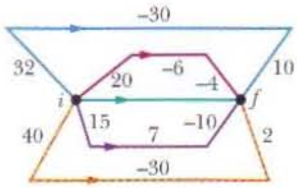


FIG. 8-21 Pergunta 1.

2 Na Fig. 8-22, um pequeno bloco, inicialmente em repouso, é liberado em uma rampa sem atrito a uma altura de 3,0 m. As alturas das elevações ao longo da rampa estão indicadas na figura. Os cumes das elevações são idênticos, de forma circular, e o bloco não perde contato com o piso em nenhuma das elevações. (a) Qual é a primeira elevação que o bloco não consegue superar? (b) O que acontece com o bloco em seguida? (c) No cume de qual elevação (c) a aceleração centrípeta do bloco é máxima e (d) a força normal sobre o bloco é mínima?

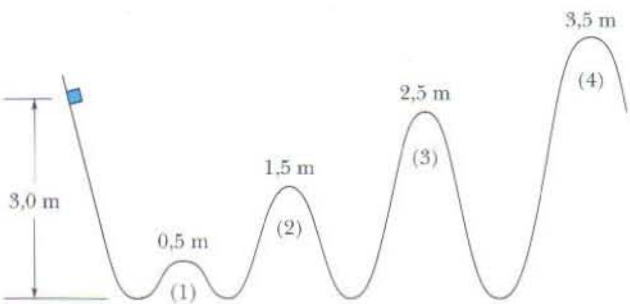


FIG. 8-22 Pergunta 2.

3 Na Fig. 8-23 um bloco que se move horizontalmente pode seguir três caminhos diferentes, que diferem apenas na altura, para chegar à linha de chegada tracejada. Ordene os caminhos de acordo (a) com a velocidade do bloco na linha de chegada e (b) o tempo de percurso do bloco até a linha de chegada, em ordem decrescente.

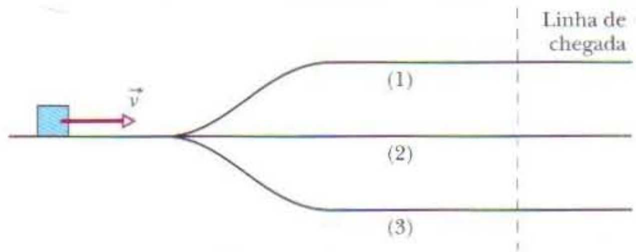


FIG. 8-23 Pergunta 3.

4 A Fig. 8-24 mostra a função energia potencial de uma partícula. (a) Ordene as regiões AB, BC, CD e DE de acordo com o módulo da força que atua sobre a partícula, em ordem decrescente. Qual é o maior valor permitido para a energia mecânica E_{mec} para que a partícula (b) fique aprisionada no poço de potencial da esquerda, (c) fique aprisionada no poço de potencial da direita e (d) seja capaz de se mover entre os dois poços, mas sem ultrapassar o ponto H? Para a situação do item (d), em qual das regiões BC, DE e FG a partícula possui (e) a maior energia cinética e (f) a menor velocidade?

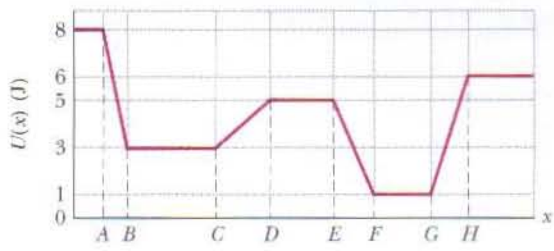


FIG. 8-24 Pergunta 4.

5 A Fig. 8-25 mostra três situações que envolvem um plano com atrito e um bloco que desliza ao longo do plano. O bloco começa com a mesma velocidade nas três situações e desliza até que a força de atrito cinético o faça parar. Ordene as situações de acordo com o aumento na energia térmica devido ao deslizamento, em ordem decrescente.

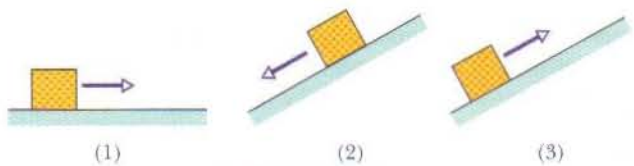


FIG. 8-25 Pergunta 5.

6 Na Fig. 8-26*a* você puxa para cima uma corda presa a um cilindro que desliza em relação a uma haste central. Como o cilindro e a haste se encaixam sem nenhuma folga, o atrito é considerável. A força que você aplica realiza um trabalho $W = +100$ J sobre o sistema cilindro-eixo-Terra (Fig. 8-26*b*). Um "inventário de energia" do sistema é mostrado na Fig. 8-26*c*: a energia cinética K aumenta de 50 J e a energia potencial gravitacional U_g aumenta de 20 J. A única outra variação da energia dentro do sistema é a da energia térmica E_t. Qual é a variação ΔE_t?

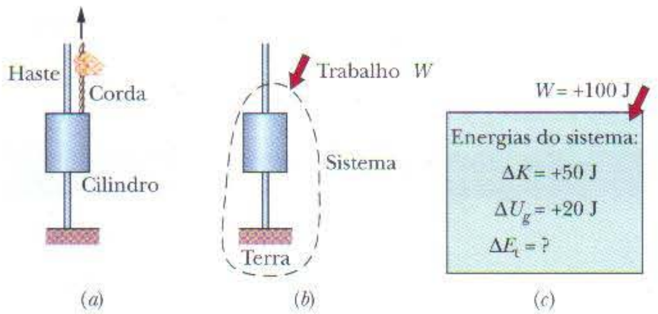


FIG. 8-26 Pergunta 6.

7 O arranjo da Fig. 8-27 é semelhante ao da pergunta 6. Agora, você puxa para baixo uma corda que está presa ao cilindro, que desliza com atrito em relação ao eixo central. Além disso, ao descer o cilindro puxa um bloco através de uma segunda corda e o faz deslizar em uma mesa de laboratório. Considere novamente o sistema cilindro-eixo-Terra, semelhante ao da Fig. 8-26*b*. O trabalho que você realiza sobre o sistema é 200 J. O sistema realiza um trabalho de 60 J sobre o bloco. Dentro do sistema, a energia cinética aumenta de 130 J e a energia potencial gravitacional diminui de 20 J. (a) Escreva um "inventário de energia" para o sistema, semelhante ao da Fig. 8-26*c*. (b) Qual é a variação da energia térmica dentro do sistema?

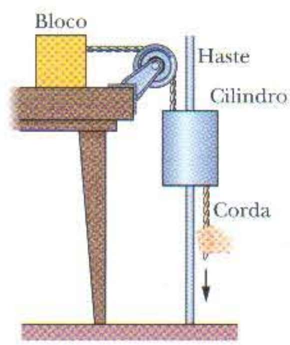


FIG. 8-27 Pergunta 7.

8 Na Fig. 8-28 um bloco desliza em uma pista que desce uma altura h. A pista não possui atrito, exceto na parte mais baixa. Nessa parte o bloco desliza até parar, devido ao atrito, depois de percorrer uma distância D. (a) Se diminuímos h, o bloco percorre uma distância maior, menor ou igual a D até parar? (b) Se, em vez disso, aumentamos a massa do bloco, a distância que o bloco percorre até parar é maior, menor ou igual a D?

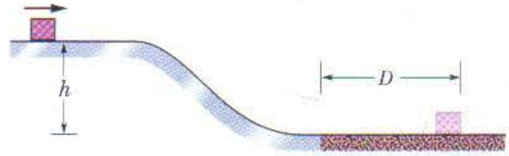


FIG. 8-28 Pergunta 8.

9 Na Fig. 8-29 um bloco desliza de A para C em uma rampa sem atrito e então passa para uma região horizontal CD, onde está sujeito a uma força de atrito. A energia cinética do bloco aumenta, diminui ou permanece constante (a) na região AB, (b) na região BC e (c) na região CD? (d) A energia mecânica do bloco aumenta, diminui ou permanece constante nessas regiões?

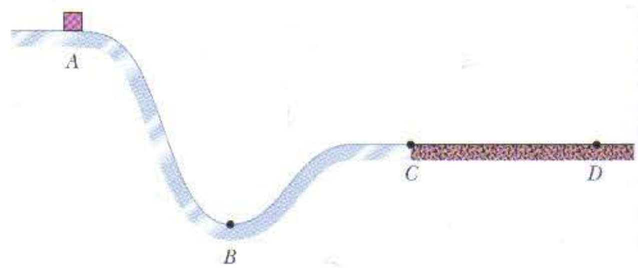


FIG. 8-29 Pergunta 9.

PROBLEMAS

• – ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 8-4 Determinação de Valores de Energia Potencial

•1 Você deixa cair um livro de 2,00 kg para uma amiga que está na calçada, a uma distância $D = 10{,}0$ m abaixo de você. Se as mãos estendidas da sua amiga estão a uma distância $d = 1{,}5$ m acima do solo (Fig. 8-30), (a) qual é o trabalho W_g realizado sobre o livro pela força gravitacional até ele cair nas mãos da sua amiga? (b) Qual é a variação ΔU da energia potencial gravitacional do sistema livro-Terra durante a queda? Se a energia potencial gravitacional U do sistema é considerada nula no nível do solo, qual é o valor de U (c) quando você deixa cair o livro e (d) quando ele chega às mãos da sua amiga? Suponha agora que o valor de U é 100 J ao nível do solo e calcule novamente (e) W_g, (f) ΔU, (g) U no ponto onde você deixou cair o livro e (h) U no ponto em que chegou às mãos da sua amiga.

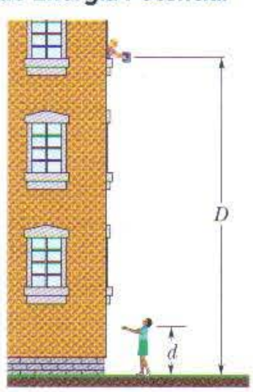


FIG. 8-30 Problemas 1 e 10.

•2 A Fig. 8-31 mostra uma bola de massa $m = 0{,}341$ kg presa à extremidade de uma haste fina de comprimento $L = 0{,}452$ m e massa desprezível. A outra extremidade da haste é articulada, de modo que a bola pode se mover em uma circunferência vertical. A haste é mantida na posição horizontal, como na figura, e depois empurrada para baixo com força suficiente para que a bola passe pelo ponto mais baixo da circunferência e continue em movimento até chegar ao ponto mais alto com velocidade nula. Qual é o trabalho realizado sobre a bola pela força gravitacional do ponto inicial até (a) o ponto mais baixo, (b) o ponto mais alto, (c) o ponto à direita na mesma

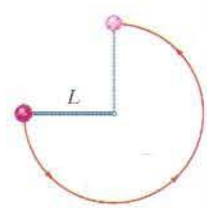


FIG. 8-31 Problemas 2 e 12.

altura que o ponto inicial? Se a energia potencial gravitacional do sistema bola-Terra é tomada como sendo zero no ponto inicial, determine o seu valor quando a bola atinge (d) o ponto mais baixo, (e) o ponto mais alto e (f) o ponto à direita na mesma altura que o ponto inicial. (g) Suponha que a haste tenha sido empurrada com mais força, de modo a passar pelo ponto mais alto com uma velocidade diferente de zero. A variação ΔU_g do ponto mais baixo ao ponto mais alto é maior, menor ou a mesma que quando a bola chegava ao ponto mais alto com velocidade zero?

•**3** Na Fig. 8-32 um floco de gelo de 2,00 g é liberado na borda de uma taça hemisférica com 22,0 cm de raio. Não há atrito no contato do floco com a taça. (a) Qual é o trabalho realizado sobre o floco pela força gravitacional durante a sua descida até o fundo da taça? (b) Qual é a variação da energia potencial do sistema floco-Terra durante a descida? (c) Se essa energia potencial é tomada como sendo nula no fundo da taça, qual é seu valor quando o floco é solto? (d) Se, em vez disso, a energia potencial é tomada como sendo nula no ponto onde o floco é solto, qual é o seu valor quando o floco atinge o fundo da taça? (e) Se a massa do floco fosse duplicada, os valores das respostas dos itens de (a) a (d) aumentariam, diminuiriam ou permaneceriam os mesmos?

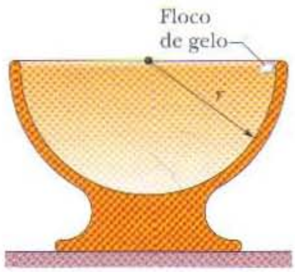


FIG. 8-32 Problemas 3 e 11.

•**4** Na Fig. 8-33 um carro de montanha-russa de massa $m = 825$ kg atinge o cume da primeira elevação com uma velocidade $v_0 = 17{,}0$ m/s a uma altura $h = 42{,}0$ m. O atrito é desprezível. Qual é o trabalho realizado sobre o carro pela força gravitacional entre este ponto e (a) o ponto A, (b) o ponto B e (c) o ponto C? Se a energia potencial gravitacional do sistema carro-Terra é tomada como sendo nula em C, qual é o seu valor quando o carro está (d) em B e (e) em A? Se a massa m é duplicada, a variação da energia potencial gravitacional do sistema entre os pontos A e B aumenta, diminui ou permanece a mesma?

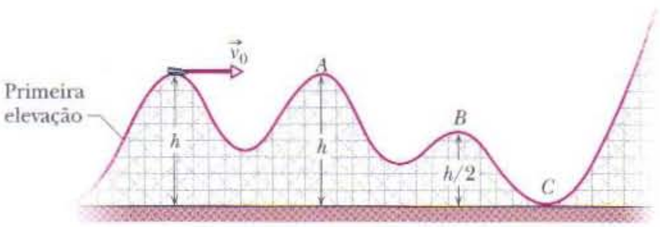


FIG. 8-33 Problemas 4 e 13.

•**5** Qual é a constante elástica de uma mola que armazena 25 J de energia potencial ao ser comprimida 7,5 cm?

•**6** Uma bola de neve de 1,5 kg é lançada de um penhasco de 12,5 m de altura. A velocidade inicial da bola de neve é 14,0 m/s, 41,0° acima da horizontal. (a) Qual é o trabalho realizado sobre a bola de neve pela força gravitacional durante o percurso até um terreno plano, abaixo do penhasco? (b) Qual é a variação da energia potencial do sistema bola-de-neve-Terra durante o percurso? (c) Se a energia potencial gravitacional é tomada como sendo nula na altura do penhasco, qual é o seu valor quando a bola de neve chega ao solo?

••**7** A Fig. 8-34 mostra uma haste fina, de comprimento $L = 2{,}00$ m e massa desprezível, que pode girar em torno de uma das extremidades para descrever uma circunferência vertical. Uma bola de massa $m = 5{,}00$ kg está presa na outra extremidade. A haste é puxada lateralmente até fazer um ângulo $\theta_0 = 30{,}0°$ com a vertical e liberada com velocidade inicial $\vec{v}_0 = 0$. Quando a bola desce até o ponto mais baixo da circunferência, (a) qual é o trabalho realizado sobre ela pela força gravitacional e (b) qual é a variação da energia potencial do sistema bola-Terra? (c) Se a energia potencial gravitacional é tomada como sendo zero no ponto mais baixo da circunferência, qual é seu valor no momento em que a bola é liberada? (d) Os valores das respostas dos itens de (a) a (c) aumentam, diminuem ou permanecem os mesmos se o ângulo θ_0 é aumentado?

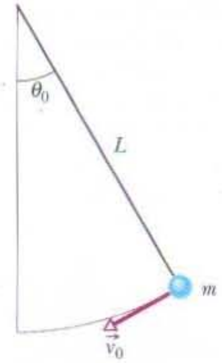


FIG. 8-34 Problemas 7, 16 e 17.

••**8** Na Fig. 8-35 um pequeno bloco de massa $m = 0{,}032$ kg pode deslizar em uma pista sem atrito que forma um *loop* de raio $R = 12$ cm. O bloco é liberado a partir do repouso no ponto P, a uma altura $h = 5{,}0R$ acima do ponto mais baixo do *loop*. Qual é o trabalho realizado sobre o bloco pela força gravitacional enquanto o bloco se desloca do ponto P para (a) o ponto Q e (b) o ponto mais alto do *loop*? Se a energia potencial gravitacional do sistema bloco-Terra for tomada como nula na base do *loop*, quanto valerá essa energia potencial quando o bloco estiver (c) no ponto P, (d) no ponto Q e (e) no topo do *loop*? (f) Se, em vez de ser simplesmente liberado, o bloco recebe uma velocidade inicial dirigida para baixo ao longo da pista, as respostas dos itens de (a) até (e) aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas?

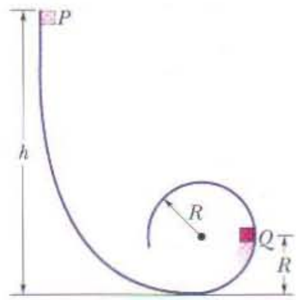


FIG. 8-35 Problemas 8 e 19.

seção 8-5 Conservação da Energia Mecânica

•**9** Na Fig. 8-36 um caminhão perdeu os freios quando estava descendo uma ladeira a 130 km/h e o motorista dirigiu o veículo para uma rampa de emergência sem atrito com uma inclinação $\theta = 15°$. A massa do caminhão é $1{,}2 \times 10^4$ kg. (a) Qual é o menor comprimento L que a rampa deve ter para que o caminhão pare (momentaneamente) antes de chegar ao final? (Suponha que o caminhão pode ser tratado como uma partícula e justifique essa suposição.) O comprimento mínimo L aumenta, diminui ou permanece o mesmo (b) se a massa do caminhão for menor e (c) se a velocidade for menor?

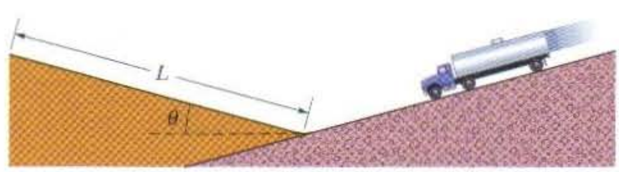


FIG. 8-36 Problema 9.

•**10** (a) No Problema 1, qual é a velocidade do livro ao chegar às mãos da sua amiga? (b) Se o livro tivesse uma massa duas vezes maior, qual seria a velocidade? (c) Se o livro fosse arremessado para baixo, a resposta do item (a) aumentaria, diminuiria ou permaneceria a mesma?

•11 (a) No Problema 3, qual é a velocidade do floco de gelo ao chegar ao fundo da taça? (b) Se o floco de gelo tivesse o dobro da massa, qual seria a velocidade? (c) Se o floco de gelo tivesse uma velocidade inicial para baixo, a resposta do item (a) aumentaria, diminuiria ou permaneceria a mesma?

•12 (a) No Problema 2, qual deve ser a velocidade inicial da bola para que ela chegue ao ponto mais alto da circunferência com velocidade escalar zero? Nesse caso, qual é a velocidade da bola (b) no ponto mais baixo e (c) no ponto à direita na mesma altura que o ponto inicial? (d) Se a massa da bola fosse duas vezes maior, as respostas dos itens (a) a (c) aumentariam, diminuiriam ou permaneceriam as mesmas?

•13 No Problema 4, qual é a velocidade do carro (a) no ponto A, (b) no ponto B e (c) no ponto C? (d) Que altura o carro alcança na última elevação, que é alta demais para ser transposta? (e) Se o carro tivesse uma massa duas vezes maior, quais seriam as respostas dos itens (a) a (d)?

•14 (a) No Problema 6, usando técnicas de energia em vez das técnicas do Capítulo 4, determine a velocidade da bola de neve ao chegar ao solo. Qual seria essa velocidade (b) se o ângulo de lançamento fosse mudado para 41,0° *abaixo* da horizontal e (c) se a massa fosse aumentada para 2,50 kg?

•15 Uma bola de gude de 5,0 g é lançada verticalmente para cima usando uma espingarda de mola. A mola deve ser comprimida de exatamente 8,0 cm para que a bola alcance um alvo colocado 20 m acima da posição da bola de gude na mola comprimida. (a) Qual é a variação ΔU_g da energia potencial gravitacional do sistema bola de gude-Terra durante a subida de 20 m? (b) Qual é a variação ΔU_s da energia potencial elástica da mola durante o lançamento da bola de gude? (c) Qual é a constante elástica da mola?

••16 (a) No Problema 7, qual é a velocidade da bola no ponto mais baixo? (b) Essa velocidade aumenta, diminui ou permanece a mesma se a massa aumenta?

••17 A Fig. 8-34 mostra um pêndulo de comprimento L = 1,25 m. O peso do pêndulo (no qual está concentrada, para efeitos práticos, toda a sua massa) tem velocidade v_0 quando a corda faz um ângulo θ_0 = 40,0° com a vertical. (a) Qual é a velocidade do peso quando está em sua posição mais baixa se v_0 = 8,00 m/s? Qual é o menor valor de v_0 para que o pêndulo oscile para baixo e depois para cima (b) até a posição horizontal e (c) até a posição vertical com a corda esticada? (d) As respostas dos itens (b) e (c) aumentam, diminuem ou permanecem as mesmas se θ_0 aumentar de alguns graus?

••18 Um bloco de 700 g é liberado a partir do repouso de uma altura h_0 acima de uma mola vertical com constante elástica k = 400 N/m e massa desprezível. O bloco se choca com a mola e pára momentaneamente depois de comprimir a mola 19,0 cm. Qual é o trabalho realizado (a) pelo bloco sobre a mola e (b) pela mola sobre o bloco? (c) Qual é o valor de h_0? (d) Se o bloco fosse solto de uma altura 2,00h_0 acima da mola, qual seria a máxima compressão da mola?

••19 No Problema 8, quais são os módulos das componentes (a) horizontal e (b) vertical da força *resultante* que atua sobre o bloco no ponto Q? (c) De que altura h o bloco deveria ser liberado, a partir do repouso, para ficar na iminência de perder contato com a superfície no alto do loop? (*Iminência de perder o contato* significa que a força normal exercida pelo loop sobre o bloco é nula nesse instante.) (d) Plote o módulo da força normal que age sobre o bloco no alto do loop em função da altura inicial h, para o intervalo de $h = 0$ a $h = 6R$.

••20 Uma única força conservativa $\vec{F} = (6{,}0x - 12)\hat{\imath}$ N, onde x está em metros, age sobre uma partícula que se move ao longo de um eixo x. A energia potencial U associada a essa força recebe o valor de 27 J em $x = 0$. (a) Escreva uma expressão para U como uma função de x, com U em joules e x em metros. (b) Qual é o máximo valor positivo da energia potencial? Para que valor (c) negativo e (d) positivo de x a energia potencial é nula?

••21 A corda da Fig. 8-37, de comprimento L = 120 cm, possui uma bola presa em uma das extremidades e está fixa na outra extremidade. A distância d da extremidade fixa a um pino no ponto P é 75,0 cm. A bola, inicialmente em repouso, é liberada com o fio na posição horizontal, como mostra a figura, e percorre a trajetória indicada pelo arco tracejado. Qual é a velocidade da bola ao atingir (a) o ponto mais baixo da trajetória e (b) o ponto mais alto depois que a corda encosta no pino?

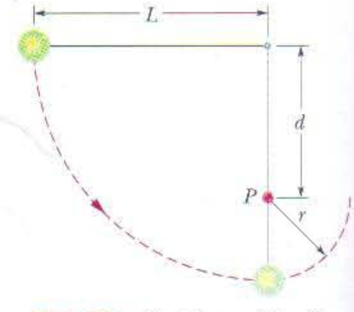


FIG. 8-37 Problemas 21 e 68.

••22 Um bloco de massa m = 2,0 kg é deixado cair de uma altura h = 40 cm sobre uma mola de constante elástica k = 1960 N/m (Fig. 8-38). Determine a variação máxima de comprimento da mola ao ser comprimida.

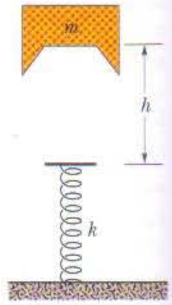


FIG. 8-38 Problema 22.

••23 Em $t = 0$ uma bola de 1,0 kg é atirada de uma torre com $\vec{v} = (18 \text{ m/s})\hat{\imath} + (24 \text{ m/s})\hat{\jmath}$. Quanto é ΔU do sistema bola-Terra entre $t = 0$ e $t = 6{,}0$ s (ainda em queda livre)?

••24 Um esquiador de 60 kg parte do repouso a uma altura H = 20 m acima da extremidade de uma rampa para saltos de esqui (Fig. 8-39), e deixa a rampa fazendo um ângulo θ = 28° com a horizontal. Despreze os efeitos da resistência do ar e suponha que a rampa não tem atrito. (a) Qual é a altura máxima h do salto em relação à extremidade da rampa? (b) Se o esquiador aumentasse o próprio peso colocando uma mochila nas costas, h seria maior, menor ou igual?

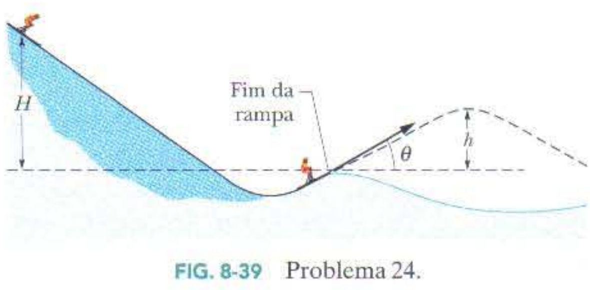


FIG. 8-39 Problema 24.

••25 Tarzan, que pesa 688 N, salta de um penhasco pendurado na extremidade de um cipó com 18 m de comprimento (Fig. 8-40). Do alto do penhasco até o ponto mais baixo de sua trajetória ele desce 3,2 m. O cipó se romperá se a força exercida sobre ele exceder 950 N. (a) O cipó se rompe? Se a resposta for negativa, qual é a maior força a que é submetido o cipó? Se a resposta for afirmativa, qual é o ângulo que o cipó está fazendo com a vertical no momento em que se rompe?

FIG. 8-40 Problema 25.

••26 Um pêndulo é formado por uma pedra de 2,0 kg oscilando na extremidade de uma corda de 4,0 m de comprimento e massa desprezível. A pedra tem uma velocidade de 8,0 m/s ao passar pelo ponto mais baixo de sua trajetória. (a) Qual é a velocidade da pedra quando a corda forma um ângulo de 60° com a vertical? (b) Qual é o maior ângulo com a vertical que a corda assume durante o movimento da pedra? (c) Se a energia potencial do sistema pêndulo-Terra é tomada como sendo nula na posição mais baixa da pedra, qual é a energia mecânica total do sistema?

••27 A Fig. 8-41 mostra uma pedra de 8,00 kg em repouso sobre uma mola. A mola é comprimida de 10,0 cm pela pedra. (a) Qual é a constante elástica da mola? (b) A pedra é empurrada mais 30 cm para baixo e liberada. Qual é a energia potencial elástica da mola comprimida antes de ser liberada? (c) Qual é a variação da energia potencial gravitacional do sistema pedra-Terra quando a pedra se desloca do ponto onde foi liberada até a altura máxima? (d) Qual é essa altura máxima, medida a partir do ponto onde a pedra foi liberada?

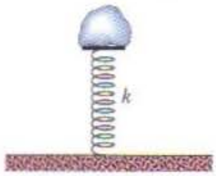


FIG. 8-41 Problema 27.

••28 Uma caixa de pão de 2,0 kg sobre um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta = 40{,}0°$ está presa, por uma corda que passa por uma polia, a uma mola de constante elástica $k = 120$ N/m, como mostra a Fig. 8-42. A caixa é liberada a partir do repouso quando a mola se encontra relaxada. Suponha que a massa e o atrito da polia sejam desprezíveis. (a) Qual é a velocidade da caixa após percorrer 10 cm? (b) Que distância o bloco percorre do ponto em que foi liberado até o ponto em que pára momentaneamente, e quais são (c) o módulo e (d) o sentido (para cima ou para baixo ao longo do plano) da aceleração do bloco no instante em que pára momentaneamente?

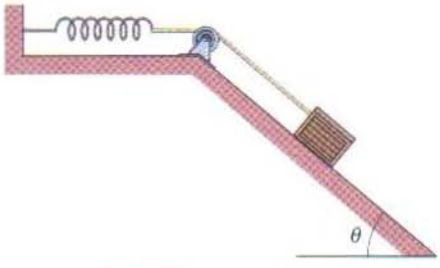


FIG. 8-42 Problema 28.

••29 Um bloco com massa m = 2,00 kg é apoiado em uma mola em um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta = 30{,}0°$ (Fig. 8-43). (O bloco não está preso à mola.) A mola, de constante elástica k = 19,6 N/cm, é comprimida de 20 cm e depois liberada. (a) Qual é a energia potencial elástica da mola comprimida? (b) Qual é a variação da energia potencial gravitacional do sistema bloco-Terra quando o bloco se move do ponto em que foi liberado até o ponto mais alto que atinge no plano inclinado? (c) Qual é a distância percorrida pelo bloco ao longo do plano inclinado até atingir esta altura máxima?

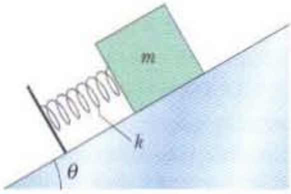


FIG. 8-43 Problema 29.

••30 A Fig. 8-44*a* se refere à mola de uma espingarda de rolha (Fig. 8-44*b*); ela mostra a força da mola em função da distensão ou compressão da mola. A mola é comprimida 5,5 cm e usada para impulsionar uma rolha de 3,8 g. (a) Qual é a velocidade da rolha se ela se separa da mola quando esta passa pela posição relaxada? (b) Suponha que, em vez disso, a rolha permaneça ligada à mola e a distenda 1,5 cm antes de ocorrer a separação. Qual é, nesse caso, a velocidade da rolha no momento da separação?

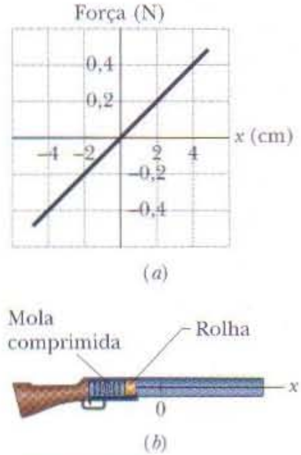


FIG. 8-44 Problema 30.

••31 Na Fig. 8-45 um bloco de massa m = 12 kg é liberado a partir do repouso em um plano inclinado de ângulo $\theta = 30°$. Abaixo do bloco há uma mola que pode ser comprimida 2,0 cm por uma força de 270 N. O bloco pára momentaneamente após comprimir a mola 5,5 cm. (a) Que distância o bloco desce ao longo do plano da posição de repouso inicial até o ponto em que pára momentaneamente? (b) Qual é a velocidade do bloco no momento em que entra em contato com a mola?

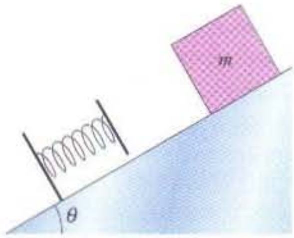


FIG. 8-45 Problemas 31 e 37.

••32 Na Fig. 8-46 uma corrente é mantida sobre uma mesa sem atrito com um quarto do comprimento pendurado fora da mesa. Se a corrente tem um comprimento L = 28 cm e massa m = 0,012 kg, qual é o trabalho necessário para puxar a parte pendurada de volta para cima da mesa?

FIG. 8-46 Problema 32.

••33 Na Fig. 8-47 uma mola com k = 170 N/m está presa no alto de um plano inclinado sem atrito de ângulo $\theta = 37{,}0°$. A extremidade inferior do plano inclinado está a uma distância D = 1,00 m da extremidade da mola, a qual se encontra relaxada. Uma lata de 2,00 kg é empurrada contra a mola até a mola ser comprimida 0,200 m e depois liberada a partir do repouso. (a) Qual é a velocidade da lata no instante que a mola retorna ao comprimento relaxado (que é o momento em que a lata perde contato com a mola)? (b) Qual é a velocidade da lata ao atingir a extremidade inferior do plano inclinado?

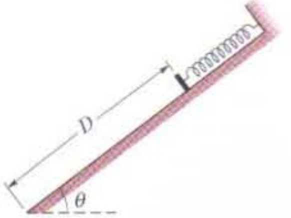


FIG. 8-47 Problema 33.

•••34 Duas crianças estão disputando um jogo no qual tentam acertar uma pequena caixa no chão com uma bola de gude lançada por um canhão de mola montado em uma mesa. A caixa está a uma distância horizontal D = 2,20 m da borda da mesa; veja a Fig. 8-48. Bia comprime a mola 1,10 cm, mas o centro da bola de gude cai 27,0 cm antes do centro da caixa. De que distância Rosa deve comprimir a mola para acertar a caixa? Suponha que o atrito da mola e da bola com o canhão é desprezível.

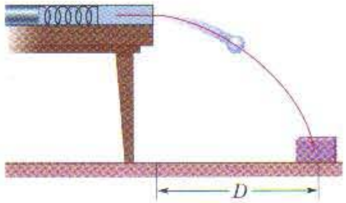


FIG. 8-48 Problema 34.

•••35 Uma corda uniforme com 25 cm de comprimento e 15 g de massa está presa horizontalmente em um teto. Mais tarde é pendurada verticalmente, com apenas uma das extremidades presa no teto. Qual é a variação da energia potencial da corda devido a esta mudança de posição? (*Sugestão:* Considere um trecho infinitesimal da corda e use uma integral.)

•••36 Um menino está inicialmente sentado no alto de um monte hemisférico de gelo de raio R = 13,8 m. Ele começa a deslizar para baixo com uma velocidade inicial desprezível (Fig. 8-49). Suponha que o atrito é desprezível. Em que altura o menino perde contato com o gelo?

FIG. 8-49 Problema 36.

•••37 Na Fig. 8-45 um bloco de massa m = 3,20 kg desliza para baixo, a partir do repouso, percorre uma distância d em um plano inclinado de ângulo θ = 30,0° e se choca com uma mola de constante elástica 431 N/m. Quando o bloco pára momentaneamente, a mola fica comprimida 21,0 cm. Quais são (a) a distância d e (b) a distância entre o ponto do primeiro contato do bloco com a mola e o ponto onde a velocidade do bloco é máxima?

seção 8-6 Interpretação de uma Curva de Energia Potencial

••38 A energia potencial de uma molécula diatômica (um sistema de dois átomos, como H_2 ou O_2) é dada por

$$U = \frac{A}{r^{12}} - \frac{B}{r^6},$$

onde r é a distância entre os átomos da molécula e A e B são constantes positivas. Esta energia potencial está associada à força de ligação entre os dois átomos. (a) Determine a *distância de equilíbrio*, ou seja, a distância entre os átomos para a qual as forças a que os átomos estão submetidos é nula. A força é repulsiva ou atrativa se a distância é (b) menor e (c) maior que a distância de equilíbrio?

••39 A Fig. 8-50 mostra um gráfico da energia potencial U em função da posição x de uma partícula de 0,90 kg que pode se deslocar apenas ao longo de um eixo x. (Forças dissipativas não estão envolvidas.) Os três valores mostrados no gráfico são U_A = 15,0 J, U_B = 35,0 J e U_C = 45,0 J. A partícula é liberada em x = 4,5 m com uma velocidade inicial de 7,0 m/s, no sentido negativo de x. (a) Se a partícula puder chegar ao ponto x = 1,0 m, qual será sua velocidade nesse ponto? Se não puder, qual será o ponto de retorno? Quais são (b) o módulo e (c) a orientação da força experimentada pela partícula quando ela começa a se mover para a esquerda do ponto x = 4,0 m? Suponha que a partícula seja liberada no mesmo ponto e com a mesma velocidade, mas o sentido da velocidade seja o sentido positivo de x. (d) Se a partícula puder chegar ao ponto x = 7,0 m, qual será sua velocidade nesse ponto? Se não puder, qual será o ponto de retorno? Quais são (e) o módulo e (f) a orientação da força experimentada pela partícula quando ela começa a se mover para a direita do ponto x = 5,0 m?

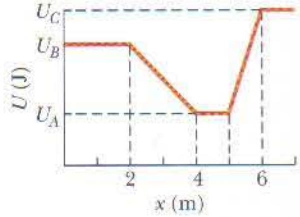


FIG. 8-50 Problema 39.

••40 A Figura 8-51 mostra um gráfico da energia potencial U em função da posição x para uma partícula de 0,200 kg que pode se deslocar apenas ao longo de um eixo x sob a influência de uma força conservativa. Três dos valores mostrados no gráfico são U_A = 9,00 J, U_C = 20,00 J e U_D = 24,00 J. A partícula é liberada no ponto onde U forma uma "barreira de potencial" de "altura" U_B = 12,00 J, com uma energia cinética de 4,00 J. Qual é a velocidade da partícula (a) em x = 3,5 m e (b) em x = 6,5 m? Qual é a posição do ponto de retorno (c) do lado direito e (d) do lado esquerdo?

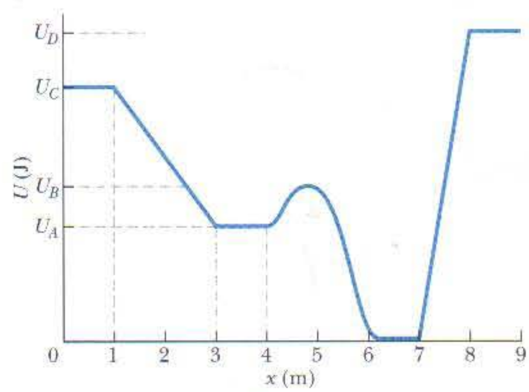


FIG. 8-51 Problema 40.

•••41 Uma única força conservativa $F(x)$ age sobre uma partícula de 1,0 kg que se move ao longo de um eixo x. A energia potencial $U(x)$ associada a $F(x)$ é dada por

$$U(x) = -4x\, e^{-x/4}\ \text{J},$$

onde x está em metros. Em x = 5,0 m a partícula possui uma energia cinética de 2,0 J. (a) Qual é a energia mecânica do sistema? (b) Faça um gráfico de $U(x)$ em função de x para $0 \le x \le 10$ m e plote, no mesmo gráfico, a reta que representa a energia mecânica do sistema. Use o gráfico do item (b) para determinar (c) o menor valor de x que a partícula pode atingir e (d) o maior valor de x que a partícula pode atingir. Use o gráfico do item (b) para determinar (e) a energia cinética máxima da partícula e (f) o valor de x para o qual a energia cinética atinge este valor. (g) Escreva uma expressão para $F(x)$, em newtons, em função de x, em metros. (h) $F(x) = 0$ para que valor (finito) de x?

seção 8-7 Trabalho Realizado por uma Força Externa sobre um Sistema

•42 Um operário empurra um caixote de 27 kg, com velocidade constante, por 9,2 m ao longo de um piso plano, com uma força orientada 32° abaixo da horizontal. Se o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso é 0,20, quais são (a) o trabalho realizado pelo operário e (b) o aumento da energia térmica do sistema bloco-piso?

•43 Um collie arrasta a caixa de dormir em um piso, aplicando uma força horizontal de 8,0 N. O módulo da força de atrito cinético que age sobre a caixa é 5,0 N. Quando a caixa é arrastada por uma distância de 0,7 m, quais são (a) o trabalho realizado pela força do cão e (b) o aumento de energia térmica da caixa e do piso?

••**44** Uma força horizontal de módulo 35,0 N empurra um bloco de massa 4,00 kg em um piso no qual o coeficiente de atrito cinético é 0,600. (a) Qual é o trabalho realizado por essa força sobre o sistema bloco-piso quando o bloco sofre um deslocamento de 3,00 m? (b) Durante esse deslocamento, a energia térmica do bloco aumenta de 40,0 J. Qual é o aumento da energia térmica do piso? (c) Qual é o aumento da energia cinética do bloco?

••**45** Uma corda é usada para puxar um bloco de 3,57 kg com velocidade constante, por 4,06 m, em um piso horizontal. A força que a corda exerce sobre o bloco é 7,68 N, 15,0° acima da horizontal. Quais são (a) o trabalho realizado pela força da corda, (b) o aumento na energia térmica do sistema bloco-piso e (c) o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o piso?

seção 8-8 Conservação da Energia

•**46** Um esquiador de 60 kg deixa a extremidade de uma rampa de salto de esqui com uma velocidade de 24 m/s 25° acima da horizontal. Suponha que, devido ao arrasto do ar, o esquiador retorna ao solo com uma velocidade de 22 m/s, aterrissando 14 m verticalmente abaixo da extremidade da rampa. Do início do salto até o retorno ao solo, de quanto a energia mecânica do sistema esquiador-Terra é reduzida devido ao arrasto do ar?

•**47** Um urso de 25 kg escorrega, a partir do repouso, 12 m para baixo em um tronco de pinheiro, movendo-se com uma velocidade de 5,6 m/s imediatamente antes de chegar ao chão. (a) Qual é a variação da energia potencial gravitacional do sistema urso-Terra durante o deslizamento? (b) Qual é a energia cinética do urso imediatamente antes de chegar ao chão? (c) Qual é a força de atrito média que age sobre o urso enquanto está escorregando?

•**48** Um jogador de beisebol arremessa uma bola com uma velocidade inicial de 81,8 mi/h. Imediatamente antes de um outro jogador segurar a bola na mesma altura sua velocidade é 110 pés/s. De quanto é reduzida, em pés-libras, a energia mecânica do sistema bola-Terra devido ao arrasto do ar? (A massa de uma bola de beisebol é de 9,0 onças.)

•**49** Um disco de plástico de 75 g é arremessado de um ponto 1,1 m acima do solo com uma velocidade escalar de 12 m/s. Quando o disco atinge uma altura de 2,1 m sua velocidade é de 10,5 m/s. Qual é a redução da E_{mec} do sistema disco-Terra devido ao arrasto do ar?

•**50** Na Fig. 8-52, um bloco desliza para baixo em um plano inclinado. Enquanto se move do ponto A para o ponto B, que estão separados por uma distância de 5,0 m, uma força $\vec{F}$, com módulo de 2,0 N e dirigida para baixo ao longo do plano inclinado, age sobre o bloco. O módulo da força de atrito que age sobre o bloco é 10 N. Se a energia cinética do bloco aumenta de 35 J entre A e B, qual é o trabalho realizado pela força gravitacional sobre o bloco enquanto ele se move de A até B?

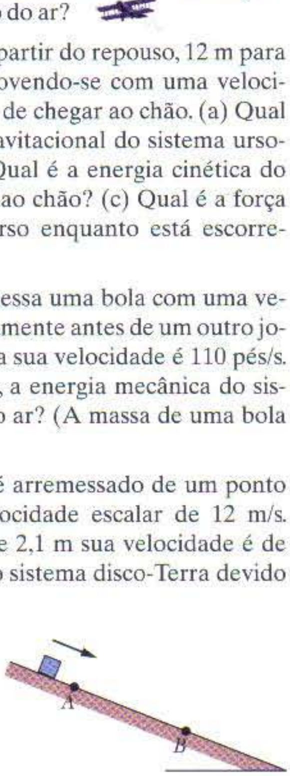


FIG. 8-52 Problemas 50 e 69.

•**51** Durante uma avalanche, uma pedra de 520 kg desliza a partir do repouso, descendo a encosta de uma montanha que tem 500 m de comprimento e 300 m de altura. O coeficiente de atrito cinético entre a pedra e a encosta é 0,25. (a) Se a energia potencial gravitacional U do sistema rocha-Terra é nula na base da montanha, qual é o valor de U imediatamente antes de começar a avalanche? (b) Qual é a energia transformada em energia térmica durante a avalanche? (c) Qual é a energia cinética da pedra ao chegar à base da montanha? (d) Qual é a velocidade da pedra nesse instante?

••**52** Você empurra um bloco de 2,0 kg contra uma mola horizontal, comprimindo-a 15 cm. Em seguida, solta o bloco e a mola o faz deslizar sobre uma mesa. O bloco pára depois de percorrer 75 cm a partir do ponto em que foi solto. A constante elástica da mola é 200 N/m. Qual é o coeficiente de atrito cinético entre o bloco e a mesa?

••**53** Na Fig. 8-53 um bloco desliza ao longo de uma pista, de um nível para outro mais elevado, passando por um vale intermediário. A pista não possui atrito até o bloco atingir o nível mais alto, onde uma força de atrito pára o bloco em uma distância d. A velocidade inicial v_0 do bloco é de 6,0 m/s, a diferença de altura h é 1,1 m e μ_k é 0,60. Determine d.

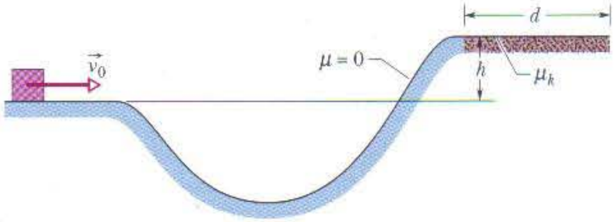


FIG. 8-53 Problema 53.

••**54** Um biscoito de mentira, deslizando em uma superfície horizontal, está preso a uma das extremidades de uma mola horizontal de constante elástica k = 400 N/m; a outra extremidade da mola está fixa. O biscoito possui uma energia cinética de 20,0 J ao passar pela posição de equilíbrio da mola. Enquanto o biscoito desliza, uma força de atrito de módulo 10,0 N age sobre ele. (a) Que distância o biscoito desliza a partir da posição de equilíbrio antes de parar momentaneamente? (b) Qual é a energia cinética do biscoito quando ele passa de volta pela posição de equilíbrio?

••**55** Na Fig. 8-54, um bloco de 3,5 kg é acelerado a partir do repouso por uma mola comprimida de constante elástica 640 N/m. O bloco deixa a mola no seu comprimento relaxado e se desloca em um piso horizontal com um coeficiente de atrito cinético μ_k = 0,25. A força de atrito pára o bloco em uma distância D = 7,8 m. Determine (a) o aumento de energia térmica do sistema bloco-piso, (b) a energia cinética máxima do bloco e (c) o comprimento da mola quando estava comprimida.

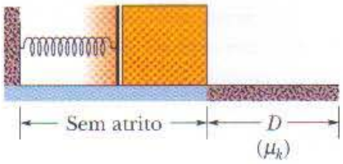


FIG. 8-54 Problema 55.

••**56** Um pacote de 4,0 kg começa a subir um plano inclinado de 30° com uma energia cinética de 128 J. Que distância ele percorre antes de parar, se o coeficiente de atrito cinético entre o pacote e o plano é 0,30?

••**57** Quando um besouro salta-martim está deitado de costas pode pular encurvando bruscamente o corpo, o que converte a energia armazenada em um músculo em energia mecânica, produzindo um estalo audível. O videoteipe de um desses pulos mostra que um besouro de massa $m = 4{,}0 \times 10^{-6}$ kg se desloca 0,77 mm na vertical durante um salto e consegue atingir uma altura máxima