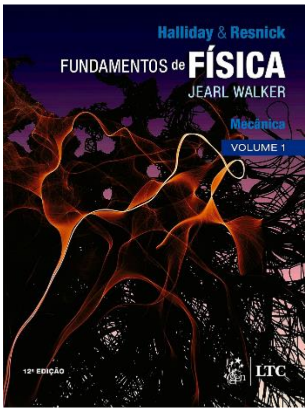
Física I-Energia Potencial e Conservação da Energia - I

Baseado no capítulo 8 do livro: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1. GEN | LTC. Edição do Kindle.



Disponível na Amazon: https://www.amazon.com.br/Fundamentos-F%C3%ADsica-Mec%C3%A2nica-David-Halliday/dp/8521637225

Resumo dos Principais Conceitos

Chamamos de energia potencial *U* aquela energia que podemos associar à configuração de um sistema, onde os componentes deste exercem forças *F* uns sobre os outros. Vamos em seguida considerar dois sistemas: partícula-Terra e massa-mola.

Trabalho e Energia Potencial

Sistema Partícula Terra

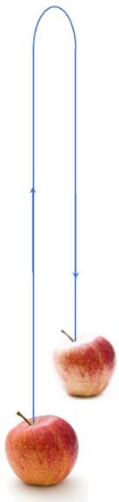


Figura 1. Sistema partícula-Terra.

Vamos considerar o sistema maçã-Terra (partícula-Terra) ilustrado na Figura 1. A maçã foi arremessada para cima e descreve a trajetória mostrada ao lado. Na subida, a força gravitacional F_g realiza trabalho negativo W_g sobre a maçã. **A força gravitacional extrai energia da energia cinética *K* da maçã e a transfere para a energia potencial gravitacional *U* do sistema maçã-Terra.** A energia potencial *U* está relacionada com a configuração do sistema.

A maçã atinge uma certa altura máxima e começa a cair em direção à Terra. **A força gravitacional F_g realiza um trabalho W_g positivo sobre a maçã transferindo energia da energia potencial gravitacional *U* do sistema maçã-Terra para a energia cinética *K* da maçã.**

Para verificar o sinal do trabalho realizado sobre a partícula é só analisar o ângulo entre a força *F* e o deslocamento *d*. No caso do sistema maçã-Terra temos a força gravitacional F_g. Na subida, o ângulo entre a força gravitacional e o deslocamento é 180º, assim o trabalho é negativo ($W = F_g\ d\ cos\ (180^o)$). **A força gravitacional retira energia da energia cinética da maçã e a transfere para a energia potencial do sistema maçã-Terra.** Na decida, o ângulo entre a força gravitacional e o deslocamento é zero. O que nos leva a um trabalho positivo ($W = F_g\, d \cos(0^o)$). Agora **a força gravitacional transfere energia da energia potencial do sistema maçã-Terra para a energia cinética da maçã.** Na análise do sistema maçã-Terra desprezamos a força de arrasto do ar $\vec{D}$. Ao atingir a altura de lançamento a maçã tem a mesma energia cinética *K* do início do movimento.

Na subida e descida a variação da energia potencial gravitacional ΔU é definida como o negativo do trabalho W_g realizado pela força gravitacional F_g sobre a maçã. De uma forma geral, para um trabalho *W* e uma variação de energia potencial ΔU do sistema, temos.

$$\Delta U = -W$$

Sistema Massa-Mola

Vamos considerar agora o sistema bloco-mola (**sistema massa-mola**) descrito na Figura 2. No sistema temos um bloco (a massa do sistema massa-mola) que se movimenta para a direita em uma superfície sem atrito. No instante inicial, o bloco acaba de entrar em contato com a mola. A força elástica *F(x)* da mola atua para a esquerda e realiza trabalho negativo sobre o bloco. **Há transferência de energia da energia cinética do bloco para a energia potencial elástica do sistema bloco-mola.** Essa transferência de energia faz o bloco parar. Em seguida o bloco passa a mover-se para a esquerda, devido à ação da força elástica da mola. **Agora temos a transferência de energia da energia potencial do sistema bloco-mola para a energia cinética do bloco.**

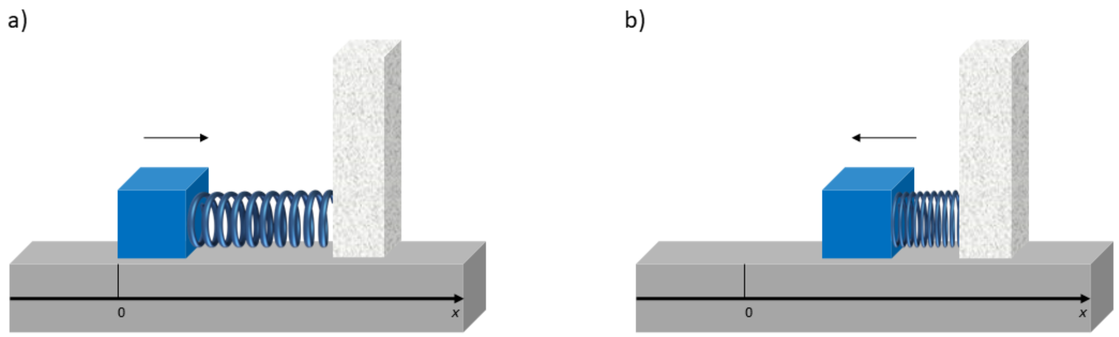


Figura 2. Sistema bloco-mola (massa-mola) numa superfície sem atrito. A seta indica o sentido do deslocamento do bloco em duas situações distintas. A extremidade direita da mola está fixa numa parede rígida e a extremidade da esquerda está livre. Desprezamos o atrito do bloco com a base e a massa da mola. (a) Inicialmente um bloco move-se para a direita (sentido do x positivo) e encontra oposição da mola. O trabalho W realizado pela força elástica da mola F(x) é negativo. (b) Agora o sentido do movimento foi invertido, o bloco movimenta-se para esquerda (sentido do x negativo). A força elástica F(x) da mola realiza trabalho W positivo.

Resumindo na tabela abaixo as duas situações de transferência de energia para o trabalho negativo e positivo.

Tabela 1. Análise resumida dos sistemas massa-mola e partícula-Terra.

<table>
<tr><th>Trabalho</th><th>Descrição</th><th>Sistema Massa-Mola</th><th>Sistema Partícula-Terra</th></tr>
<tr><td>$W > 0$</td><td>A força realiza trabalho sobre uma partícula transferindo energia da energia cinética da partícula para a energia potencial do sistema.</td><td rowspan="2">Tipo de força: Força elástica
Partícula: Corpo (uma massa ou um bloco por exemplo)
Energia potencial: Energia potencial elástica</td><td rowspan="2">Tipo de força: Força gravitacional
Partícula: Corpo (uma massa que foi arremessada por exemplo)
Energia potencial: Energia potencial gravitacional</td></tr>
<tr><td>$W < 0$</td><td>A força realiza trabalho sobre uma partícula transferindo energia da energia potencial do sistema para a energia cinética da partícula.</td></tr>
</table>

A partir da análise dos sistemas massa-mola e partícula-Terra, podemos detalhar as características relevantes destes. De uma forma geral, podemos dizer que um sistema tem dois ou mais objetos, sendo que um deles se comporta como uma partícula. Temos uma força que atua sobre a partícula e o resto do sistema. Considerando-se a variação da configuração do sistema, temos uma força que realiza trabalho W_1 sobre a partícula, transferindo energia entre a energia cinética da partícula e alguma forma distinta de energia do sistema. Considerando-se a inversão da configuração do sistema, temos agora que a força inverte o sentido da transferência da energia. Há realização de trabalho W_2 no processo. Quando temos $W_1 = -W_2$ dizemos que a outra forma de energia é a energia potencial do sistema e chamamos a força que atua de **força conservativa**. As forças gravitacional e elástica são forças conservativas. As forças de atrito cinético e de arrasto são **forças dissipativas**.

Considere uma força atuando sobre uma partícula que descreve a trajetória descrita na figura 3A. Essa trajetória é um percurso fechado onde a posição final coincide com a posição inicial da partícula. Se o trabalho total realizado pela força aplicada sobre a partícula da ida até a volta for nulo, dizemos que a força é conservativa. Ou como destacado no volume I do livro do Halliday:

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

Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (p. 727). GEN | LTC. Edição do Kindle.

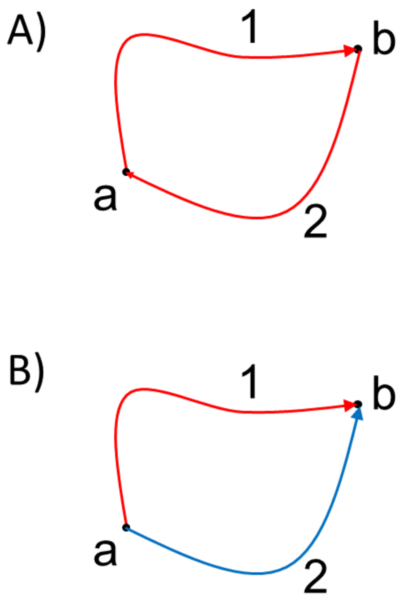


Figura 3. Na situação A, vemos o percurso fechado descrito por uma partícula. Em B) temos duas trajetórias possíveis para a partícula ir de a para b.

Considere a situação indicada na figura 3A, chamamos de $W_{ab,1}$ o trabalho realizado pela força para deslocar a partícula do ponto *a* para o ponto *b* ao longo da trajetória 1. O trabalho para deslocar a partícula do ponto *b* para o ponto *a* ao longo da trajetória 2 é indicado por $W_{ba,2}$. Considerando que a força é conservativa temos que a soma dos trabalhos de ida e volta é zero.

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

Ou seja,

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

Na figura 3B vemos duas trajetórias distintas para deslocar uma partícula do ponto *a* para o ponto *b*. Temos que o trabalho realizado pela força sobre a partícula quando ela se desloca do ponto *a* para o ponto *b* ao longo da trajetória 2 é dado por $W_{ab,2}$. Se a força é conservativa, sabemos que

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

Substituindo-se o resultado acima $W_{ab,2} = -W_{ba,2}$ na expressão anterior $W_{ab,1} = -W_{ba,2}$, temos,

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

Em outras palavras, **o trabalho realizado por força conservativa para deslocar uma partícula entre dois pontos é independente da trajetória**.

Cálculo da Energia Potencial de um Sistema Qualquer

Consideramos uma situação geral onde temos o trabalho *W* realizado por uma força conservativa *F(x)* entre as posições x_i e x_f dado pela seguinte expressão.

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

A variação da energia potencial ΔU é o negativo do trabalho *W*, como destacamos a seguir.

$$\Delta U = -W$$

Substituindo-se a expressão do trabalho *W* na equação imediatamente acima, temos a seguinte expressão para a variação da energia potencial.

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

Energia Potencial do Sistema Partícula-Terra

Na análise do sistema partícula-Terra, temos o trabalho realizado pela força gravitacional F_g. A força gravitacional age na vertical sobre a partícula. No sistema partícula-Terra consideramos o eixo *y* com sentido positivo para cima, assim a força gravitacional tem módulo *mg* e direção para baixo. A partir das considerações acima, iremos integrar ao longo do eixo *y* e a força gravitacional tem valor *-mg*. Assim temos a seguinte expressão para a variação da energia potencial do sistema partícula-Terra.

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

$$\Delta U = mg(y_f - y_i)$$

Só há sentido físico no cálculo de variações de energia potencial. Mas podemos tomar uma referência com valor zero de energia potencial na posição $y_i = 0$. Assim, a nova expressão para a energia potencial de uma dada configuração do sistema partícula-Terra fica com segue.

$$U - U_i = mg(y_f - y_i)$$

Consideramos $y_i = 0$, $U_i = 0$ e fixamos $y_f = y$. Assim chegamos à expressão abaixo para a energia potencial gravitacional.

$$U(y) = mgy$$

A expressão acima indica a energia potencial gravitacional associada a uma dada configuração o sistema partícula-Terra.

Energia Potencial do Sistema Massa-Mola

De forma similar, consideramos o sistema massa-mola onde sabemos que a força tem valor $-kx$. Calculando-se a variação da energia potencial elástica ΔU, temos a seguinte expressão.

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

Ou seja,

$$\Delta U = \frac{k}{2}\left(x_f^2 - x_i^2\right)$$

$$U_f - U_i = \frac{k}{2}\left(x_f^2 - x_i^2\right)$$

Considerando-se $U_f = U$, $U_i = 0$ para $x_i = 0$ e $x_f = x$, temos a seguinte expressão para a energia potencial elástica associada a uma dada configuração do sistema massa-Mola.

$$U(x) = \frac{k}{2}x^2$$

O uso de sistema massa-mola é comum na modelagem de sistemas físicos. Sua matemática simples permite dentro de certos limites a sua aplicação a uma grande variedade de sistemas. Desde sistemas macroscópicos até sistemas moleculares e atômicos. Sempre mantendo em mente que são aproximações.

Conservação da Energia Mecânica

Consideremos o trabalho *W* realizado por uma força conservativa *F* sobre uma partícula de um dado sistema. A força conservativa *F* é responsável por uma transferência de energia entre a energia cinética *K* da partícula e a energia potencial *U* do sistema. Sabemos pelo **teorema do trabalho e energia cinética** que a variação desta é o trabalho realizado pela força, como segue.

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

Como já foi visto, a variação da energia potencial ΔU é o negativo do trabalho *W*.

$$\Delta U = -W$$

Igualando-se a duas expressões anteriores, temos o seguinte resultado.

$$\Delta U = -\Delta K$$

Ou seja,

$$\Delta U + \Delta K = 0$$

Em outras palavras, a soma da variação da energia potencial com a variação da energia cinética é zero. Explicitando-se as variações temos o seguinte resultado.

$$U_2 - U_1 + K_2 - K_1 = 0$$

em que os índices 1 e 2 da equação acima se referem a dois instantes distintos da análise do sistema. Esses instantes indicam que temos duas configurações diferentes dos componentes do sistema em estudo. Rearranjando-se os termos da equação acima chegamos à seguinte expressão.

$$U_2 + K_2 = U_1 + K_1$$

Considerando-se que a soma da energia cinética com a potencial é a energia mecânica, podemos dizer que a energia mecânica é conservada. Esse resultado é chamado de **princípio de conservação da energia mecânica**.

Podemos reescrever a equação anterior como segue.

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

Quando a energia mecânica de um sistema é conservada, podemos igualar a soma da energia cinética com a energia potencial em um instante à soma em outro instante sem levar em conta os movimentos intermediários e sem calcular o trabalho realizado pelas forças envolvidas no sistema.

A Figura 4 destaca um sistema onde o princípio de conservação da energia mecânica pode ser aplicado. O sistema é um pêndulo simples (pêndulo-Terra) que quando oscila, a energia do sistema pêndulo-Terra é transferida de energia cinética *K* para energia potencial gravitacional *U*, e vice-versa, com a soma *K* + *U* permanecendo constante durante o processo.

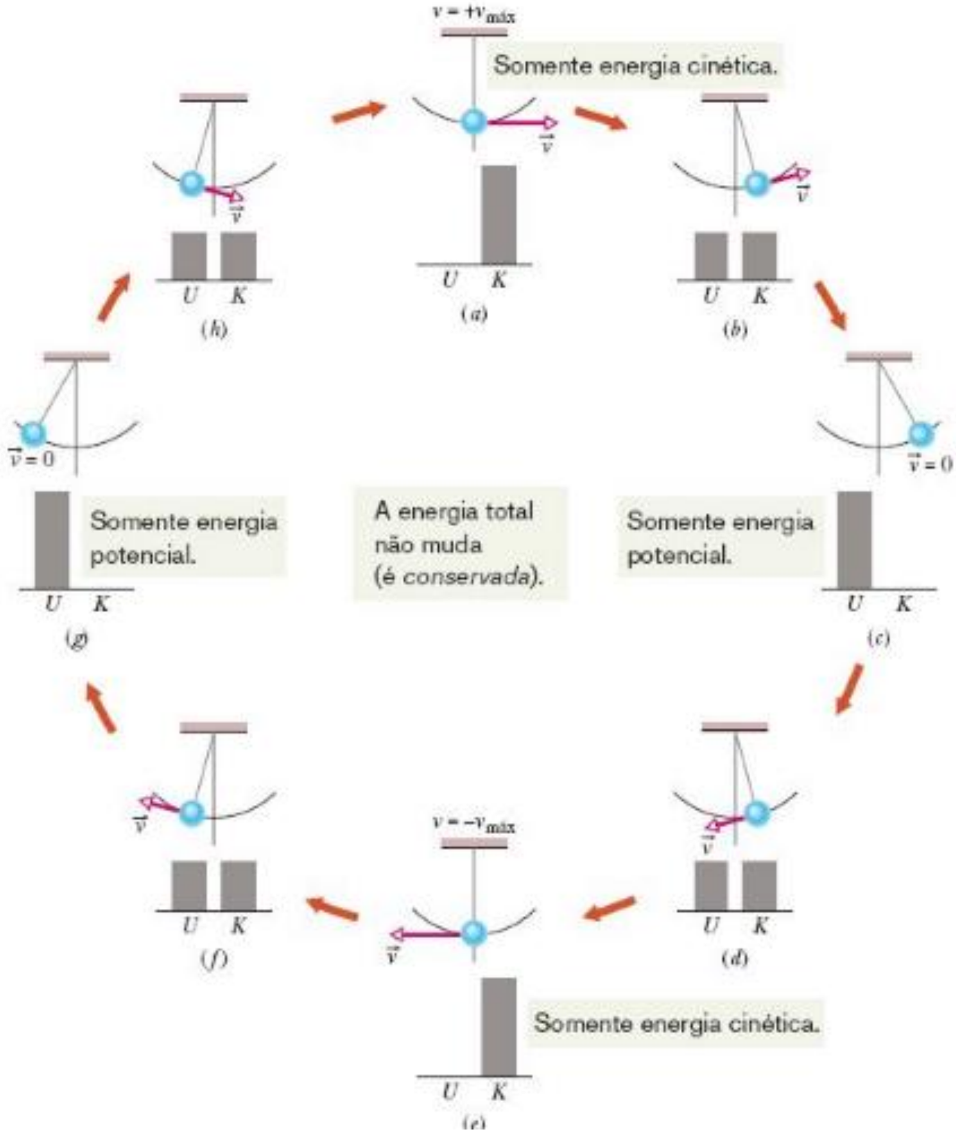


Figura 4. Um pêndulo, com a massa concentrada em um peso na extremidade inferior, oscila de um lado para outro. É mostrado um ciclo completo do movimento. Durante o ciclo, os valores da

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. Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (pp. 743-744). GEN | LTC. Edição do Kindle.

Na análise do sistema físico pêndulo-Terra, podemos começar a partir da situação onde a velocidade do pêndulo é zero, como indicada na Figura 4c. Como a velocidade é zero, a sua energia cinética também é zero. Essa situação indica que a energia potencial gravitacional é máxima. Podemos pensar que deslocamos a massa do pêndulo para a direita e o seguramos por alguns segundos. Depois soltamos a massa do pêndulo que começa a oscilar. Vale a pena destacar que desprezamos o atrito do pêndulo com a base de suporte e a força de arrasto. Ao soltarmos o pêndulo este ganha velocidade e antes de chegar até o ponto mais baixo temos uma situação intermediária (Figura 4d), onde a energia cinética e potencial são iguais. Tomando-se como referência a parte mais baixa da trajetória indicada na Figura 4e com energia potencial gravitacional zero, vemos que a energia cinética na situação ilustrada na Figura 4e é máxima durante a oscilação do pêndulo. Na Figura 4f, a energia cinética diminui e aumenta a energia potencial gravitacional. Quando o pêndulo chega na situação ilustrada na Figura 4g, temos a energia cinética zero e a energia potencial gravitacional é máxima. O pêndulo movimenta-se para direita e chegamos na situação indicada na Figura 4h, onde a energia potencial gravitacional e energia cinética são idênticas. Movimentando-se um pouco mais para direita, temos o ponto de mínimo para a energia potencial gravitacional e de máximo para a energia cinética, como indicado na Figura 4a. O movimento segue para a direita e novamente encontramos a igualdade entre as energias, como destacado na Figura 4b. O ciclo se repete.

Resumo das Equações

Equação	**Breve Descrição**
$\Delta U = -W$	A variação da energia potencial ΔU é o negativo do trabalho W.
$\Delta U + \Delta K = 0$	A soma da variação da energia potencial ΔU com a variação da energia cinética ΔK é zero.
$U_2 + K_2 = U_1 + K_1$	A soma das energias potencial e cinética em um instante 2 é igual à soma destas no instante 1.
$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0$	Esse resultado é chamado de **princípio de conservação da energia mecânica E_{mec}.**
$\Delta U = -\int_{x_i}^{x_f} F(x)dx$	A variação da energia potencial ΔU é o negativo da integral da força *F(x)* entre os intervalos x_i e x_f.
$U(y) = mgy$	A expressão ao lado indica a energia potencial gravitacional *U* associada a uma dada configuração o sistema partícula-Terra, onde *m* é a massa da partícula *g* a aceleração da gravidade e *y* a altura.
$U(x) = \frac{k}{2}x^2$	A energia potencial elástica *U(x)* associada a uma dada configuração do sistema massa-Mola. Na equação ao lado x é a posição da massa ligada à mola e *k* é a constante elástica da mola.

Exemplo 1

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

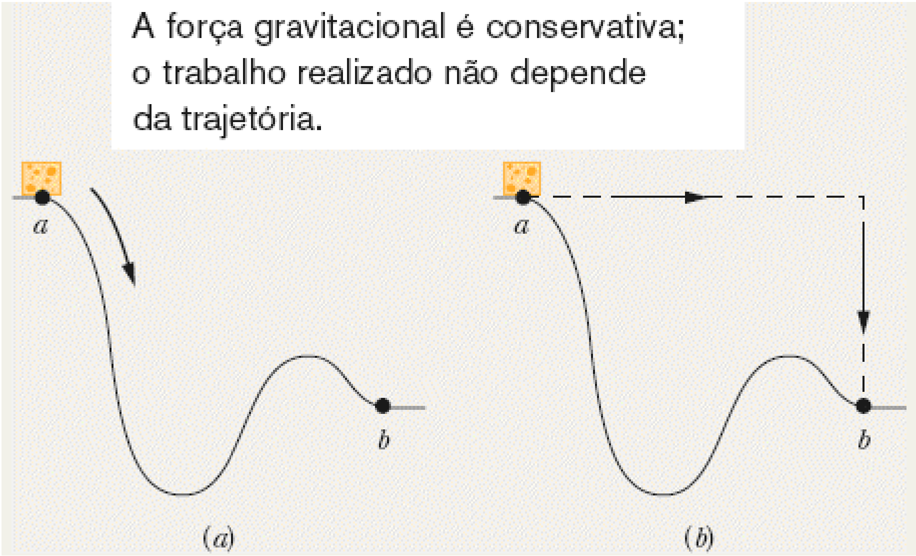


Figura 5. (a) Um pedaço de queijo desliza por uma rampa, sem atrito, do ponto a para o ponto b. (b) O trabalho realizado pela força gravitacional sobre o queijo é mais fácil de calcular para a trajetória tracejada do que para a trajetória real, mas o resultado é o mesmo nos dois casos. Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (p. 733). GEN | LTC. Edição do Kindle.

Solução

Calculamos o trabalho usando a trajetória equivalente mostrada na Figura 5.b. Para o trecho horizontal temos o seguinte resultado.

$$W_h = mg\ h\ \cos 90^o$$

$$W_h = mg\ h\ .0 = 0$$

Na vertical temos a seguinte situação.

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

Somando-se os trabalhos para os trechos horizontal (W_h) e vertical (W_v), temos o seguinte resultado.

$$W = W_h + W_v = 0 + 15{,}7J = 15{,}7\ J$$

Esse é também o trabalho realizado quando o queijo escorrega ao longo da rampa de *a* a *b*. Note que o valor da distância total percorrida *(2,0 m*) não foi usado nos cálculos.

Exemplo 2

Uma partícula se move ao longo de um eixo *x*, de *x* = *0* para *x* = x_1, enquanto uma força conservativa, orientada ao longo do eixo *x*, age sobre a partícula. A Figura 6 mostra três situações nas quais a força varia com *x*. A força possui o mesmo módulo máximo 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.

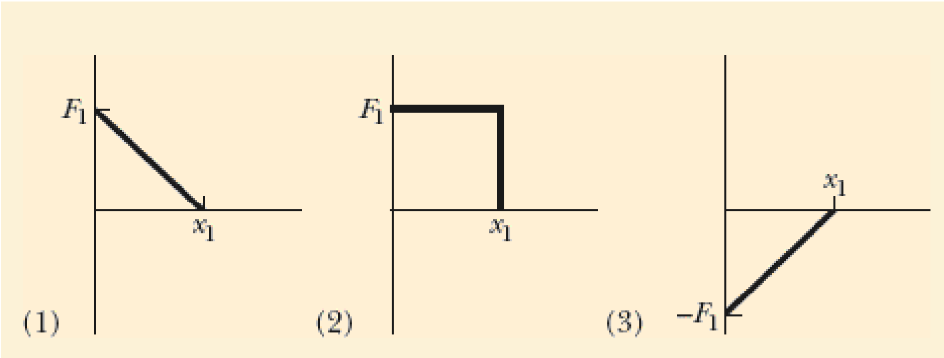


Figura 6. Variação da força F_1 em três situações distintas. Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (p. 737). GEN | LTC. Edição do Kindle.

Solução

Sabemos que a variação da energia potencial do sistema é o negativo do trabalho realizado pela força F_1. Assim temos a seguinte expressão.

$$\Delta U = -W = -\int_0^{x_1} F(x)dx$$

A integral é a área sob a curva, assim temos as seguintes variações da energia potencial para os três sistemas.

Sistema (1)

$$\Delta U_{(1)} = -\frac{x_1 F_1}{2}$$

Sistema (2)

$$\Delta U_{(2)} = -x_1 F_1$$

Sistema (3)

$$\Delta U_{(3)} = -\left(-\frac{x_1 F_1}{2}\right) = \frac{x_1 F_1}{2}$$

Resposta: (3), (1) e (2)

Exemplo 3

A Figura 7 mostra quatro situações, uma na qual um bloco inicialmente em repouso é deixado cair e outras três 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.

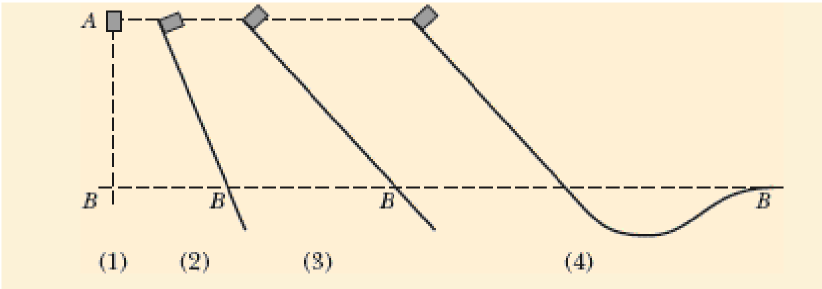


Figura 7. O movimento vertical de um corpo da posição A para posição B em quatro situações distintas. Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (p. 746). GEN | LTC. Edição do Kindle.

Solução

(a) Sabemos que a energia cinética tem a seguinte expressão levando em conta a conservação da energia mecânica.

$$K_A + U_A = K_B + U_B$$

Isolando-se a energia cinética em B, temos a seguinte expressão.

$$K_B = K_A + U_A - U_B$$

Podemos considerar a energia potencial como zero no ponto *B* e a energia cinética em *A* como zero, de forma que a expressão assume a seguinte forma.

$$K_B = U_A$$

Ou seja, a energia cinética em *B* independe da trajetória e todas são iguais.

$$K_B = mgh_B$$

Resposta: Todas as energias cinéticas são iguais.

(b) Explicitando a velocidade em B na expressão acima, chegamos ao seguinte resultado.

$$K_B = \frac{1}{2}mv_B^2 = mgh_B$$

Ou seja, a velocidade no ponto *B* tem a seguinte forma.

$$v_B = \sqrt{2gh_B}$$

Assim, a velocidade no ponto *B* só depende da altura h_B. Todas as velocidades são idênticas.

Resposta: Todas as velocidades são iguais.

Exemplo 4

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

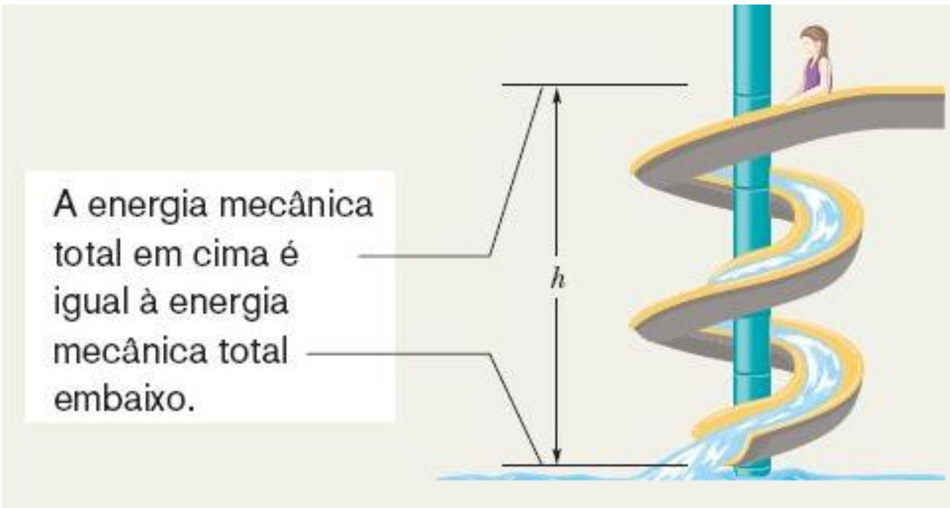


Figura 8. Uma criança desce uma altura h escorregando em um toboágua. Fonte: Halliday, David; Resnick, Robert; Walker, Jearl. Fundamentos da Física - Mecânica - Volume 1 (p. 747). GEN | LTC. Edição do Kindle.

Solução

Vamos chamar a posição da criança na parte mais alta como posição 1 e na parte mais baixa de posição 2. Consideramos a conservação da energia mecânica e temos a seguinte expressão.

$$E_{mec,1} = E_{mec,2}$$

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2$$

Explicitando-se os termos para velocidade, altura, mas e g, temos a seguinte expressão.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

A partir da análise das condições do problema, vemos que $v_1 = 0$ e $h_2 = 0$. Chegamos à expressão indicada a seguir.

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = mgh_1$$

Isolando-se o termo da velocidade em 2, chegamos à seguinte equação.

$$v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

Agora podemos substituir os valores numéricos na expressão acima.

$$v_2 = \sqrt{2(9{,}8m/s^2)8{,}5m}$$

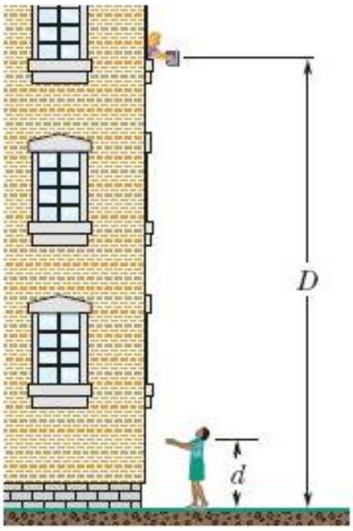
$$v_2 = 12{,}9\ m/s$$

Resposta: $v_2 = 12{,}9\ m/s$

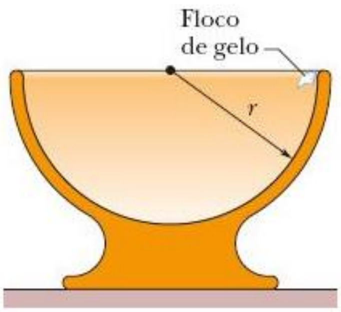
O resultado obtido acima é exatamente igual àquele da criança caindo verticalmente de uma altura de 8,5 m. No brinquedo real, a velocidade da criança seria um pouco menor devido principalmente ao atrito.

Exercícios

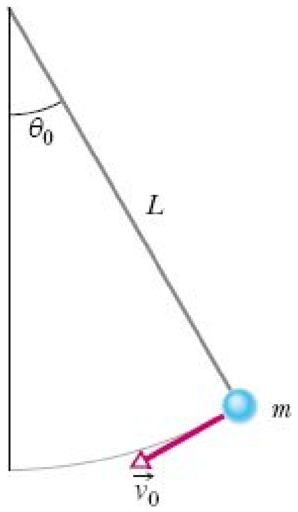
1. Qual é a constante elástica de uma mola que armazena *25 J* de energia potencial ao ser comprimida *7,5 cm*?
2. Você deixa cair um livro de *2,00 kg* para uma amiga que está na calçada, a uma distância *D = 10,0 m* abaixo de você. Se as mãos estendidas da sua amiga estão a uma distância *d = 1,50* m acima do solo (Figura abaixo), (a) qual é o trabalho W_g realizado sobre o livro pela força gravitacional até o livro 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 o livro 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 do qual você deixou cair o livro e (h) U no ponto em que o livro chegou às mãos da sua amiga.



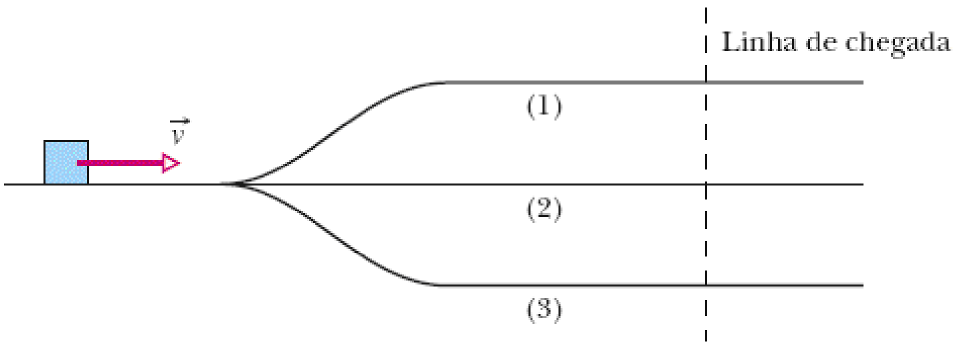
3. Na Figura abaixo, um floco de gelo de *2,00 g* é liberado na borda de uma taça hemisférica com *22,0 cm* de raio. Não há atrito no contato do floco com a taça. (a) Qual é o trabalho realizado sobre o floco pela força gravitacional durante a descida do floco até o fundo da taça? (b) Qual é a variação da energia potencial do sistema floco-Terra durante a descida? (c) Se a energia potencial é tomada como 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 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?



4. A Figura abaixo 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 a bola 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 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?



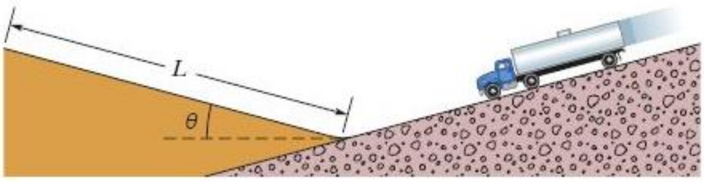
5. Na Figura abaixo, um bloco que se move horizontalmente pode seguir três caminhos sem atrito, que diferem apenas na altura, para alcançar a linha de chegada representada por uma reta tracejada. Ordene os caminhos, em ordem decrescente, de acordo (a) com a velocidade do bloco na linha de chegada e (b) com o tempo de percurso do bloco até a linha de chegada.



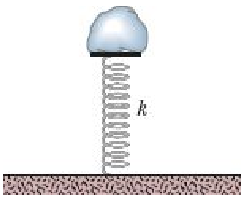
6. (a) No exercício 3, qual é a velocidade do floco de gelo ao chegar ao fundo da taça? (b) Se o floco de gelo tivesse o dobro da massa, qual seria a velocidade? (c) Se o floco de gelo tivesse uma velocidade inicial para baixo, a resposta do item (a) aumentaria, diminuiria ou permaneceria a mesma?
7. Uma bola de gude de $5{,}0\ g$ é lançada verticalmente para cima usando uma espingarda de mola. A mola deve ser comprimida $8{,}0\ cm$ para que a bola apenas toque um alvo $20\ m$ 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?

8. Na Figura abaixo, 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 $\theta = 15^o$. 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?



9. A Figura abaixo mostra uma pedra de *8,00 kg* em repouso sobre uma mola. A mola é comprimida *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 a altura máxima, medida a partir do ponto onde a pedra foi liberada?



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

Respostas

1. 89 N/cm
2. (a) 167 J; (b) − 167 J; (c) 196 J; (d) 29 J; (e) 167 J; (f) − 167 J; (g) 296 J; (h) 129 J
3. (a) 4,31 mJ; (b) − 4,31 mJ; (c) 4,31 mJ; (d) − 4,31 mJ; (e) todos aumentariam
4. (a) 13,1 J; (b) − 13,1 J; (c) 13,1 J; (d) todos aumentam
5. (a) 3, 2, 1; (b) 1, 2, 3
6. (a) 2,08 m/ s; (b) 2,08 m/ s; (c) aumentaria
7. (a) 0,98 J; (b) − 0,98 J; (c) 3,1 N/cm
8. (a) $2{,}6 \times 10^2$ m; (b) permanece o mesmo; (c) diminui
9. (a) 784 N/m; (b) 62,7 J; (c) 62,7 J; (d) 80,0 cm
10. $-3{,}2 \times 10^2$ J