

Capítulo 6

Trabalho e Energia Cinética

Trabalho realizado por uma força: quando uma força constante \vec{F} atua sobre uma partícula enquanto ela sofre um deslocamento retilíneo \vec{d} , o trabalho realizado por esta força é definido como o produto escalar de \vec{F} e \vec{d} . A unidade de trabalho no sistema SI é 1 joule = 1 newton-metro (1 J = 1 N · m). O trabalho é uma grandeza escalar; ele possui um sinal algébrico (positivo ou negativo) mas não possui direção no espaço.

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd \cos \phi$$

$$\phi = \text{ângulo entre } \vec{F} \text{ e } \vec{d}$$

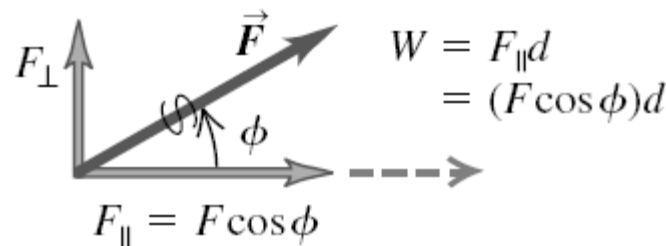
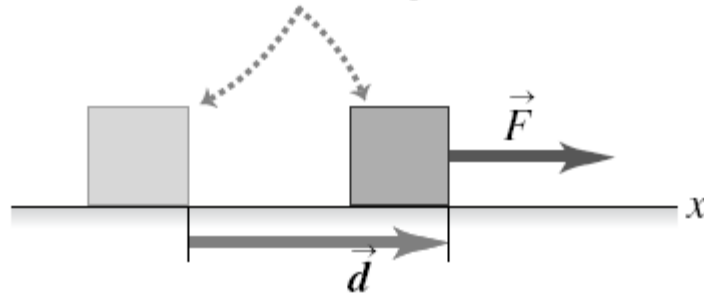




Figura 6.1 Essas pessoas estão realizando um trabalho enquanto empurram o carro enguiçado porque elas exercem uma força sobre o carro, enquanto ele se desloca.

Quando um corpo se move ao longo de um deslocamento \vec{d} enquanto uma força constante \vec{F} atua sobre ele na mesma direção e sentido



... o trabalho realizado pela força sobre o corpo é $W = Fd$.

Figura 6.2 O trabalho realizado por uma força constante que atua na mesma direção e no mesmo sentido do deslocamento.

Quando um carro se move ao longo de um deslocamento \vec{d} , enquanto uma força constante \vec{F} atua sobre ele formando um ângulo ϕ em relação ao deslocamento...

... o trabalho realizado pela força sobre o carro é $W = F_{\parallel} d = (F \cos \phi) d = Fd \cos \phi$.

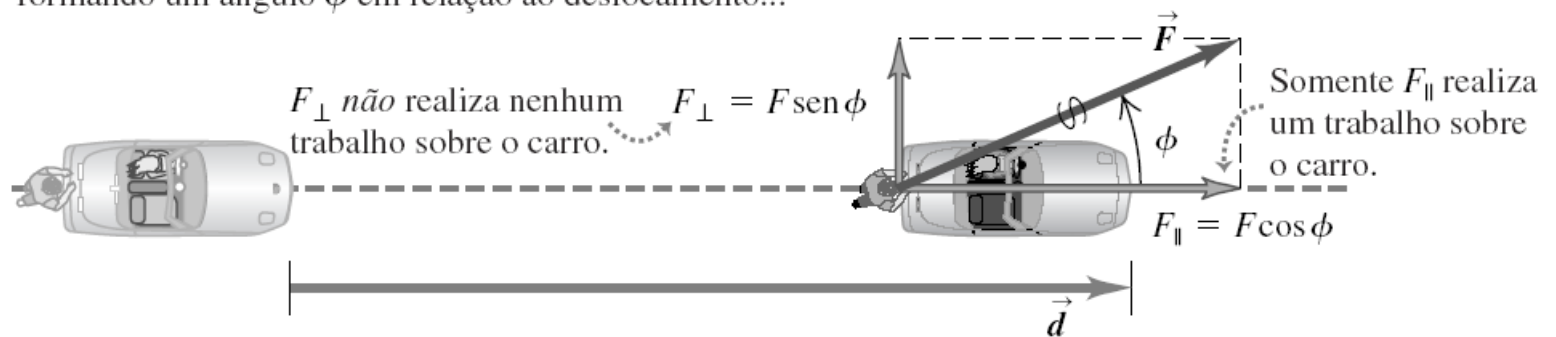
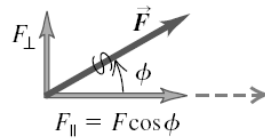
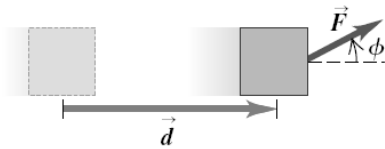


Figura 6.3 O trabalho realizado por uma força constante que forma um ângulo em relação ao deslocamento.

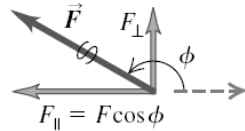
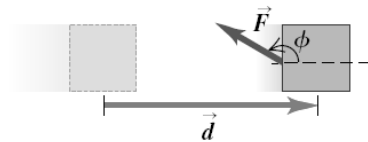
(a)



A força possui um componente na mesma direção e no mesmo sentido do deslocamento:

- O trabalho realizado sobre o objeto é positivo.
- $W = F_{\parallel}d = (F\cos\phi)d$

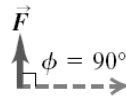
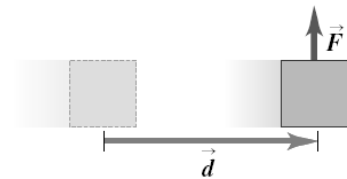
(b)



A força possui um componente no sentido contrário ao do deslocamento:

- O trabalho realizado sobre o objeto é negativo.
- $W = F_{\parallel}d = (F\cos\phi)d$
- Matematicamente, $W < 0$ porque $F\cos\phi$ é negativo para $90^\circ < \phi < 270^\circ$.

(c)



A força é perpendicular à direção do deslocamento:

- A força não realiza nenhum trabalho sobre o objeto.
- Generalizando, quando uma força que atua sobre um objeto possui um componente F_{\perp} ortogonal ao deslocamento do objeto, esse componente não realiza nenhum trabalho sobre o objeto.

Figura 6.4 Uma força constante \vec{F} pode realizar um trabalho positivo, negativo ou nulo, dependendo do ângulo entre \vec{F} e o deslocamento \vec{d} .

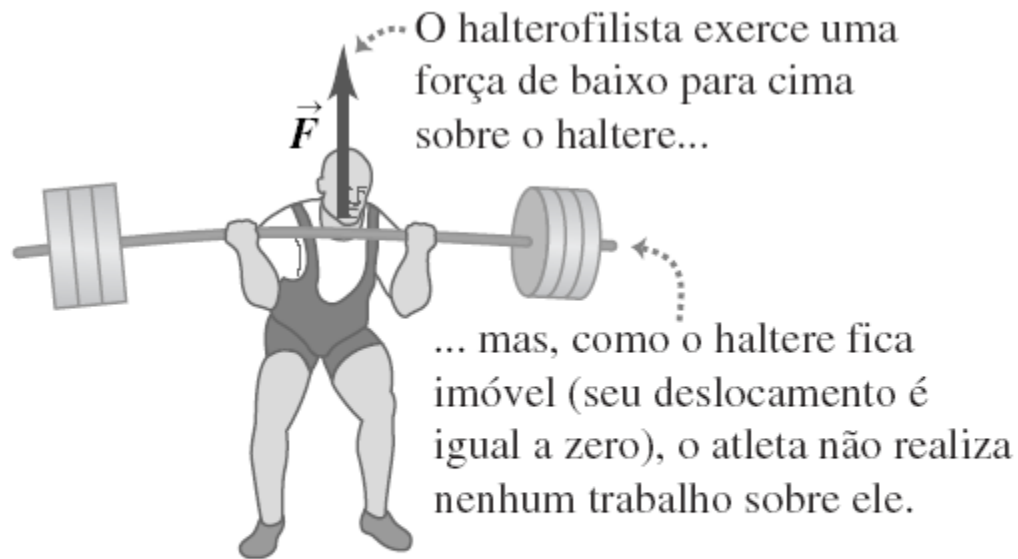
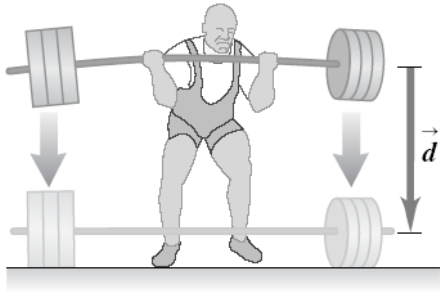
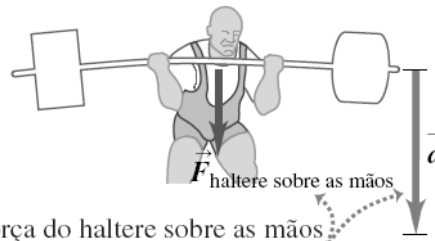


Figura 6.5 Um halterofilista não realiza nenhum trabalho sobre um haltere, contanto que o mantenha estático.

(a) O halterofilista apóia um haltere no piso.

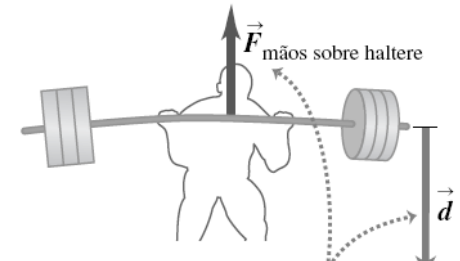


(b) O trabalho realizado pelo haltere sobre as mãos do halterofilista é *positivo*.



A força do haltere sobre as mãos do halterofilista está na *mesma* direção e sentido do deslocamento das mãos.

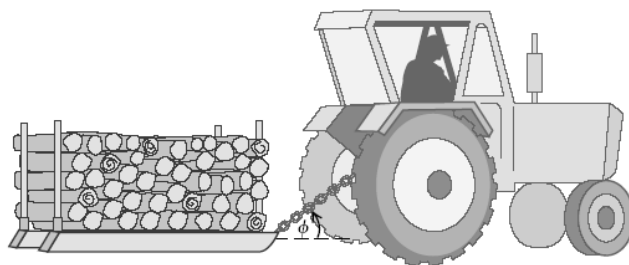
(c) O trabalho realizado pelas mãos do halterofilista sobre o haltere é *negativo*.



A força das mãos do halterofilista sobre o haltere está na direção e no sentido *contrários* ao deslocamento do haltere.

Figura 6.6 As mãos deste halterofilista realizam um trabalho negativo sobre um haltere enquanto o haltere realiza um trabalho positivo sobre suas mãos.

(a)



(b) Diagrama do corpo livre para o trenó.

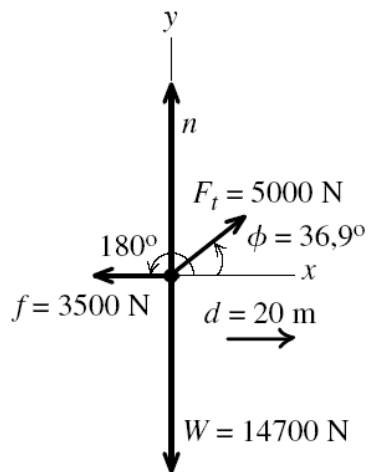
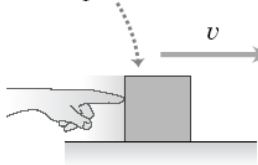
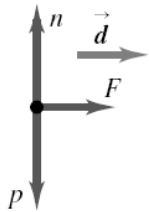


Figura 6.7 Cálculo do trabalho realizado sobre um trenó carregado de madeira sendo puxado por um trator.

(a) Um bloco desliza da esquerda para a direita sobre uma superfície sem atrito.

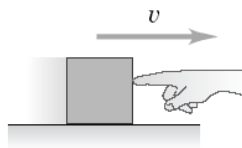


Quando você empurra da esquerda para a direita o bloco em movimento, a força resultante sobre o bloco está direcionada para a direita.

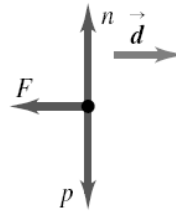


- O trabalho total realizado sobre o bloco durante um deslocamento \vec{d} é positivo: $W_{\text{tot}} > 0$.
- O bloco aumenta a velocidade.

(b)

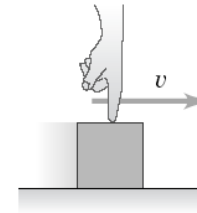


Quando você empurra da direita para a esquerda o bloco em movimento, a força resultante sobre o bloco está direcionada para a esquerda.

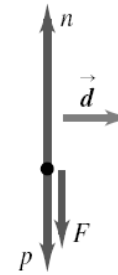


- O trabalho total realizado sobre o bloco durante um deslocamento \vec{d} é negativo: $W_{\text{tot}} < 0$.
- O bloco reduz a velocidade.

(c)



Quando você empurra de cima para baixo o bloco em movimento, a força resultante sobre o bloco é igual a zero.



- O trabalho total realizado sobre o bloco durante um deslocamento \vec{d} é nulo: $W_{\text{tot}} = 0$.
- A velocidade do bloco não varia.

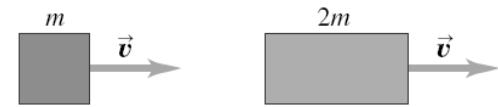
Figura 6.8 A relação entre o trabalho total realizado sobre um corpo e a variação da velocidade escalar do corpo.

Energia cinética: a energia cinética K de uma partícula é igual ao trabalho realizado para acelerá-la a partir do repouso até a velocidade v . É também igual ao trabalho realizado para desacelerá-la até atingir o repouso. Dobrar m implica dobrar K . Dobrar v implica quadruplicar K . A energia cinética é uma grandeza escalar que não possui direção no espaço, ela é sempre positiva ou nula. Suas unidades são as mesmas de trabalho: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

O teorema do trabalho-energia: quando forças atuam sobre uma partícula enquanto ela sofre um deslocamento, a energia cinética da partícula varia de uma quantidade igual ao trabalho total realizado por todas as forças que atuam sobre ela.

Essa relação é o teorema do trabalho-energia, que é sempre válido, independentemente de as forças serem constantes ou variáveis e de a trajetória ser retilínea ou curva. Ele se aplica somente para corpos que podem ser considerados partículas.

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

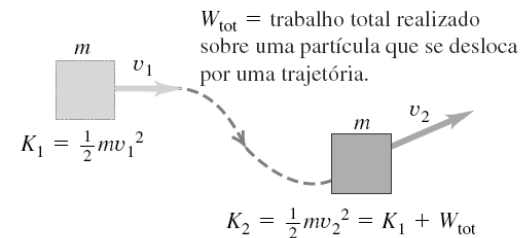


Dobrando m o valor de K dobra.



Dobrando v o valor de K quadruplica.

$$W_{\text{tot}} = K_2 - K_1 = \Delta K.$$



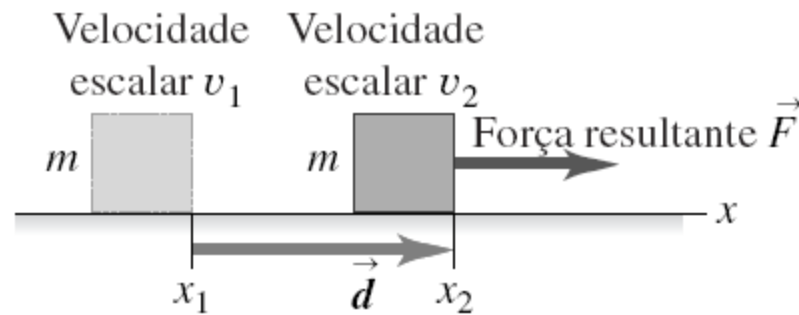
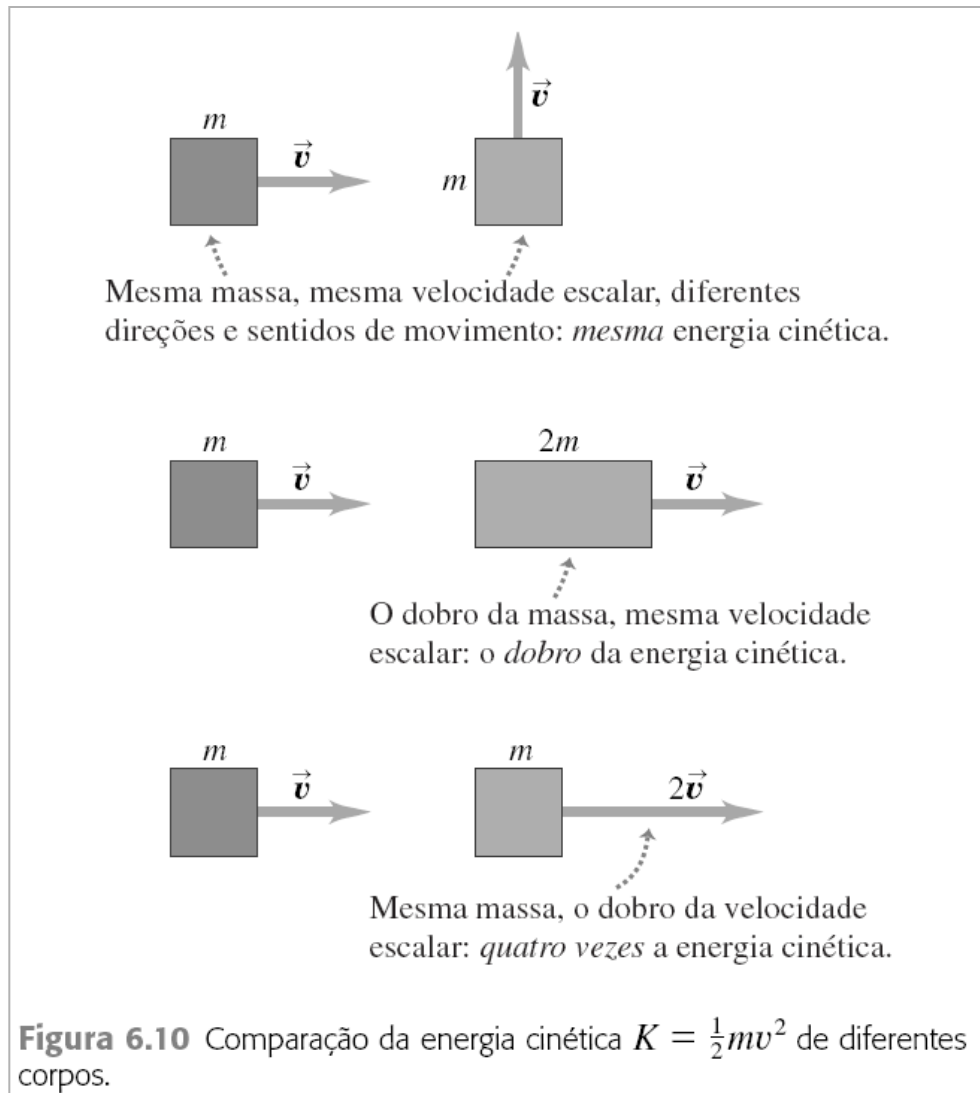
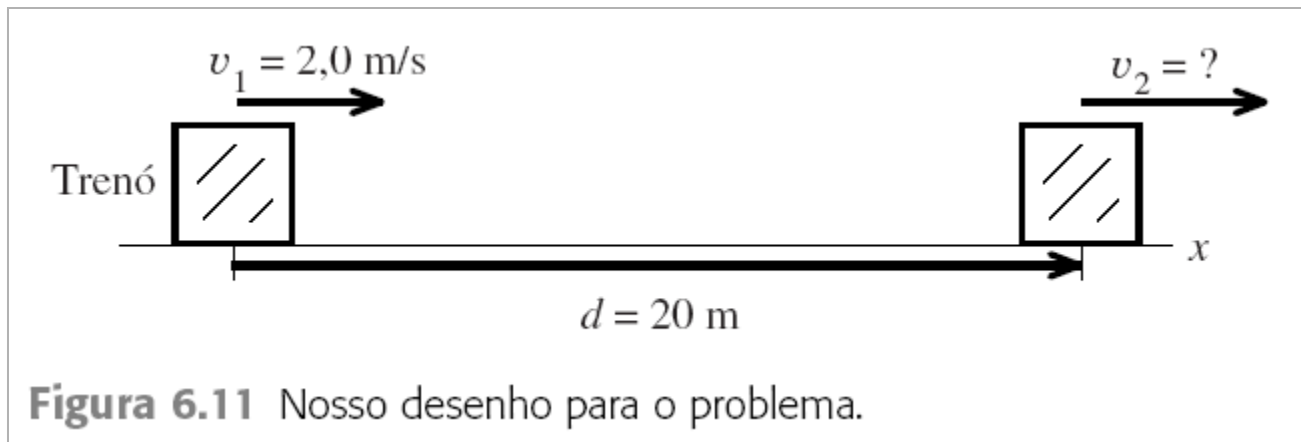
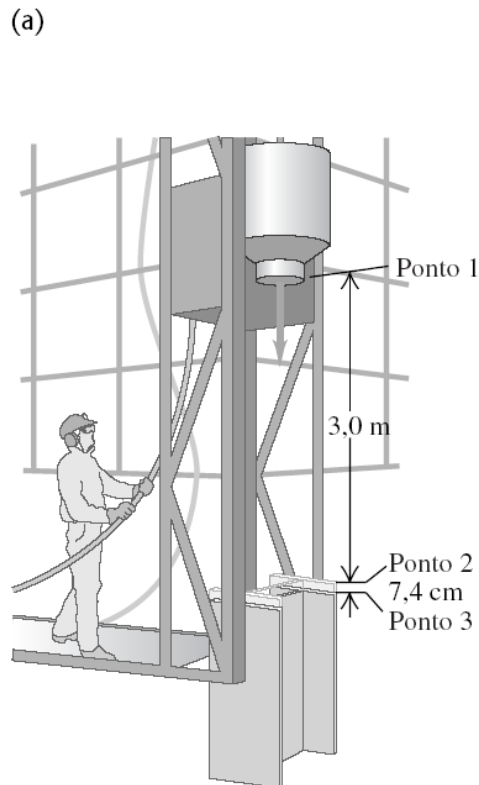


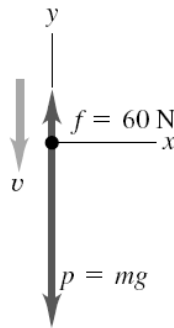
Figura 6.9 Uma força resultante constante \vec{F} realiza um trabalho sobre um corpo em movimento.







(b) Diagrama do corpo livre para a cabeça do martelo em queda livre.



(c) Diagrama do corpo livre para a cabeça do martelo empurrando a viga I.

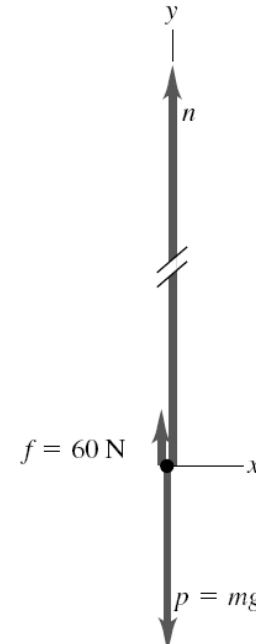


Figura 6.12 (a) Um bate-estaca crava no solo uma viga em forma de I. (b) e (c) Diagramas do corpo livre. Os comprimentos dos vetores não estão em escala.

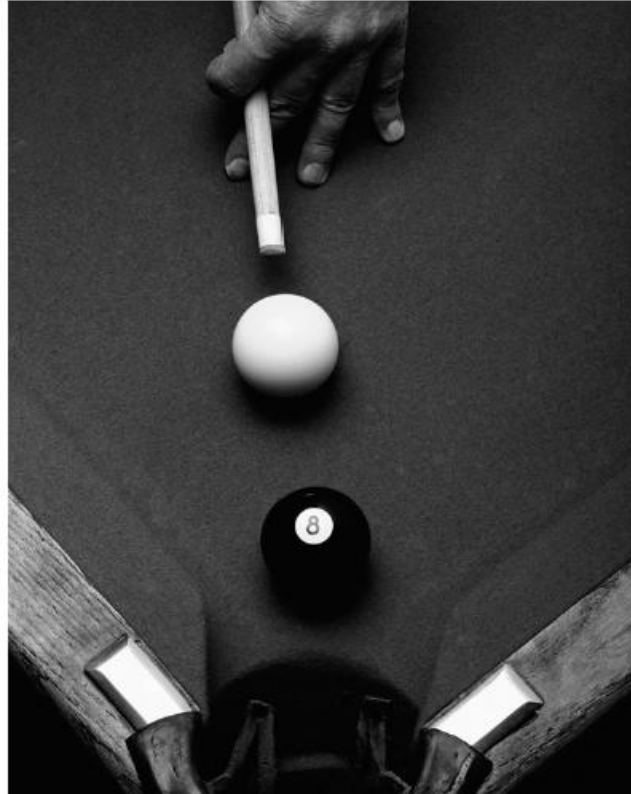


Figura 6.13 Quando um jogador de sinuca bate na bola da vez que está em repouso, a energia cinética da bola após ser atingida é igual ao trabalho realizado sobre ela pelo taco. Quanto maior forem a força exercida pelo taco e a distância percorrida pela bola enquanto está em contato com ele, maior será a energia cinética da bola.

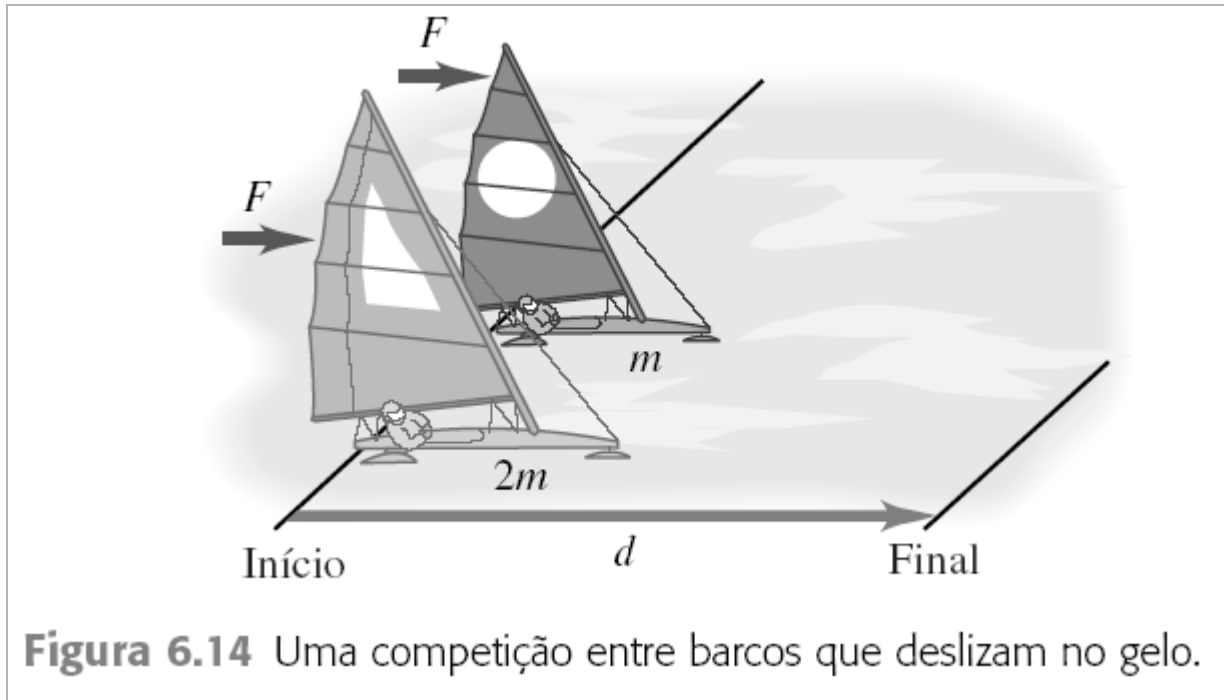


Figura 6.14 Uma competição entre barcos que deslizam no gelo.

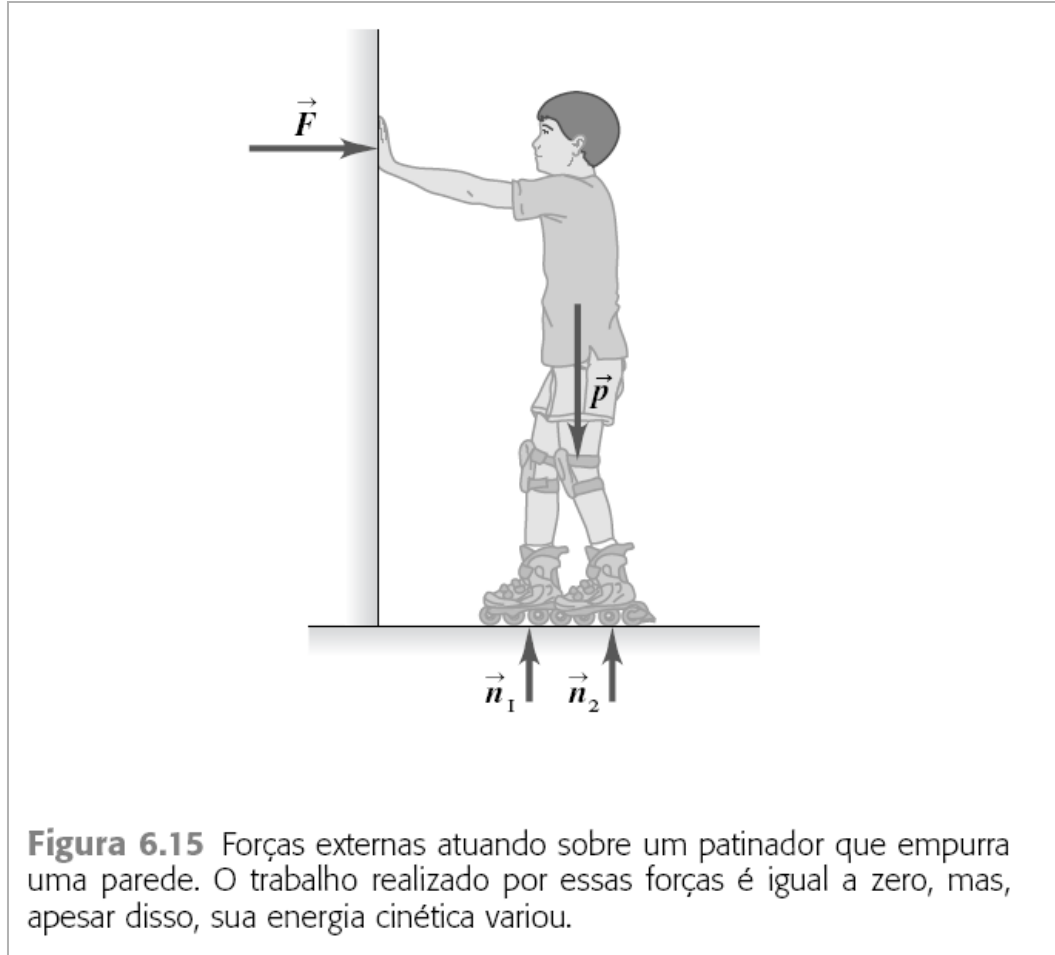
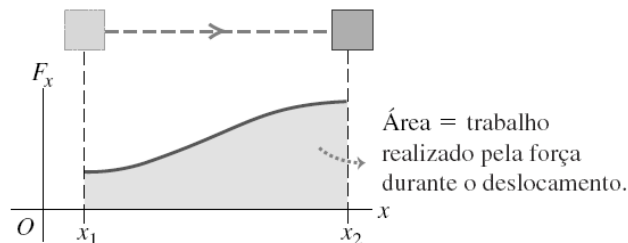


Figura 6.15 Forças externas atuando sobre um patinador que empurra uma parede. O trabalho realizado por essas forças é igual a zero, mas, apesar disso, sua energia cinética variou.

Trabalho realizado por uma força variável ou sobre uma trajetória curva: quando uma força varia durante um deslocamento retilíneo, o trabalho realizado por ela é dado por uma integral, Equação (6.7). (Veja os exemplos 6.6 e 6.7.) Quando uma partícula segue uma trajetória curva, o trabalho realizado sobre ela por uma força \vec{F} é dado por uma integral que envolve o ângulo ϕ entre a força e o deslocamento. Essa relação vale mesmo quando o módulo da força e quando o ângulo ϕ variam durante o deslocamento.

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F_x dx \quad (6.7)$$

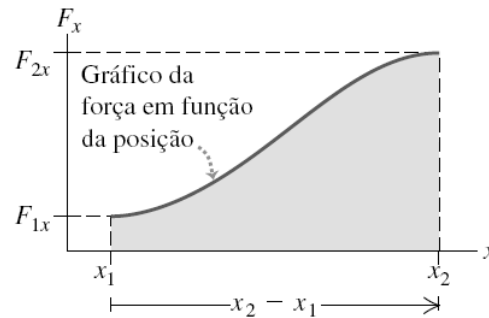
$$\begin{aligned} W &= \int_{P_1}^{P_2} F \cos \phi dl = \int_{P_1}^{P_2} F_{\parallel} dl \\ &= \int_{P_1}^{P_2} \vec{F} \cdot d\vec{l} \end{aligned} \quad (6.14)$$



(a) Partícula que se move de x_1 para x_2 em resposta a uma variação da força na direção de x .



(b)



(c)

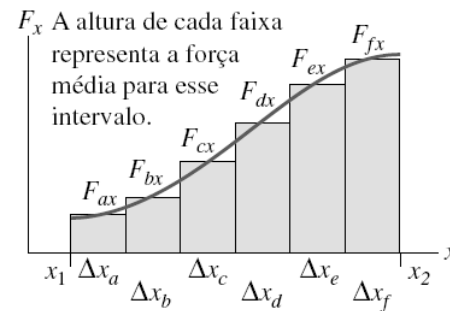


Figura 6.16 Cálculo do trabalho realizado por uma força variável F_x na direção de x , enquanto uma partícula se move de x_1 para x_2 .

A área do retângulo embaixo do gráfico representa o trabalho realizado pela força constante de módulo F durante o deslocamento d :

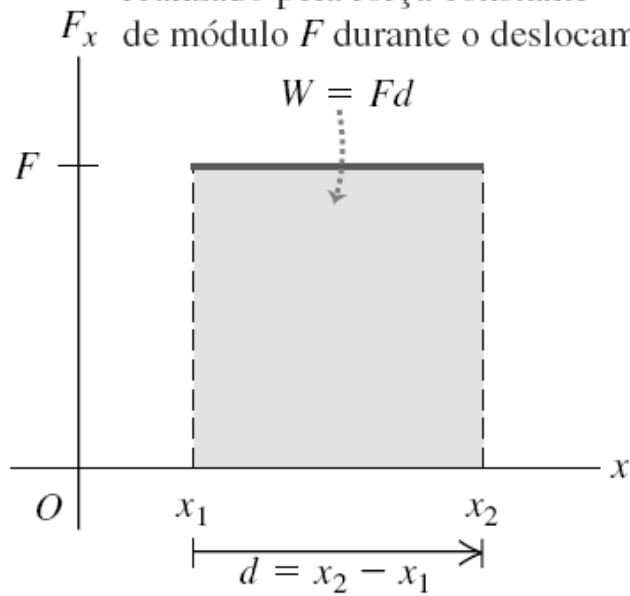


Figura 6.17 O trabalho realizado por uma força F constante no sentido do eixo Ox enquanto uma partícula se move de x_1 a x_2 .

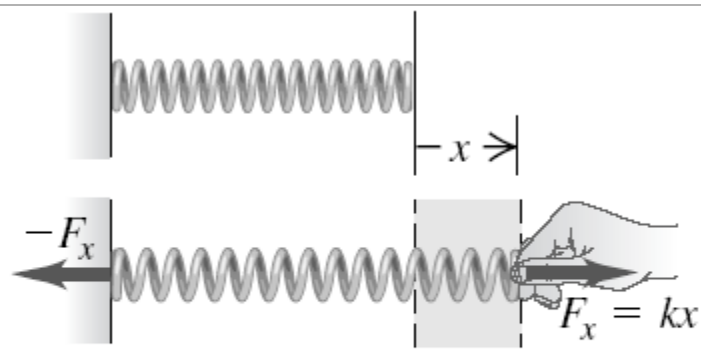


Figura 6.18 A força necessária para esticar a mola ideal é diretamente proporcional ao seu alongamento: $F = kx$.

A área abaixo do gráfico representa o trabalho realizado sobre a mola, enquanto a mola é alongada de $x = 0$ até um valor máximo X :

$$W = \frac{1}{2}kX^2$$

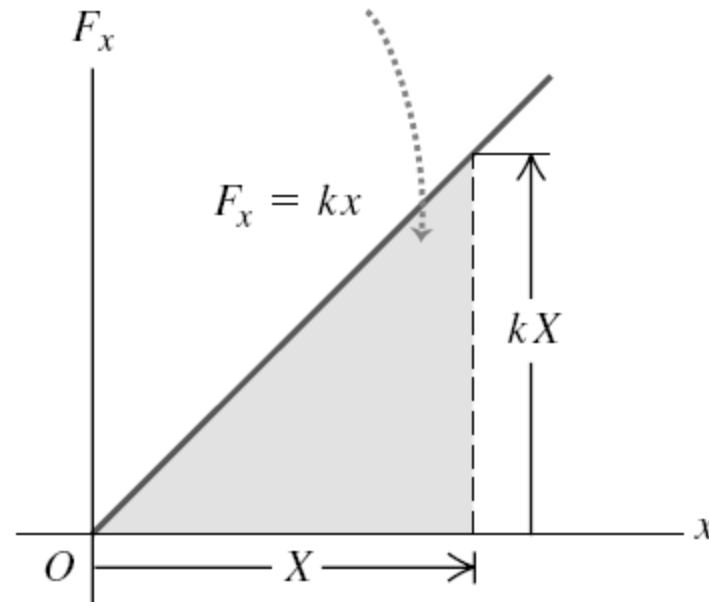
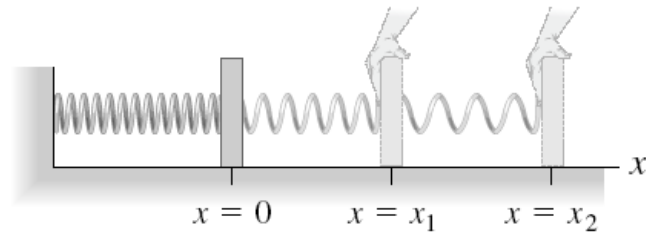


Figura 6.19 Cálculo do trabalho realizado para esticar a mola em um alongamento X .

(a) Alongando uma mola de x_1 a x_2 .



(b) Gráfico da força pela distância.

A área trapezoidal sob o gráfico representa o trabalho realizado sobre a mola para alongá-la de $x = x_1$ para $x = x_2$: $W = \frac{1}{2} kx_2^2 - \frac{1}{2} kx_1^2$

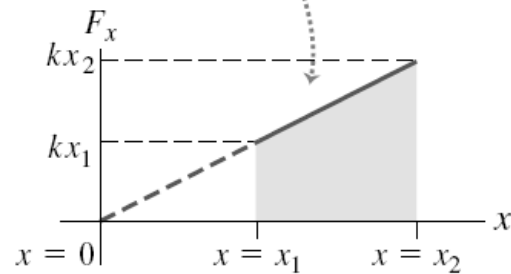


Figura 6.20 Cálculo do trabalho realizado para esticar uma mola de uma extensão a outra maior.

Devido à escolha do eixo, tanto o componente da força quanto o deslocamento são negativos. O trabalho realizado *sobre* a mola é positivo.

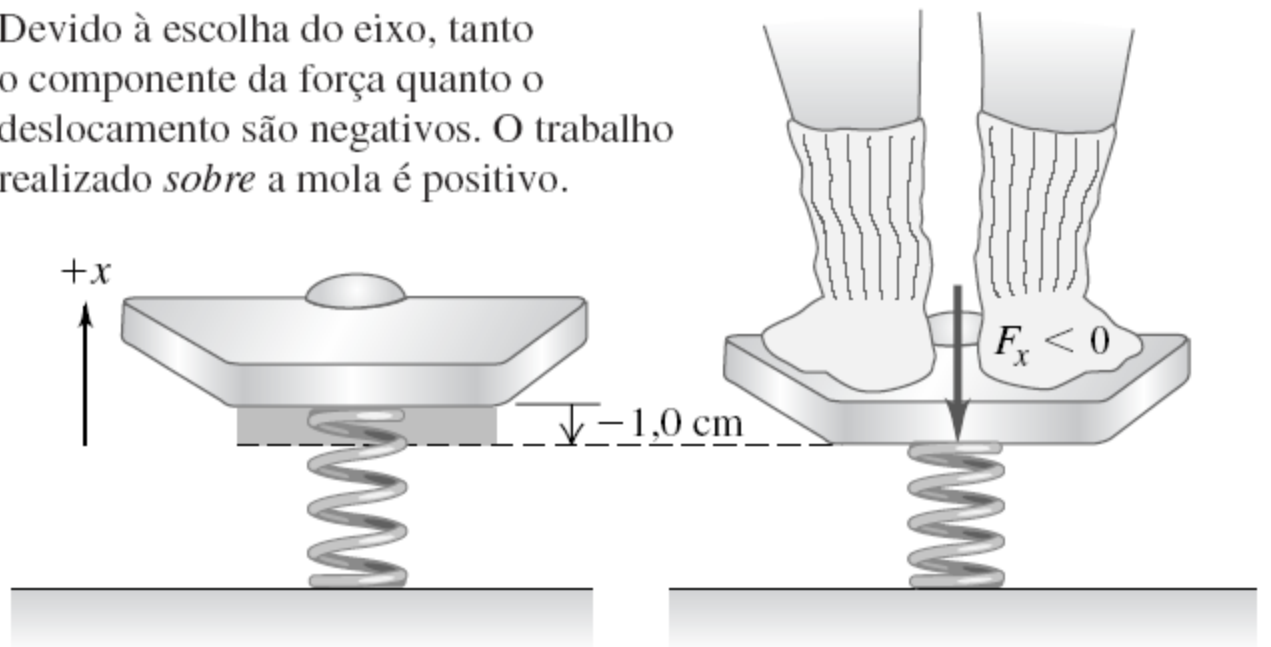
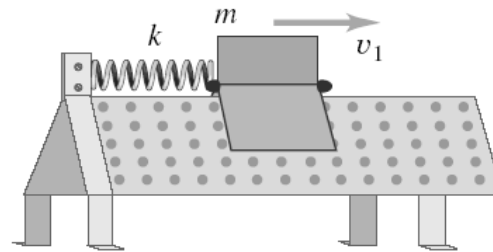
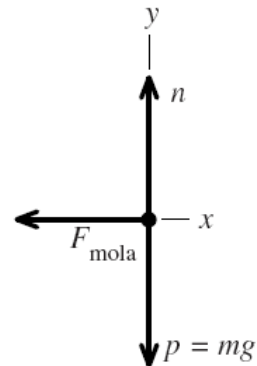


Figura 6.21 Comprimindo uma balança de mola.

(a)



(b) Diagrama do corpo livre para o cavaleiro sem atrito.



(c) Diagrama do corpo livre para o cavaleiro com atrito cinético.

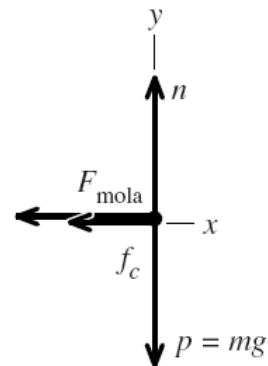
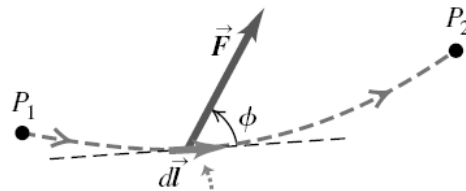


Figura 6.22 (a) Um cavaleiro ligado pela extremidade de uma mola presa a um trilho de ar. (b) e (c) Diagramas do corpo livre.

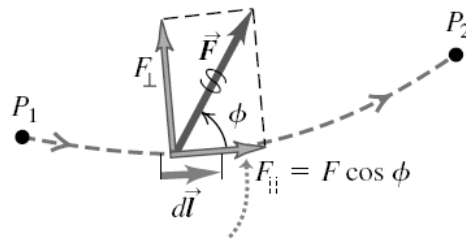
(a)



Durante um deslocamento infinitesimal $d\vec{l}$,
o trabalho dW realizado pela força \vec{F} é dado por:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = F \cos \phi dl$$

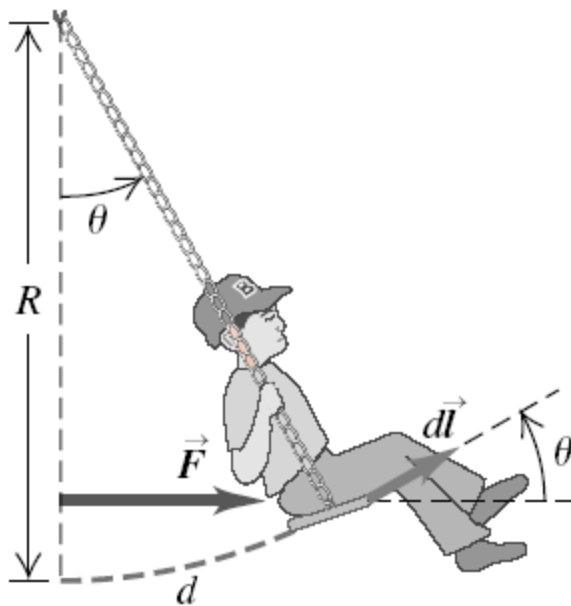
(b)



A força que contribui para o trabalho realizado
por \vec{F} é o componente da força paralelo ao
deslocamento, $F_{\parallel} = F \cos \phi$.

Figura 6.23 Uma força \vec{F} que varia em módulo, direção e sentido atua sobre uma partícula que se desloca de um ponto P_1 a um ponto P_2 ao longo de uma curva.

(a)



(b) Diagrama do corpo livre para João (desprezando-se o peso das correntes)

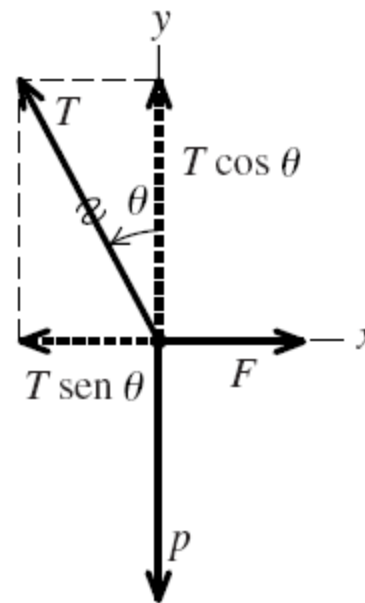


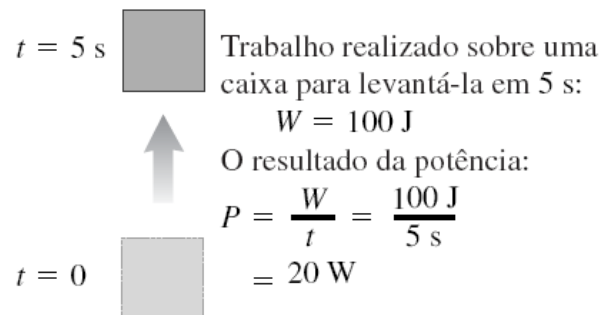
Figura 6.24 (a) Empurrando seu primo João em um balanço. (b) Diagrama do corpo livre.

Potência: a potência é a taxa temporal de realização de um trabalho. A potência média P_m é a quantidade de trabalho ΔW realizada em um intervalo de tempo Δt e dividida por esse intervalo de tempo. A potência instantânea é o limite da velocidade média quando Δt tende a zero. Quando uma força \vec{F} atua sobre uma partícula que se move com velocidade \vec{v} , a potência instantânea (taxa com a qual a força realiza trabalho) é o produto escalar de \vec{F} e \vec{v} . A exemplo do trabalho e da energia cinética, a potência é uma grandeza escalar. A unidade de potência no sistema SI é 1 watt = 1 joule/segundo (1 W = 1 J/s).

$$P_m = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt}$$

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$



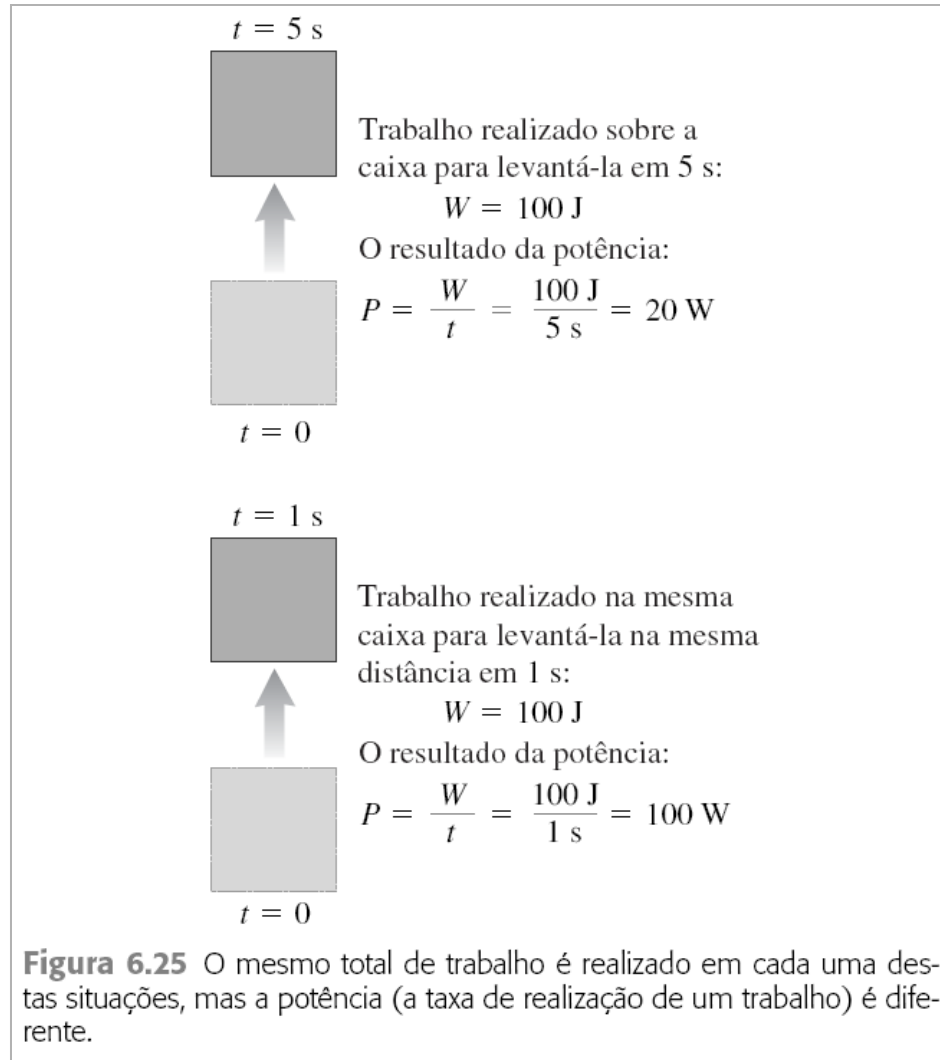




Figura 6.26 O valor do *horsepower* deriva de experiências conduzidas por James Watt, que mediu que um cavalo poderia produzir 33000 pés-libra de trabalho por minuto ao içar carvão de uma mina.

(a)



(b)



Figura 6.27 (a) Um avião movido a hélice e (b) Um avião a jato moderno.

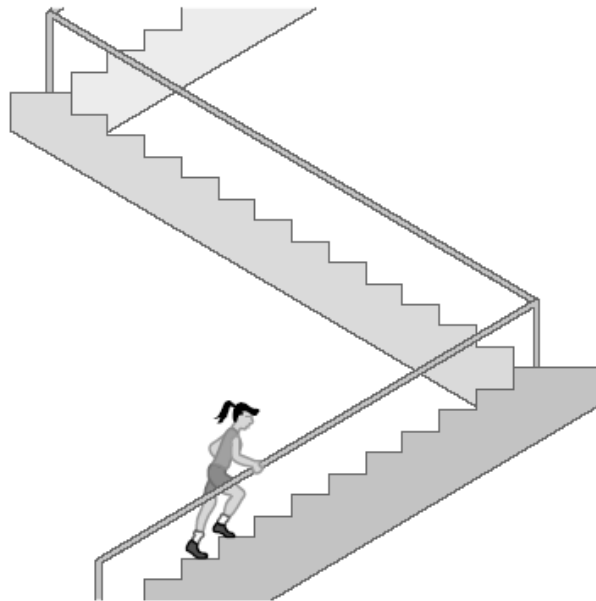


Figura 6.28 Qual a potência necessária para subir as escadas até o topo da Torre Sears em Chicago em 15 minutos?