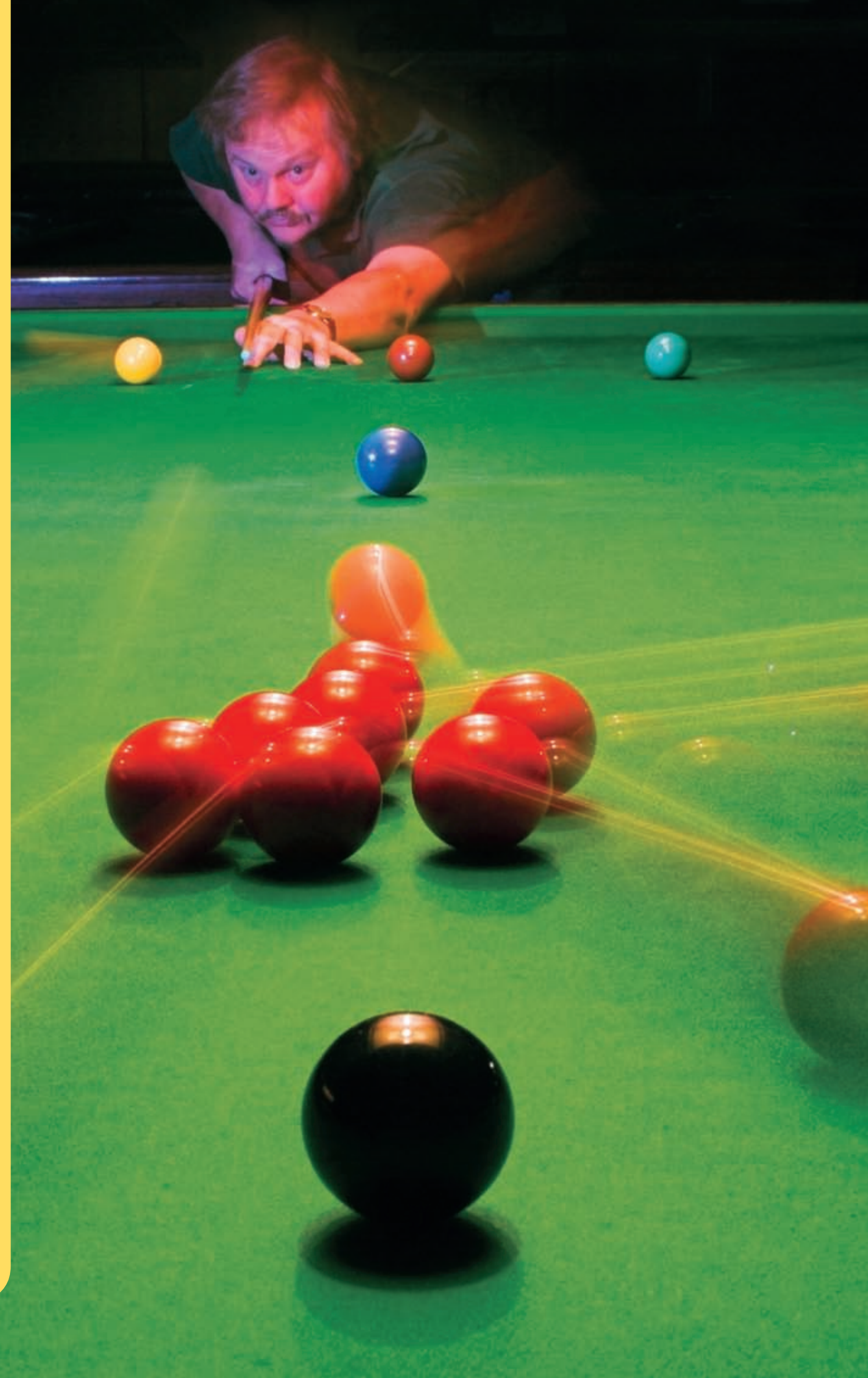
UNIDADE E

Capítulo 16

Impulso e quantidade de movimento

Uma partida de bilhar é um excelente laboratório de colisões. Durante o jogo, as bolas colidem, trocam energia e alteram o sentido dos seus movimentos, obedecendo uma lei muito importante da Física: a quantidade de movimento sempre se conserva.



O impulso e a quantidade de movimento são duas grandezas vetoriais relacionadas pelo teorema do impulso. A conservação da quantidade de movimento é um dos princípios fundamentais da Física. Sua aplicação nos aceleradores de partículas permitiu uma série de descobertas responsáveis por grande parcela do desenvolvimento científico de nossa era.

Seção 16.1

Impulso de uma força

Objetivos

- Conceituar impulso de uma força constante.
- Conhecer as unidades de medida do impulso.
- Calcular a intensidade do impulso de uma força constante por meio do gráfico $F \times t$.
- Generalizar o cálculo da intensidade do impulso de uma força de direção constante e intensidade variável, por meio do gráfico $F \times t$.

Termos e conceitos

- **impulso**

Considerando que uma força atua num corpo durante um certo intervalo de tempo, cabem as perguntas: Será que o produto da força pelo intervalo de tempo tem, em Física, tanta importância quanto o produto da força pelo deslocamento? Será que esse produto também está relacionado a algum princípio de conservação?

Para ambas as questões a resposta é positiva. O produto da força pelo intervalo de tempo constitui o **impulso da força** e é muito importante nos fenômenos físicos. Essa grandeza está associada, como veremos, ao **princípio da conservação da quantidade de movimento**.

Considere uma força constante $\vec{F}$ atuando num ponto material durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$ (**fig. 1**). O **impulso** $\vec{I}$ dessa força constante nesse intervalo de tempo é a grandeza vetorial dada por:

$$\boxed{\vec{I} = \vec{F}\Delta t}$$

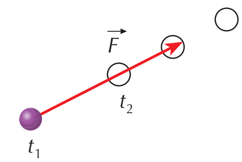


Figura 1.

Sendo uma **grandeza vetorial**, o impulso possui intensidade, direção e sentido.

- Intensidade (módulo): $|\vec{I}| = |\vec{F}|\Delta t$
- Direção: a mesma de $\vec{F}$ (paralelo a $\vec{F}$)
- Sentido: o mesmo de $\vec{F}$ (pois Δt é positivo)

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de intensidade do impulso é **newton × segundo (N · s)**.

A partir do gráfico da intensidade F da força atuante em função do tempo, é possível calcular a intensidade do impulso. Na **figura 2**, é mostrado o gráfico em questão para uma força $\vec{F}$ constante. A intensidade do impulso no intervalo de tempo Δt considerado é numericamente igual à área do retângulo destacado nesse gráfico. Essa área é dada por:

$$A = F\Delta t \Rightarrow \boxed{A = I} \text{ (numericamente)}$$

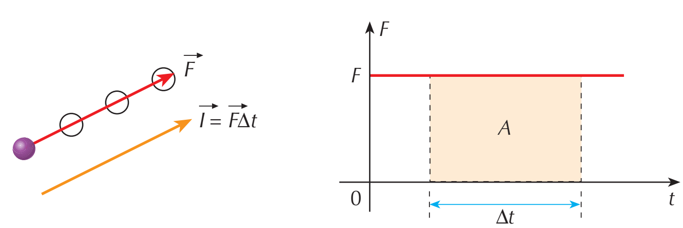


Figura 2.

Na intenção de marcar o gol, o jogador de handebol aplica uma força na bola durante um intervalo de tempo, conferindo-lhe impulso.

Se a força $\vec{F}$ tem direção constante e se sua intensidade varia em função do tempo, de acordo com o gráfico da **figura 3**, para a determinação do impulso devemos recorrer necessariamente ao cálculo de áreas. A área A_1 destacada (**fig. 3A**) representa numericamente a intensidade do impulso num curto intervalo de tempo. A soma de áreas como a anterior, considerando intervalos de tempo Δt extremamente pequenos ($\Delta t \to 0$), é a área total A delimitada pela curva da função e pelo eixo do tempo (**fig. 3B**), que numericamente é a intensidade do impulso da força no intervalo de tempo t_1 a t_2.

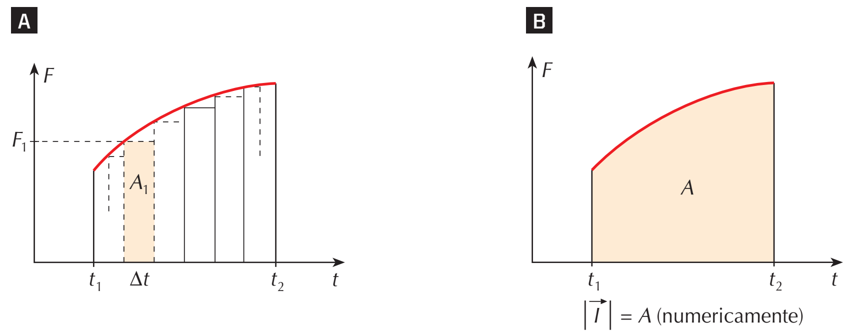
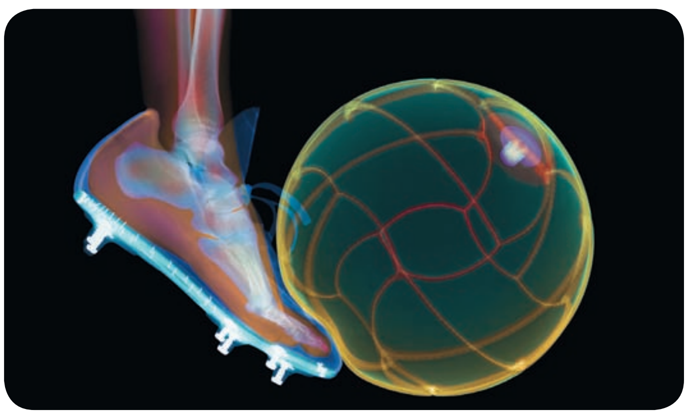


Figura 3.



O pé do jogador está aplicando um impulso à bola.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 142 Ao dar o saque "viagem ao fundo do mar" num jogo de vôlei, um jogador aplica uma força de intensidade $6{,}0 \cdot 10^2$ N sobre a bola, durante um intervalo de tempo de $1{,}5 \cdot 10^{-1}$ s. Calcule a intensidade do impulso da força aplicada pelo jogador.

Solução:
Sendo $F = 6{,}0 \cdot 10^2$ N a intensidade da força aplicada e $\Delta t = 1{,}5 \cdot 10^{-1}$ s o intervalo de tempo de sua ação, a intensidade do impulso será dada por:

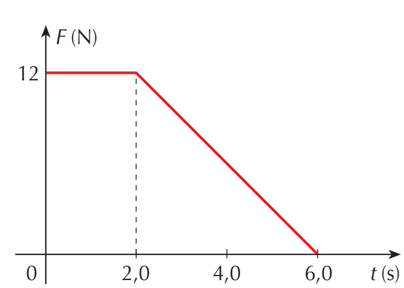
$$I = F\Delta t \Rightarrow I = (6{,}0 \cdot 10^2) \cdot (1{,}5 \cdot 10^{-1}) \Rightarrow \boxed{I = 90 \text{ N} \cdot \text{s}}$$

Resposta: 90 N · s

R. 143 Uma partícula se movimenta sob ação de uma força de direção constante e cuja intensidade varia com o tempo de acordo com o gráfico. Determine:

a) o módulo do impulso da força no intervalo de tempo de 0 a 6,0 s;

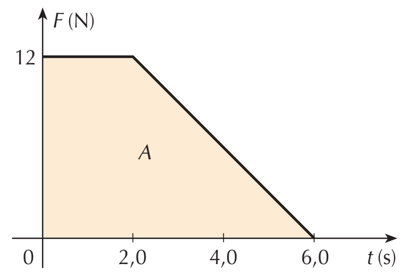
b) a intensidade da força constante que produz o mesmo impulso que a força dada no intervalo de tempo de 0 a 6,0 s.



Capítulo 16 • Impulso e quantidade de movimento

Solução:

a) O módulo do impulso no intervalo de tempo de 0 a 6,0 s corresponde numericamente à área A da figura (área do trapézio):



$$A = \frac{6,0 + 2,0}{2} \cdot 12 = 48 \Rightarrow \boxed{I = 48 \text{ N} \cdot \text{s}}$$

b) A força constante que produz o mesmo impulso que uma força variável no mesmo intervalo de tempo é chamada **força média**. No caso, para calcular sua intensidade, podemos usar a fórmula:

$$I = F\Delta t \Rightarrow 48 = F \cdot 6,0 \Rightarrow \boxed{F = 8,0 \text{ N}}$$

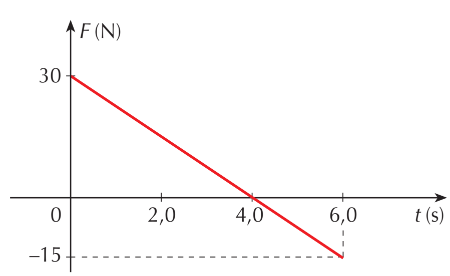
Respostas: a) 48 N · s; b) 8,0 N

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 380 Uma força age sobre um corpo durante 2 s na direção vertical, orientada de baixo para cima, com intensidade de 20 N. Dê as características (direção, sentido e intensidade) do impulso dessa força.

P. 381 Uma partícula de massa 0,6 kg está em queda livre. Dê as características do impulso do peso da partícula durante 3 s de movimento. (Dado: $g = 10 \text{ m/s}^2$.)

P. 382 Uma partícula se movimenta sob ação de uma força de direção constante e cujo valor algébrico varia com o tempo, de acordo com o gráfico.



Determine:

a) o módulo do impulso da força nos intervalos de tempo de 0 a 4,0 s e de 0 a 6,0 s;

b) a intensidade da força constante que produz o mesmo impulso da força dada no intervalo de tempo de 0 a 6,0 s.

Observação:

Valor algébrico negativo da força no gráfico indica que a força apresenta sentido oposto ao inicial.

Seção 16.2

Quantidade de movimento de um corpo

Objetivos

- Conceituar quantidade de movimento de um corpo e de um sistema de corpos.
- Conhecer a unidade de medida da quantidade de movimento.

Termos e conceitos

- quantidade de movimento

Considere um corpo de massa m com velocidade $\vec{v}$ num determinado referencial (**fig. 4**). A **quantidade de movimento**, ou **momento linear**, desse corpo é a grandeza vetorial dada por:

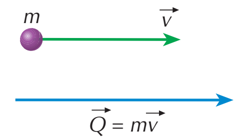


Figura 4.

$$\boxed{\vec{Q} = m\vec{v}}$$

Sendo uma grandeza vetorial, a **quantidade de movimento** possui intensidade, direção e sentido.

- Intensidade (módulo): $|\vec{Q}| = m|\vec{v}|$
- Direção: a mesma de $\vec{v}$ (paralela a $\vec{v}$)
- Sentido: o mesmo de $\vec{v}$ (pois m é positivo)

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade do módulo da quantidade de movimento é o **quilograma × metro por segundo (kg · m/s)**.

Quantidade de movimento de um sistema de corpos

A quantidade de movimento de um sistema de corpos, num certo referencial e num instante t, é a soma vetorial das quantidades de movimento de cada corpo, nesse instante. Assim, sendo $\vec{Q}_1$, $\vec{Q}_2$, ..., $\vec{Q}_n$ as quantidades de movimento dos corpos, no instante t, a quantidade de movimento $\vec{Q}$ do sistema será:

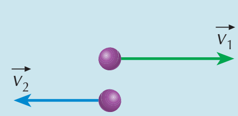
$$\boxed{\vec{Q} = \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2 + \ldots + \vec{Q}_n}$$

Por exemplo, considere duas pequenas esferas de massas $m_1 = m_2 = m$ com velocidade $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$ de módulos $v_1 = 4v$ e $v_2 = 3v$. O módulo da quantidade de movimento de cada esfera é dado por:

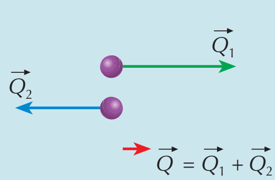
$$Q_1 = m_1 \cdot v_1 = m \cdot 4v \Rightarrow Q_1 = 4m \cdot v$$
$$Q_2 = m_2 \cdot v_2 = m \cdot 3v \Rightarrow Q_2 = 3m \cdot v$$

Vamos determinar a quantidade de movimento do sistema de esferas para dois casos:

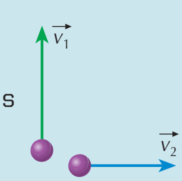
a) $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$ têm mesma direção e sentidos opostos



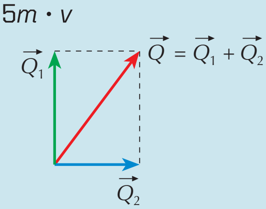
$$Q = Q_1 - Q_2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = 4m \cdot v - 3m \cdot v \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = m \cdot v$$



b) $\vec{v}_1$ e $\vec{v}_2$ têm direções perpendiculares entre si



$$Q^2 = Q_1^2 + Q_2^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q^2 = (4m \cdot v)^2 + (3m \cdot v)^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q = 5m \cdot v$$



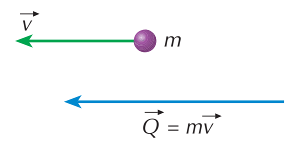
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R.144 Uma partícula de massa m = 0,20 kg possui, num certo instante, velocidade $\vec{v}$ de módulo v = 10 m/s, direção horizontal e sentido da direita para a esquerda. Determine, nesse instante, o módulo, a direção e o sentido da quantidade de movimento da partícula.

Solução:
No instante considerado a quantidade de movimento tem as seguintes características:

- módulo: $Q = mv$

$$Q = 0{,}20 \cdot 10 \Rightarrow \boxed{Q = 2{,}0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}$$



- direção: a mesma de $\vec{v}$, isto é, horizontal
- sentido: o mesmo de $\vec{v}$, isto é, da direita para a esquerda

Resposta: 2,0 kg · m/s, horizontal, da direita para a esquerda.

R.145 Uma partícula de massa m = 0,5 kg realiza um movimento obedecendo à função horária $s = 5 + 2t + 3t^2$, para s em metros e t em segundos. Determine o módulo da quantidade de movimento da partícula no instante $t = 2$ s.

Solução:
Comparando $s = 5 + 2t + 3t^2$ com

$s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}\alpha t^2$, concluímos que $v_0 = 2$ m/s e $\alpha = 6$ m/s^2.

De $v = v_0 + \alpha t$, vem: $v = 2 + 6t$

Para $t = 2$ s, resulta: $v = 2 + 6 \cdot 2 \Rightarrow v = 14$ m/s

Sendo $Q = mv$, vem: $Q = 0{,}5 \cdot 14 \Rightarrow \boxed{Q = 7 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}$

Resposta: 7 kg · m/s

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.383 Uma partícula de massa 2,0 kg apresenta, num certo instante, velocidade horizontal, orientada da esquerda para a direita com módulo igual a 5,0 m/s. Determine as características (direção, sentido e intensidade) da quantidade de movimento da partícula nesse instante.

P.384 Um móvel se desloca numa trajetória retilínea, obedecendo à função horária $s = 3 + 4t - 4t^2$. Sendo 4 kg a massa do móvel, determine o módulo da quantidade de movimento desse móvel nos instantes:
a) $t = 0$; **b)** $t = 0{,}5$ s; **c)** $t = 4$ s.

P.385 No exercício anterior, compare o sentido da quantidade de movimento nos instantes $t = 0$ e $t = 4$ s.

P.386 A quantidade de movimento de uma partícula de massa 0,20 kg tem módulo 1,0 kg · m/s. Determine a energia cinética da partícula.

P.387 Uma partícula de massa 0,10 kg parte do repouso com aceleração constante. Após 10 s encontra-se a 50 m da posição de partida. Determine o módulo da quantidade de movimento nesse instante.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore28.htm (acesso em julho/2009), leia o artigo *A polêmica entre os conceitos de quantidade de movimento, força-viva, energia cinética e impulso.*

Seção 16.3

Teorema do impulso

Objetivos

- Compreender a relação entre impulso e quantidade de movimento.
- Enunciar o teorema do impulso.
- Observar a equivalência entre as unidades de intensidade do impulso e módulo da quantidade de movimento.

Termos e conceitos

- força resultante
- subtração vetorial

Considere um corpo de massa m submetido a um conjunto de forças cuja resultante é $\vec{F}_R$, suposta constante e de mesma direção da velocidade (**fig. 5A**).

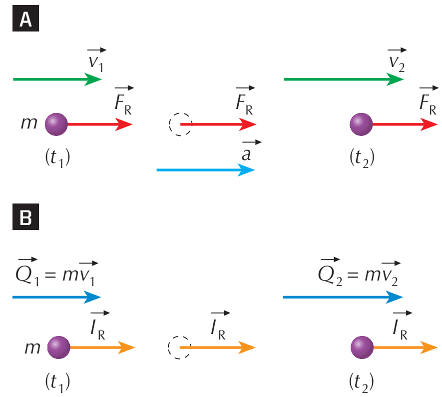


Figura 5.

Pelo princípio fundamental da Dinâmica:

$$\vec{F}_R = m\vec{a}$$

Sendo $\vec{a} = \dfrac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$, temos:

$$\vec{F}_R = m \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

$$\vec{F}_R\Delta t = m\Delta\vec{v} = m \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\vec{F}_R\Delta t = m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1$$

Como $\vec{F}_R\Delta t = \vec{I}_R$, $m\vec{v}_2 = \vec{Q}_2$ e $m\vec{v}_1 = \vec{Q}_1$ (**fig. 5B**), vem:

$$\boxed{\vec{I}_R = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1 = \Delta\vec{Q}}$$

O impulso da força resultante num intervalo de tempo é igual à variação da quantidade de movimento do corpo no mesmo intervalo de tempo.

O enunciado anterior é conhecido como **teorema do impulso**, de validade geral para qualquer tipo de movimento.

O teorema do impulso:

- introduz os conceitos de impulso e de quantidade de movimento;
- estabelece um critério para a medida da quantidade de movimento: sua variação $\Delta\vec{Q} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$ é o impulso da força resultante.

Em vista do teorema do impulso, podemos concluir que, no Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade do módulo de impulso **(newton × segundo)** e a do módulo de quantidade de movimento **(quilograma × metro por segundo)** são equivalentes, não tendo nomes especiais.

Ao rebater a bola, o jogador de beisebol imprime um impulso, o que altera a quantidade de movimento da bola.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *O air bag*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 146 Uma força constante atua durante 5,0 s sobre uma partícula de massa 2,0 kg, na direção e no sentido de seu movimento, fazendo com que sua velocidade escalar varie de 5,0 m/s para 9,0 m/s.

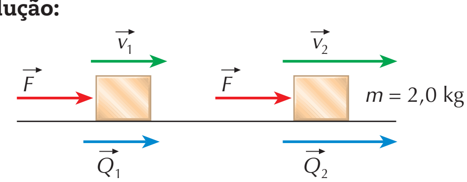
Determine:

a) o módulo da variação da quantidade de movimento da partícula;

b) a intensidade do impulso da força atuante;

c) a intensidade da força.

Solução:



a) As quantidades de movimento inicial $\vec{Q}_1$ e final $\vec{Q}_2$ da partícula são dadas por:

$$\vec{Q}_1 = m\vec{v}_1 \quad \text{e} \quad \vec{Q}_2 = m\vec{v}_2$$

Sendo $v_1 = 5,0$ m/s e $v_2 = 9,0$ m/s as velocidades escalares inicial e final, os módulos das quantidades de movimento valem:

$$Q_1 = mv_1 = 2,0 \cdot 5,0 \Rightarrow Q_1 = 10 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$
$$Q_2 = mv_2 = 2,0 \cdot 9,0 \Rightarrow Q_2 = 18 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Como $\vec{Q}_1$ e $\vec{Q}_2$ têm a mesma direção e o mesmo sentido, o módulo da variação da quantidade de movimento é:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = 18 - 10 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{\Delta Q = 8,0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}$$

b) Aplicando o teorema do impulso à situação considerada: $\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$

Como o impulso tem a mesma direção e o mesmo sentido que as quantidades de movimento, vale escrever, para sua intensidade:

$$I = Q_2 - Q_1 = 18 - 10 \Rightarrow \boxed{I = 8,0 \text{ N} \cdot \text{s}}$$

c) Como $\vec{I} = \vec{F}\Delta t$, a intensidade da força será dada por:

$$I = F\Delta t \Rightarrow \frac{I}{\Delta t}$$

Sendo $\Delta t = 5,0$ s, vem: $F = \dfrac{8,0}{5,0} \Rightarrow \boxed{F = 1,6 \text{ N}}$

Respostas: a) 8,0 kg · m/s; b) 8,0 N · s; c) 1,6 N

R. 147 Um corpo de massa $m = 10$ kg possui velocidade $\vec{v}_1$ de direção horizontal e intensidade 3 m/s. Recebe um impulso $\vec{I}$ de uma força $\vec{F}$ que altera sua velocidade inicial $\vec{v}_1$ para $\vec{v}_2$, perpendicular a $\vec{v}_1$ e de intensidade igual a 4 m/s. Determine o impulso $\vec{I}$ dessa força $\vec{F}$.

Solução:

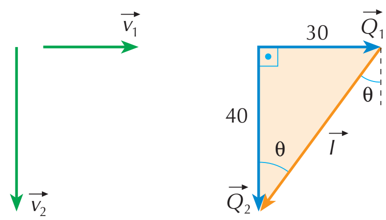
Intensidades das quantidades de movimento:

$$Q_1 = mv_1 = 10 \cdot 3 \Rightarrow Q_1 = 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$
$$Q_2 = mv_2 = 10 \cdot 4 \Rightarrow Q_2 = 40 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

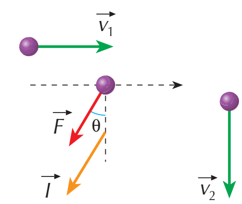
Para a determinação do impulso $\vec{I}$ temos que fazer uma subtração vetorial (teorema do impulso):

$$\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$$

A intensidade $\vec{I}$ na figura pode ser obtida a partir do teorema de Pitágoras aplicado ao triângulo destacado:



$$|\vec{I}|^2 = 30^2 + 40^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow |\vec{I}| = I = 50 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{I = 50 \text{ N} \cdot \text{s}}$$



Sua direção θ com a vertical pode ser dada por:

$$\text{tg}\,\theta = \frac{30}{40} \Rightarrow \text{tg}\,\theta = 0,75$$

Resposta: módulo: 50 N · s; direção: θ é o ângulo cuja tangente vale 0,75; sentido: indicado na figura

Observação:

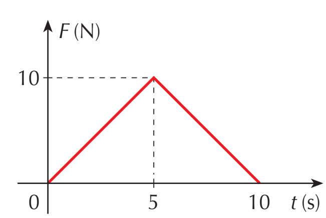
Entenda o significado físico do impulso: a velocidade $\vec{v}_1$ horizontal, do móvel, muda de direção, passando a $\vec{v}_2$, na direção perpendicular, ao receber a força $\vec{F}$ e, consequentemente, um impulso na direção inclinada θ.

R. 148 O gráfico abaixo mostra a variação da intensidade da força $\vec{F}$ de direção constante que atua num ponto material de massa $m = 2$ kg. Admita em $t = 0$, $v_0 = 0$.

Determine:

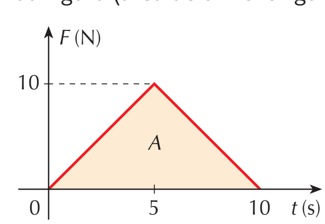
a) o módulo do impulso de $\vec{F}$ no intervalo de tempo de 0 a 10 s;

b) sua velocidade em $t = 10$ s.



Solução:

a) O módulo de $\vec{I}$ corresponde numericamente à área A da figura (área de um triângulo):



$$A = \frac{10 \cdot 10}{2} = 50 \Rightarrow \boxed{I = 50 \text{ N} \cdot \text{s}}$$

b) Pelo teorema do impulso: $\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$

De 0 a 10 s, temos: $\vec{I} = \vec{Q}_{10} - \vec{Q}_0$

Como $\vec{Q}_0 = 0$ (pois $v_0 = 0$), vem:

$$\vec{I} = \vec{Q}_{10} \Rightarrow I = mv_{10} \Rightarrow 50 = 2v_{10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{v_{10} = 25 \text{ m/s}}$$

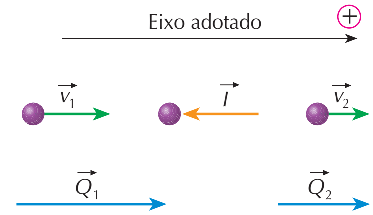
Respostas: a) 50 N · s; b) 25 m/s

R. 149 Um projétil de massa 20 g incide horizontalmente sobre uma tábua com velocidade de 500 m/s e a abandona com velocidade horizontal e de mesmo sentido de valor 300 m/s. Qual a intensidade do impulso aplicado ao projétil pela tábua?

Solução:
Intensidades das quantidades de movimento:

$$Q_1 = mv_1 = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \Rightarrow Q_1 = 10 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$
$$Q_2 = mv_2 = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \Rightarrow Q_2 = 6{,}0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Para a determinação do impulso $\vec{I}$ devemos fazer a subtração vetorial: $\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$. Entretanto, como $\vec{Q}_2$, $\vec{Q}_1$ e $\vec{I}$ têm, neste caso, mesma direção, a igualdade vetorial anterior transforma-se numa igualdade escalar, **adotando-se um eixo**.



Na figura, $\vec{Q}_1$ e $\vec{Q}_2$ têm o mesmo sentido do eixo adotado e $\vec{I}$ tem sentido oposto. Indicando por I, Q_1 e Q_2 os módulos dos vetores em questão, de $\vec{I} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$, vem:

$$-I = Q_2 - Q_1 \Rightarrow -I = 6{,}0 - 10 \Rightarrow \boxed{I = 4{,}0 \text{ N} \cdot \text{s}}$$

Resposta: 4,0 N · s

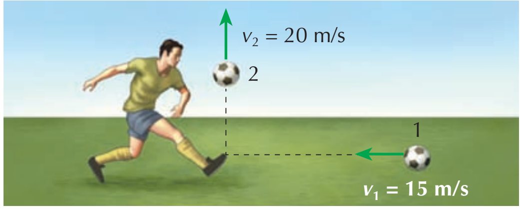
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 388 Um móvel de massa 3,0 kg desloca-se horizontalmente com velocidade escalar igual a 15 m/s constante. Num dado instante, passa a atuar sobre o móvel uma força constante de intensidade 2,5 N, durante 4,0 s, na mesma direção e no mesmo sentido do movimento. Determine:
a) a intensidade do impulso da força atuante;
b) o módulo da quantidade de movimento do móvel antes da ação da força;
c) o módulo da quantidade do movimento do móvel no instante em que a força deixa de agir.

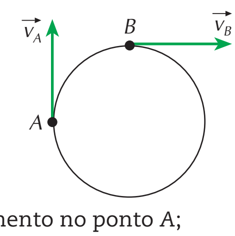
P. 389 Um corpo é lançado verticalmente para cima com velocidade inicial de 20 m/s. Sendo 5,0 kg a massa do corpo, determine a intensidade do impulso da força peso entre o instante inicial e o instante em que o corpo atinge o ponto mais alto da trajetória.

P. 390 (Olimpíada Brasileira de Física) Sobre um corpo de massa de 3,0 kg, movendo-se a 5,0 m/s, age uma força de maneira que, após 10 s, sua velocidade tem o valor de 2,0 m/s em sentido oposto ao inicial. Qual o valor da intensidade da força que atuou sobre esse corpo?

P. 391 Numa partida de futebol, a bola, que se desloca horizontalmente, atinge o pé do zagueiro com velocidade $v_1 = 15$ m/s. O impulso do chute do jogador faz com que a bola adquira velocidade $v_2 = 20$ m/s, na direção vertical, imediatamente após o chute. A massa da bola é igual a 0,40 kg. Determine a intensidade do impulso que o pé do jogador imprime à bola. Despreze o peso da bola durante a interação entre o jogador e a bola.

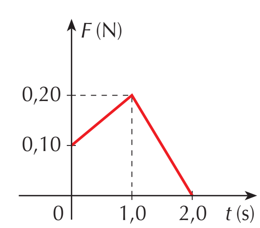


P. 392 Uma partícula de massa 4,0 kg descreve um movimento circular uniforme com velocidade escalar 10 m/s. Determine as características (direção, sentido e módulo):



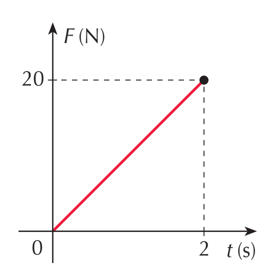
a) da quantidade de movimento no ponto A;
b) da quantidade de movimento no ponto B;
c) do impulso recebido pela partícula entre as posições A e B.

P. 393 Um carrinho de massa 100 g encontra-se em repouso quando nele passa a atuar uma força resultante $\vec{F}$, de direção constante, e cuja intensidade varia com o tempo, conforme o gráfico ao lado.



Determine:
a) a intensidade do impulso da força $\vec{F}$ no intervalo de tempo de 0 a 1,0 s;
b) a velocidade do carrinho no instante t = 2,0 s.

P. 394 O gráfico ao lado representa a variação do módulo da força resultante que atua num corpo de massa m = 2,5 kg, cuja velocidade inicial é de 10 m/s. A força é sempre paralela e de sentido contrário ao da velocidade inicial. Calcule:



a) o impulso da força entre os instantes 0 e 2 s;
b) a velocidade do corpo no instante t = 2 s.

Seção 16.4

Conservação da quantidade de movimento

Objetivos

- Reconhecer um sistema isolado de forças externas.
- Analisar a variação da quantidade de movimento em um sistema isolado.
- Aplicar o princípio da conservação da quantidade de movimento em diferentes situações.

Termos e conceitos

- conservação
- forças externas
- forças internas

Considere um sistema de corpos **isolado de forças externas**. Por sistema isolado de forças externas entenda:

1) não atuam forças externas, podendo no entanto haver forças internas entre os corpos;

2) existem ações externas, mas sua resultante é nula;

3) existem ações externas, mas tão pouco intensas (quando comparadas às ações internas) que podem ser desprezadas.

Se o sistema é isolado de forças externas, a resultante dessas forças é nula e também é nulo seu impulso. Pelo teorema do impulso, vem:

$$\vec{I}_R = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1$$

Sendo o sistema isolado: $\vec{F}_R = 0 \Rightarrow \vec{I}_R = 0$

Portanto: $\vec{0} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1 \Rightarrow \vec{Q}_2 = \vec{Q}_1$

Como os instantes t_1 e t_2 são quaisquer, decorre que a quantidade de movimento permanece constante. Assim, podemos enunciar o **princípio da conservação da quantidade de movimento**:

> A quantidade de movimento de um sistema de corpos isolado de forças externas é constante.

A quantidade de movimento pode permanecer constante ainda que a energia mecânica não permaneça, como veremos adiante nos exercícios resolvidos. Em outras palavras, os princípios da conservação da energia e da quantidade de movimento são independentes.

Na explosão da lâmpada, a soma das quantidades de movimento dos fragmentos é igual à quantidade de movimento da lâmpada antes da explosão, supondo-a isolada de forças externas.

Quando a rolha salta, a garrafa sofre um recuo, de modo a conservar a quantidade de movimento original do sistema garrafa-rolha, supondo-o isolado de forças externas.

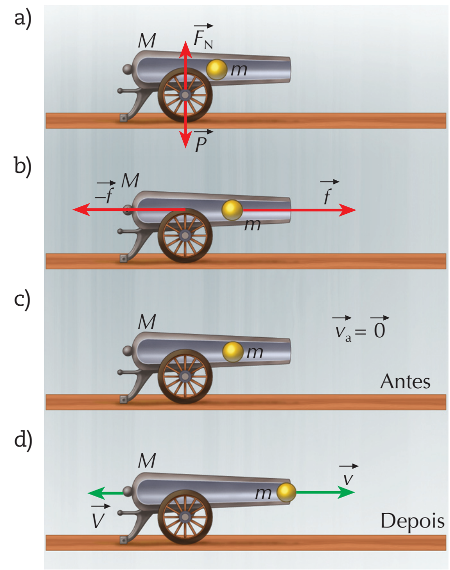
Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *A conservação da quantidade de movimento*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 150 Um canhão de artilharia horizontal de 1 tonelada (1 t) dispara uma bala de 2 kg que sai da peça com velocidade de 300 m/s. Admita a velocidade da bala constante no interior do canhão. Determine a velocidade de recuo da peça do canhão.

Solução:

O sistema de corpos canhão-bala é isolado de forças externas, pois no conjunto atuam apenas o peso e a normal, que se anulam (**fig. A**). A força que o canhão exerce na bala e a força que a bala exerce no canhão são internas (**fig. B**). Se o sistema é isolado, antes e logo depois do disparo, a quantidade de movimento permanece a mesma.



(I) Antes do disparo (**fig. C**)

No início $\vec{v}_a = \vec{0}$ (repouso):

$\vec{Q}_a = (M + m) \cdot \vec{v}_a = (M + m) \cdot \vec{0}$

Portanto: $\vec{Q}_a = \vec{0}$

(II) Depois do disparo (**fig. D**)

A bala adquire a velocidade $\vec{v}$ e o canhão recua com $\vec{V}$. A quantidade de movimento do conjunto $\vec{Q}_d$ depois do disparo é $\vec{Q}_d = M\vec{V} + m\vec{v}$.

Como o conjunto é isolado:

$\vec{Q}_a = \vec{Q}_d \Rightarrow \vec{0} = M\vec{V} + m\vec{v} \Rightarrow M\vec{V} = -m\vec{v}$ (igualdade vetorial)

O sinal (−) indica que as quantidades de movimento adquiridas pelo canhão e pela bala têm sentidos contrários, mas o mesmo módulo:

$$MV = mv \text{ (igualdade escalar)}$$

Temos, então:

$$V = \frac{mv}{M}$$

Sendo: $m = 2$ kg; $M = 1$ t $= 1.000$ kg; $v = 300$ m/s, vem:

$$V = \frac{2 \cdot 300}{1.000} = \frac{600}{1.000} \Rightarrow \boxed{V = 0{,}6 \text{ m/s}}$$

Resposta: 0,6 m/s

Observação:

Semelhante a este exercício e de mesma solução:

Figura I — Um garoto (m) caminha com $\vec{v}$ sobre um carrinho (M) que recua com $\vec{V}$.

Figura II — Um homem (m) caminha com $\vec{v}$ num barco (M) que recua com $\vec{V}$.

Figura III — Um garoto (m) sobre patins empurra sua namorada (M), também sobre patins; o garoto recua com $\vec{v}$ e a namorada adquire $\vec{V}$.

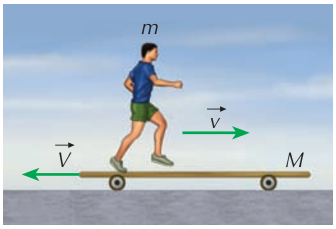


Figura I.

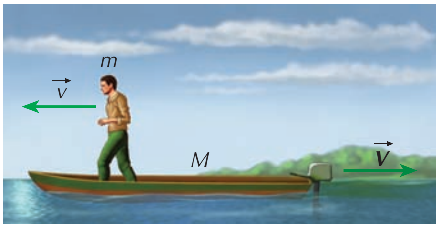


Figura II.

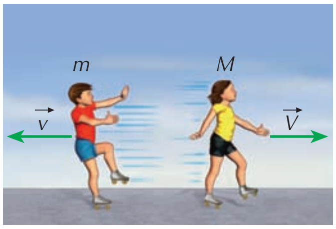


Figura III.

Em todos esses exemplos, a quantidade de movimento adquirida por um corpo tem o mesmo módulo da quantidade de movimento adquirida pelo outro:

$$\boxed{MV = mv}$$

R. 151 Um homem de massa m está sentado na popa de um barco em repouso, num lago. A massa do barco é $M = 3m$ e seu comprimento é $L = 4$ m. O homem levanta-se e anda em direção à proa. Desprezando a resistência da água, determine a distância D que o bote percorre durante o percurso do homem da popa à proa.

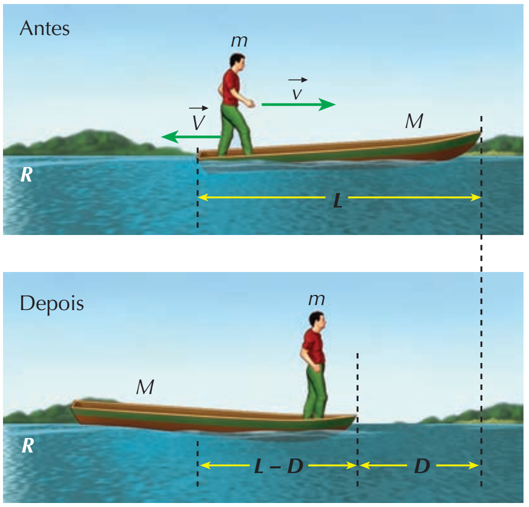
Solução:

A força de interação homem-barco é interna ao conjunto. Assim, o sistema é isolado e a quantidade de movimento permanece constante. Em relação ao referencial R na água em repouso:

[antes] $Q_a = Q_d$ [depois] $\Rightarrow mv = MV$

E, para o mesmo intervalo de tempo Δt, temos:

$$m\frac{\Delta s}{\Delta t} = M\frac{\Delta S}{\Delta t} \Rightarrow \boxed{m\Delta s = M\Delta S}$$



Cuidado com os referenciais: o homem percorre a distância L (comprimento do barco) em relação ao barco; em relação ao referencial R (água), a distância que percorre (veja figura) é $L - D$ enquanto o barco percorre D. Assim:

$$m\Delta s = M\Delta S \text{ onde } \begin{cases} \Delta s = L - D \text{ (homem)} \\ \Delta S = D \text{ (barco)} \\ M = 3m \end{cases}$$

Portanto: $m \cdot (L - D) = 3mD \Rightarrow L - D = 3D \Rightarrow$

$$L = 4D \Rightarrow D = \frac{L}{4} = \frac{4}{4} \Rightarrow \boxed{D = 1 \text{ m}}$$

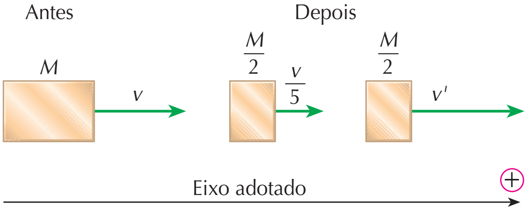
Resposta: O barco afasta-se 1 m em relação à água.

R. 152 Um foguete de massa M move-se no espaço sideral com velocidade de módulo v. Uma repentina explosão fragmenta esse foguete em duas partes iguais que continuam a se movimentar na mesma direção e no mesmo sentido que o foguete original. Uma das partes está se movimentando com velocidade de módulo $\frac{v}{5}$. Qual é o módulo da velocidade da outra parte?

Solução:

Como o corpo está isolado de forças externas, há conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{bmatrix}\text{antes da} \\ \text{explosão}\end{bmatrix} \vec{Q}_a = \vec{Q}_d \begin{bmatrix}\text{depois da} \\ \text{explosão}\end{bmatrix}$$

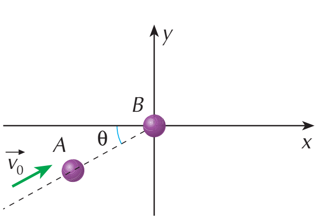


Nesse caso, todos os vetores têm mesma direção e a igualdade vetorial anterior transforma-se numa igualdade escalar, adotando-se um eixo. Em relação ao eixo da figura, de $\vec{Q}_a = \vec{Q}_d$, vem:

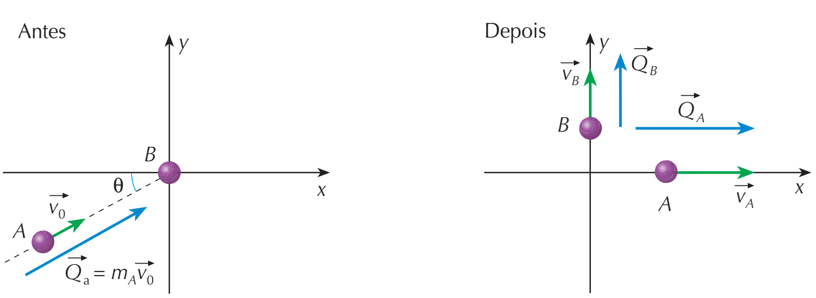
$$Mv = \frac{M}{2} \cdot \frac{v}{5} + \frac{M}{2} \cdot v' \Rightarrow v = \frac{v}{10} + \frac{v'}{2} \Rightarrow \frac{v'}{2} = v - \frac{v}{10} \Rightarrow \frac{v'}{2} = \frac{9v}{10} \Rightarrow \boxed{v' = 1{,}8v}$$

Resposta: $v' = 1{,}8v$

R. 153 Seja o corpo A de massa m_A que se move horizontalmente numa mesa lisa e se choca com o corpo B de massa m_B inicialmente em repouso. A velocidade v_0 de A é igual a 4 m/s, na direção θ indicada na figura, tal que $\cos\theta = 0{,}80$. Após o choque, A sai na direção x com velocidade v_A e B sai na direção y. Determine v_A.



Solução:



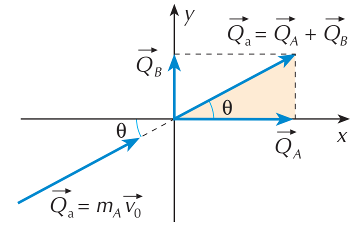
Antes do choque: $\vec{Q}_a = m_A\vec{v}_0$ (na direção θ) Depois do choque: $\vec{Q}_d = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B$ sendo: $\begin{cases} \vec{Q}_A = m_A\vec{v}_A \text{ (direção } x) \\ \vec{Q}_B = m_B\vec{v}_B \text{ (direção } y) \end{cases}$

Pelo princípio da conservação da quantidade de movimento:

$$\vec{Q}_a = \vec{Q}_d \Rightarrow \vec{Q}_a = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B$$

$\vec{Q}_a = m_A\vec{v}_0$ é o vetor soma de $\vec{Q}_A$ e $\vec{Q}_B$, como se indica pela regra do paralelogramo:

$$\vec{Q}_a = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B$$



No triângulo destacado:

$$\cos\theta = \frac{m_A v_A}{m_A v_0} = \frac{v_A}{v_0}$$

Portanto:

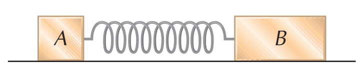
$$v_A = v_0 \cdot \cos\theta = 4 \cdot 0{,}80 \Rightarrow \boxed{v_A = 3{,}2 \text{ m/s}}$$

Resposta: 3,2 m/s

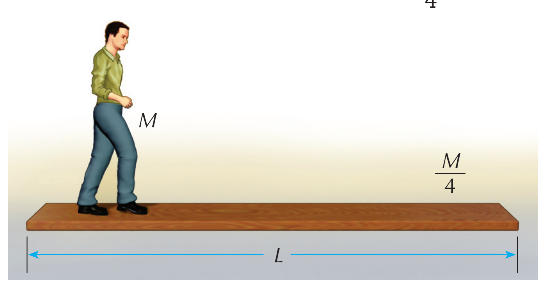
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 395 Uma peça de artilharia de massa 2 t dispara uma bala de 8 kg. A velocidade do projétil no instante que abandona a peça é 250 m/s. Calcule a velocidade de recuo da peça, desprezada a ação de forças externas.

P. 396 (UFSCar-SP) No esquema abaixo, $m_A = 1$ kg e $m_B = 2$ kg. Não há atrito entre os corpos e o plano de apoio. A mola tem massa desprezível. Estando a mola comprimida entre os blocos, o sistema é abandonado em repouso. A mola distende-se e cai por não estar presa a nenhum deles. O corpo B adquire velocidade de 0,5 m/s. Determine a energia potencial da mola no instante em que o sistema é abandonado livremente.



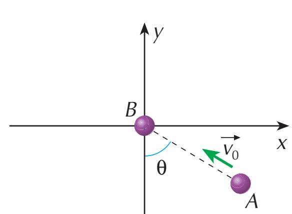
P. 397 Na figura representada abaixo, um homem de massa M está de pé sobre uma tábua de comprimento L, que se encontra em repouso numa superfície sem atrito. O homem caminha de um extremo a outro da tábua. Que distância percorreu o homem em relação ao solo se a massa da tábua é $\frac{M}{4}$?



P. 398 Uma bomba de massa m tem velocidade 50 m/s e explode em duas partes. Uma parte de massa $\frac{m}{3}$ é lançada para trás com velocidade de 30 m/s. Determine a velocidade com que é lançada a outra parte.

P. 399 O corpo A move-se sobre uma mesa horizontal e perfeitamente lisa com velocidade $v_0 = 6{,}0$ m/s. Após chocar-se com o corpo B, inicialmente em repouso, A passa a mover-se na direção do eixo x, e B na direção do eixo y. Sabendo-se que $\theta = 60°$, determine a velocidade do corpo A depois do choque.

Dados: $\text{sen } 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$; $\cos 60° = \frac{1}{2}$.



Seção 16.5

Choques

Objetivos

- Classificar os tipos de choque.
- Definir coeficiente de restituição.
- Relacionar o coeficiente de restituição ao tipo de choque.
- Analisar a variação da quantidade de movimento nos choques.

Termos e conceitos

- choque parcialmente elástico
- choque perfeitamente inelástico
- choque superelástico
- choque perfeitamente elástico
- velocidade relativa
- coeficiente de restituição

Uma colisão entre dois corpos que se movem numa mesma reta, antes e depois da colisão, é chamada de **choque frontal** ou **unidimensional**.

Considere, então, uma colisão frontal de um corpo *A* com um corpo *B* (**fig. 6**), na qual os corpos não sofram deformações permanentes. Considere ainda *A* e *B* isolados de forças externas.

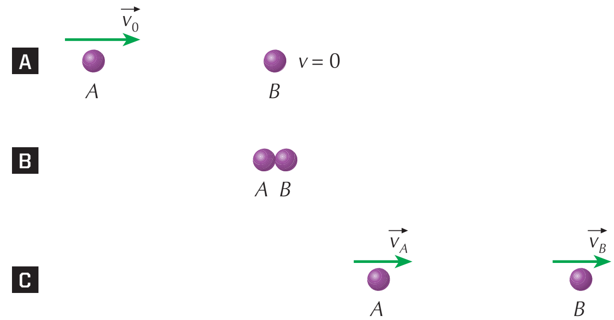


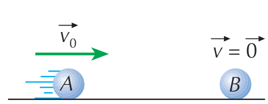
Figura 6. Choque perfeitamente elástico: $E_{c_{final}} = E_{c_{inicial}}$

Durante um intervalo de tempo muito curto, *A* e *B* sofrem deformações elásticas (**fig. 6B**), havendo transformação de energia cinética inicial de *A* em energia potencial elástica dos corpos deformados. Quase que instantaneamente os corpos restituem sua forma inicial, com a retransformação da energia potencial elástica em energia cinética. Do ponto de vista ideal admitamos que nessa deformação/restituição não haja dissipação de energia.

> Se a energia cinética final é igual à energia cinética inicial, a colisão é chamada **choque perfeitamente elástico**.

A quantidade de movimento também se conserva durante a colisão, pois o sistema de corpos é isolado de forças externas. Assim, na análise de um choque perfeitamente elástico, temos dois pares de equações, antes e depois da colisão: a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia cinética, conforme mostrado no quadro a seguir.

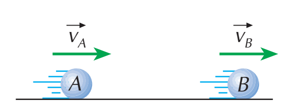
Choques perfeitamente elásticos



Antes da colisão

$$Q_a = m_A v_0$$

$$E_{c_a} = \frac{m_A v_0^2}{2}$$



Depois da colisão

$$Q_d = m_A v_A + m_B v_B$$

$$E_{c_d} = \frac{m_A v_A^2}{2} + \frac{m_B v_B^2}{2}$$

Conservação da quantidade de movimento

$$Q_a = Q_d \Rightarrow m_A v_0 = m_A v_A + m_B v_B$$

Conservação da energia cinética

$$E_{c_a} = E_{c_d} \Rightarrow m_A v_0^2 = m_A v_A^2 + m_B v_B^2$$

Teste de colisão frontal entre dois carros, cada um a 56 km/h. A filmagem do impacto pode ser usada para melhorar o *design* dos veículos e a segurança nas estradas.

Há choques diferentes dos perfeitamente elásticos: um corpo *A* (por exemplo, uma pequena esfera) choca-se com um corpo *B* muito deformável (por exemplo, um corpo feito de "massa de vidraceiro") e, após o choque, *A* se aloja no interior de *B*. Devido à resistência que o corpo *B* oferece à penetração de *A*, há dissipação de energia e, consequentemente, elevação de temperatura dos corpos.

Em choques desse tipo ainda se conserva a quantidade de movimento, pois as forças que aparecem são internas, mas não se conserva a energia cinética (veja o quadro seguinte). A energia cinética final é menor que a inicial, e a diferença corresponde à energia térmica, à energia sonora e ao trabalho de deformação permanente.

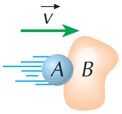
> Choques em que os corpos se deformam de tal maneira que permaneçam unidos após a colisão são denominados **choques perfeitamente inelásticos**.

No choque perfeitamente inelástico, se não soubermos a energia dissipada, só dispomos de uma equação para sua análise — a da conservação da quantidade de movimento.

Choques perfeitamente inelásticos

Antes da colisão

$$Q_a = m_A v_0 \quad E_{c_a} = \frac{m_A v_0^2}{2}$$



Depois da colisão

$$Q_d = (m_A + m_B) \cdot v \quad E_{c_d} = \frac{(m_A + m_B) \cdot v^2}{2}$$

Conservação da quantidade de movimento

$$Q_a = Q_d \Rightarrow m_A v_0 = (m_A + m_B) \cdot v$$

Máxima dissipação da energia:

$$E_{c_a} > E_{c_d}$$

Se o choque se situa entre o perfeitamente elástico e o perfeitamente inelástico, ele é chamado de **parcialmente elástico**. Nesse choque também há conservação da quantidade de movimento e perda de energia cinética, mas **os corpos se separam após o choque**, ao contrário do que acontece no perfeitamente inelástico.

Coeficiente de restituição

Para medir a variação da energia cinética eventualmente ocorrida num choque, é comum recorrer a uma grandeza adimensional chamada **coeficiente de restituição (e)**, que corresponde à razão entre a velocidade relativa* de afastamento dos corpos depois do choque e a velocidade relativa de aproximação antes do choque:

$$e = \frac{\text{velocidade relativa de afastamento (depois)}}{\text{velocidade relativa de aproximação (antes)}}$$

No choque perfeitamente elástico, como há conservação de energia cinética, a velocidade relativa de aproximação tem módulo igual ao da velocidade relativa de afastamento. Portanto, nesse choque, $e = 1$.

No choque perfeitamente inelástico, os corpos prosseguem juntos, pois há alojamento de um no outro e consequentemente é nula a velocidade relativa de afastamento (**fig. 7**). Portanto, nesse choque, $e = 0$.

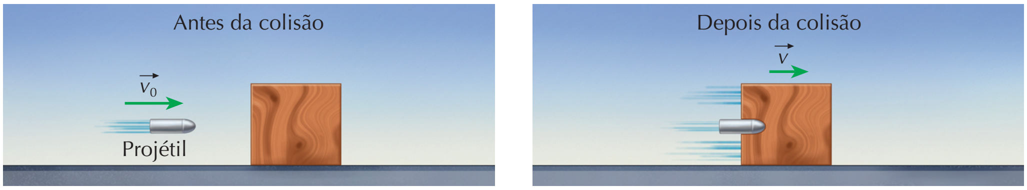


Figura 7. Choque perfeitamente inelástico: os corpos permanecem juntos após a colisão.

Entre essas situações extremas, há o choque parcialmente elástico, em que há perda de energia cinética, mas a velocidade relativa de asfastamento não é nula. Nesse tipo de choque, o coeficiente de restituição tem um valor intermediário entre 0 e 1, isto é, $0 < e < 1$.

Principais tipos de choque	Coeficiente de restituição	Energia	Quantidade de movimento
choque perfeitamente inelástico	$e = 0$	Máxima dissipação	Constante $Q_{antes} = Q_{depois}$
choque parcialmente elástico	$0 < e < 1$	Dissipação parcial	Constante $Q_{antes} = Q_{depois}$
choque perfeitamente elástico	$e = 1$	Conservação da energia cinética	Constante $Q_{antes} = Q_{depois}$

Há ainda os **choques superelásticos**, nos quais $e > 1$ e há ganho de energia, evidentemente à custa de outra forma de energia. Ocorrem frequentemente choques superelásticos nas reações nucleares: um próton atinge um núcleo de lítio, formando duas partículas que saem com energia cinética maior que a do próton incidente.

Na resolução de exercícios de choques é comum estabelecermos uma equação com a conservação da quantidade de movimento e outra com o coeficiente de restituição, em lugar da conservação ou dissipação de energia.

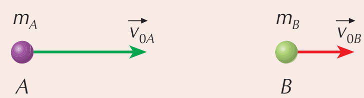
Entre na rede No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph11br/collision_br.htm (acesso em junho/2009), você pode simular colisões entre dois vagões, havendo a possibilidade de alterar a velocidade e a massa de cada um. Você pode, ainda, optar por colisões elásticas ou inelásticas e analisar o que ocorre com a quantidade de movimento e a energia cinética do conjunto, antes e depois da colisão.

* Para recordar o conceito de velocidade relativa de aproximação e de afastamento, veja o quadro apresentado no capítulo 3, página 52.

Observação

A energia cinética e o coeficiente de restituição

Considere a colisão frontal entre dois corpos, A e B, de massas m_A e m_B, respectivamente. Vamos representar os corpos imediatamente antes e imediatamente depois da colisão. Observe que, antes da colisão, A se aproxima de B e, depois da colisão, B se afasta de A.



Antes da colisão

Depois da colisão

Sejam m_A e m_B as massas dos corpos A e B, $\vec{v}_{0A}$ e $\vec{v}_{0B}$ as velocidades antes da colisão e $\vec{v}_A$ e $\vec{v}_B$ as velocidades imediatamente depois da colisão. Aplicando a conservação da quantidade de movimento e observando que os vetores têm a mesma direção, temos:

$$m_A \cdot v_{0A} + m_B \cdot v_{0B} = m_A \cdot v_A + m_B \cdot v_B \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_A \cdot (v_{0A} - v_A) = m_B \cdot (v_B - v_{0B}) \quad (1)$$

A energia cinética se conserva nos choques perfeitamente elásticos e, nos demais tipos de choque, a energia cinética inicial é maior do que a energia cinética final. Desse modo, temos:

$$\frac{m_A \cdot v_{0A}^2}{2} + \frac{m_B \cdot v_{0B}^2}{2} \geqslant \frac{m_A \cdot v_A^2}{2} + \frac{m_B \cdot v_B^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{m_A \cdot v_{0A}^2}{2} - \frac{m_A \cdot v_A^2}{2} \geqslant \frac{m_B \cdot v_B^2}{2} - \frac{m_B \cdot v_{0B}^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_A \cdot (v_{0A} + v_A) \cdot (v_{0A} - v_A) \geqslant m_B \cdot (v_B + v_{0B}) \cdot (v_B - v_{0B}) \quad (2)$$

De (1) e (2), resulta:

$$v_{0A} + v_A \geqslant v_B + v_{0B} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_{0A} - v_{0B} \geqslant v_B - v_A$$

Portanto:

velocidade relativa de aproximação (antes do choque)	$\geqslant$	velocidade relativa de afastamento (depois do choque)

Nestas condições, temos:

$$\frac{\text{velocidade relativa de afastamento (depois)}}{\text{velocidade relativa de aproximação (antes)}} \leqslant 1$$

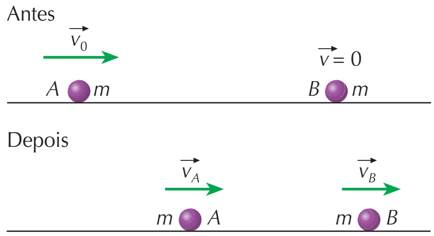
Por definição, o quociente acima é o **coeficiente de restituição**, *e*. Assim, temos:

$$e \leqslant 1$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 154 Dois corpos A e B iguais e de mesma massa m estão numa mesa perfeitamente lisa e horizontal. A choca-se com B num choque perfeitamente elástico e frontal, com velocidade v_0. Prove que, após o choque, A permanece em repouso e B adquire a velocidade v_0.

Solução:



Choque perfeitamente elástico

Pretendemos provar que, após a colisão, $v_A = 0$ e $v_B = v_0$.

(I) Conservação da quantidade de movimento

Antes da colisão: $Q_a = mv_0$

Depois da colisão: $Q_d = mv_A + mv_B$

Aplicando o princípio da conservação, temos:

$Q_a = Q_d$

$mv_0 = mv_A + mv_B$

$v_0 = v_A + v_B$ ①

(II) Coeficiente de restituição $e = 1$ (choque perfeitamente elástico)

$$e = \frac{\text{velocidade relativa de afastamento (depois)}}{\text{velocidade relativa de aproximação (antes)}}$$

velocidade relativa de aproximação (antes da colisão) $= v_0$ (pois $v_{0_B} = 0$)

velocidade relativa de afastamento (depois da colisão) $= v_B - v_A$ (admitindo evidentemente $v_B > v_A$)

$$1 = \frac{v_B - v_A}{v_0} \Rightarrow v_B - v_A = v_0 \quad ②$$

Resolvendo o sistema de equações (somando membro a membro):

$$\begin{cases} v_0 = v_A + v_B & ① \\ v_0 = v_B - v_A & ② \end{cases} \Rightarrow 2v_0 = 2v_B \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{v_B = v_0} \text{ e } \boxed{v_A = 0}$$

Observação:

A conclusão desse exercício é bastante importante:

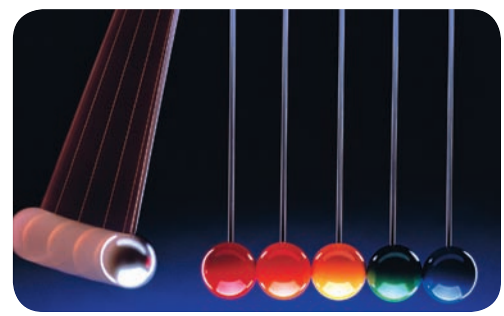
> Corpos idênticos em colisões elásticas e frontais trocam de velocidades.

Considere a seguir esferas idênticas.

Na figura I, em colisões elásticas há uma troca sucessiva de velocidades, de A para B, de B para C, ..., e a última esfera E adquire a velocidade inicial da primeira.

No pêndulo múltiplo da figura II, uma esfera abandonada troca de velocidade com as outras, elevando-se a última esfera (**figs. IIA e IIB**). Se inicialmente abandonarmos duas esferas, há trocas de velocidades e elevam-se duas esferas (**figs. IIC e IID**).

Analogamente, se corpos iguais A e B, ambos com velocidades ($v_A = 8$ m/s e $v_B = 5$ m/s), chocam-se elástica e frontalmente, trocam igualmente de velocidade ($v_A = 5$ m/s e $v_B = 8$ m/s), conforme a figura III.



Para qualquer número de elementos de um pêndulo múltiplo vale a regra: quando a primeira esfera se choca, a última se eleva.

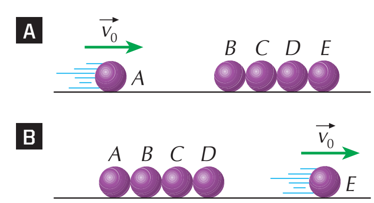


Figura I.

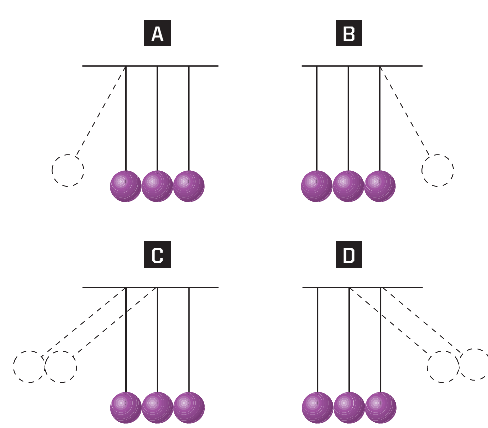


Figura II.

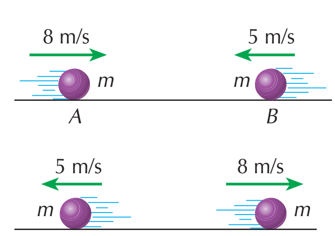
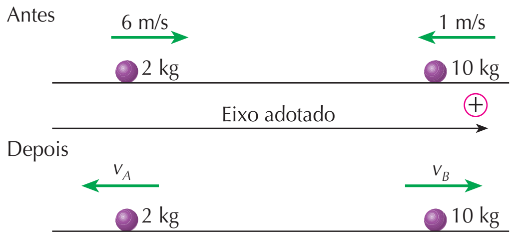


Figura III.

R. 155 Seja um choque perfeitamente elástico de dois corpos A e B. A velocidade de cada corpo está indicada na própria figura e suas massas são $m_A = 2$ kg e $m_B = 10$ kg. Determine as velocidades de A e B após o choque.

Solução:
Nesse caso não há troca de velocidades, pois as massas dos corpos não são iguais.



Choque perfeitamente elástico

(I) Conservação da quantidade de movimento
Em relação ao eixo adotado, temos:
- antes da colisão
  $Q_a = +2 \cdot 6 - 10 \cdot 1 \Rightarrow Q_a = 2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
- depois da colisão
  $Q_d = +10v_B - 2v_A$

Pelo princípio da conservação, vem:
$Q_a = Q_d \Rightarrow 2 = 10v_B - 2v_A \Rightarrow 5v_B - v_A = 1$ ①

(II) Coeficiente de restituição
velocidade relativa de aproximação (antes da colisão): 6 m/s + 1 m/s = 7 m/s
velocidade relativa de afastamento (depois da colisão): $v_B + v_A$
$e = 1$ (choque perfeitamente elástico)

$$e = \frac{\text{velocidade relativa de afastamento (depois)}}{\text{velocidade relativa de aproximação (antes)}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 = \frac{v_B + v_A}{7} \Rightarrow v_B + v_A = 7 \quad ②$$

Resolvendo o sistema:

$$\begin{cases} 5v_B - v_A = 1 & ① \\ v_B + v_A = 7 & ② \end{cases} \Rightarrow$$

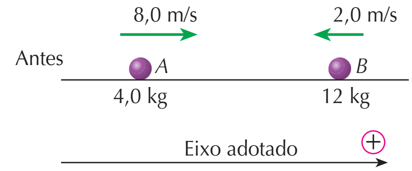
$$\Rightarrow \begin{cases} v_A = \dfrac{17}{3} \text{ m/s} \Rightarrow \boxed{v_A \simeq 5{,}67 \text{ m/s}} \\ v_B = \dfrac{4}{3} \text{ m/s} \Rightarrow \boxed{v_B \simeq 1{,}33 \text{ m/s}} \end{cases}$$

Resposta: $v_A \simeq 5{,}67$ m/s e $v_B \simeq 1{,}33$ m/s nos sentidos indicados.

Observação:
Se uma das velocidades resultasse negativa, significaria sentido contrário ao adotado para essa velocidade.

R. 156 Os dois corpos da figura, de massas $m_A = 4{,}0$ kg e $m_B = 12$ kg, deslocam-se numa mesa perfeitamente lisa, com velocidade de módulos 8,0 m/s e 2,0 m/s. Sendo $e = 0{,}30$ o coeficiente de restituição do choque entre os corpos, determine os módulos das velocidades de A e B após a colisão e o sentido de seus movimentos.

Solução:
Adotando um eixo orientado da esquerda para a direita:



Antes da colisão:
$Q_a = +4{,}0 \cdot 8{,}0 - 12 \cdot 2{,}0 \Rightarrow Q_a = 8{,}0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

Depois da colisão: $Q_d = -4{,}0 \cdot v_A + 12 \cdot v_B$
Como $Q_a = Q_d$, temos:
$8{,}0 = -4{,}0v_A + 12v_B$ (: 4)
$2{,}0 = -v_A + 3{,}0v_B$ ①
Como $e = 0{,}30$, temos:
- velocidade relativa de aproximação (antes):
  8,0 m/s + 2,0 m/s = 10 m/s
- velocidade relativa de afastamento (depois):
  $v_B + v_A$

$$e = 0{,}30 = \frac{v_B + v_A}{10} \Rightarrow v_B + v_A = 3{,}0 \quad ②$$

Resolvendo o sistema:

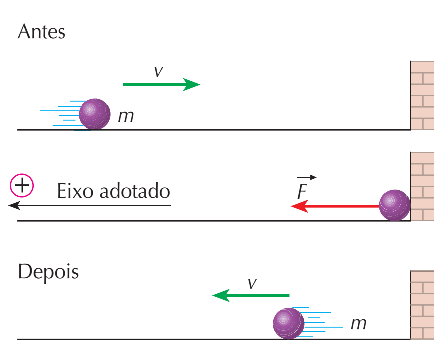
$$\begin{cases} -v_A + 3{,}0v_B = 2{,}0 & ① \\ v_A + v_B = 3{,}0 & ② \end{cases} \Rightarrow +4{,}0v_B = 5{,}0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{v_B = 1{,}25 \text{ m/s}} \text{ e } \boxed{v_A = 1{,}75 \text{ m/s}}$$

Resposta: $v_A = 1{,}75$ m/s e $v_B = 1{,}25$ m/s nos sentidos indicados.

R. 157 Considere uma bola de bilhar chocando-se perpendicularmente contra uma parede com velocidade v, num choque perfeitamente elástico. Seja m a massa da bola e Δt o intervalo de tempo que dura o choque. Supondo conhecidos m, v e Δt, determine a intensidade da força média que a parede exerce sobre a bola.

Solução:
A bola retorna com a mesma velocidade v em módulo, pois o choque é perfeitamente elástico. Adotamos um eixo no sentido de retorno da bola.



Choque perfeitamente elástico

(I) Quantidade de movimento
Antes da colisão: $Q_a = -mv$
(negativo, pois está em sentido oposto ao eixo)
Depois da colisão: $Q_d = +mv$

(II) Impulso da força média durante a colisão

$I = +F\Delta t$

Pelo teorema do impulso:

$I = Q_d - Q_a \Rightarrow F\Delta t = (+mv) - (-mv) = 2mv$

Portanto: $F\Delta t = 2mv \Rightarrow \boxed{F = \dfrac{2mv}{\Delta t}}$

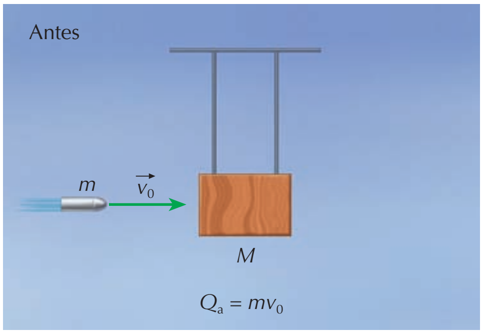
Resposta: $F = \dfrac{2mv}{\Delta t}$

R. 158 Um projétil de massa $m = 20$ g é atirado horizontalmente com velocidade v_0 contra um pêndulo vertical cuja massa pendular é $M = 2$ kg e de fácil penetração. O projétil aloja-se no pêndulo e, devido ao choque, o conjunto sobe até a altura $h = 20$ cm. Adote $g = 10$ m/s² e determine a velocidade inicial do projétil.

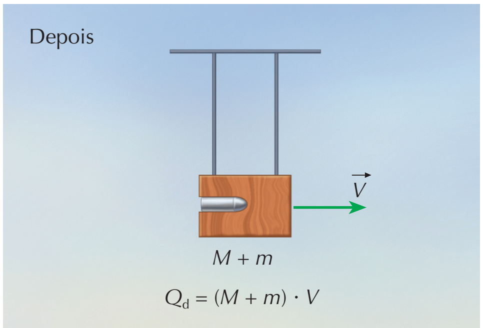
Solução:

É um choque perfeitamente inelástico, pois a bala aloja-se no pêndulo após o choque. Há perda de energia na penetração da bala, mas a quantidade de movimento do conjunto bala-pêndulo permanece constante.

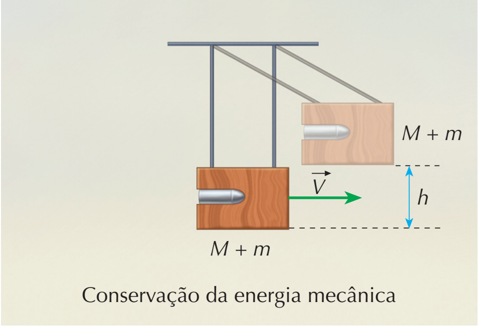
(I)



(II)



(III)



Pela conservação da quantidade de movimento, $Q_a = Q_d$ (**figs. I e II**). Então, vem:

$mv_0 = (M + m)V$ ①

Após a colisão (**fig. III**), a energia cinética do conjunto se transforma em potencial quando o pêndulo atinge a altura h:

$$\frac{(M + m) \cdot V^2}{2} = (M + m) \cdot gh \Rightarrow V = \sqrt{2gh}$$

Substituindo na expressão ①:

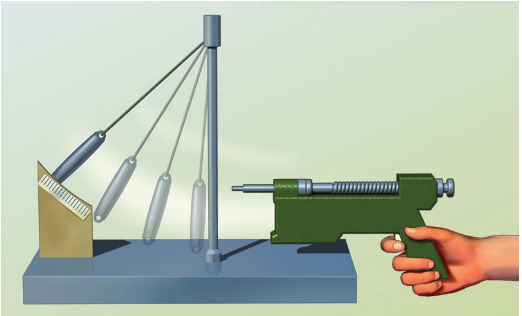
$$v_0 = \frac{M + m}{m} \cdot V \Rightarrow v_0 = \frac{M + m}{m} \cdot \sqrt{2gh}$$

Portanto:

$$v_0 = \frac{2 + 20 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}$$

$$\boxed{v_0 = 202 \text{ m/s}}$$

Resposta: 202 m/s



Pêndulo balístico usado em laboratório para a determinação da velocidade de projéteis.

Observação:

A dissipação da energia no fenômeno (**figs. I e II**) pode ser analisada como se segue.

Antes da colisão:

$$E_{c_a} = \frac{mv_0^2}{2} = \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 202^2}{2} \Rightarrow E_{c_a} \simeq 408 \text{ J}$$

Depois da colisão:

$$E_{c_d} = \frac{(M + m)V^2}{2} = \frac{(2 + 20 \cdot 10^{-3}) \cdot 2^2}{2} \Rightarrow E_{c_d} \simeq 4 \text{ J}$$

Estabelecendo uma relação entre os valores encontrados, obtemos:

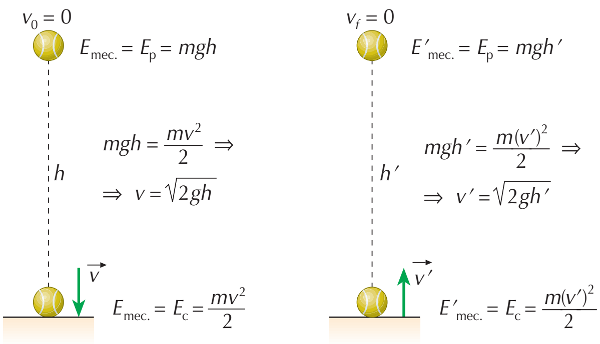
$$\frac{E_{c_d}}{E_{c_a}} = \frac{4}{408} \simeq 0{,}01 = 1\% \Rightarrow E_{c_d} \simeq 1\% \cdot E_{c_a}$$

Esse resultado significa que a energia cinética depois da colisão é apenas 1% da energia cinética inicial; foram dissipados no fenômeno 99% da energia cinética inicial.

R. 159 Uma bola de tênis, partindo do repouso, cai de uma altura h e, após atingir uma superfície, eleva-se até a altura h'. Mostre que o coeficiente de restituição e é dado pela expressão: $e = \sqrt{\dfrac{h'}{h}}$ Despreze a resistência do ar.

Solução:

A velocidade da bola, ao atingir o solo partindo da altura h, é $v = \sqrt{2gh}$ pela conservação da energia. No retorno, a bola com velocidade inicial v' atinge a altura h' tal que $v' = \sqrt{2gh'}$.



O coeficiente de restituição é:

$$e = \frac{\text{velocidade relativa de afastamento}}{\text{velocidade relativa de aproximação}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow e = \frac{v'}{v} = \frac{\sqrt{2gh'}}{\sqrt{2gh}} \Rightarrow \boxed{e = \sqrt{\frac{h'}{h}}}$$

Observação:

Se o choque for perfeitamente elástico, temos $e = 1$ e $h' = h$.

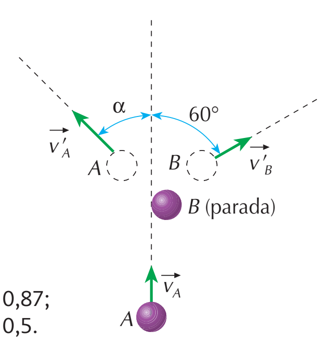
Para o choque perfeitamente inelástico, $e = 0$ e $h' = 0$.

No choque parcialmente elástico, $0 < e < 1$ e, portanto, $0 < h' < h$.

R. 160 A figura mostra o choque oblíquo perfeitamente elástico entre duas esferas idênticas *A* e *B*, estando a esfera *B* inicialmente em repouso. Sendo $v_A = 10$ m/s o módulo da velocidade inicial da esfera *A*, determine:

a) o desvio da esfera *A* em relação à sua trajetória original;

b) o módulo da velocidade da esfera *A* após o choque.



Dados:
sen 60° = cos 30° = 0,87;
sen 30° = cos 60° = 0,5.

Solução:

Choque oblíquo é aquele em que as direções em que se movem os corpos, antes e/ou depois do choque, são diferentes.

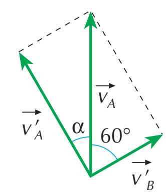
a) A quantidade de movimento se conserva, isto é, a quantidade de movimento antes é igual à quantidade de movimento depois da colisão.

$$\vec{Q}_A = \vec{Q}'_A + \vec{Q}'_B$$

Como as massas de A e B são iguais, temos:

$$m \cdot \vec{v}_A = m \cdot \vec{v}'_A + m \cdot \vec{v}'_B \Rightarrow \vec{v}_A = \vec{v}'_A + \vec{v}'_B$$

Esquematicamente, essa igualdade pode ser representada como mostra a figura abaixo.



Aplicando a lei dos cossenos, obtemos:

$$v_A^2 = v'^2_A + v'^2_B + 2\, v'_A v'_B \cdot \cos(\alpha + 60°) \quad ①$$

Sendo o choque perfeitamente elástico, conserva-se a energia cinética:

$$\frac{mv_A^2}{2} = \frac{mv'^2_A}{2} + \frac{mv'^2_B}{2} \Rightarrow v_A^2 = v'^2_A + v'^2_B \quad ②$$

Comparando ① e ②, concluímos que $\cos(\alpha + 60°) = 0$. Portanto:

$$\alpha + 60° = 90° \Rightarrow \boxed{\alpha = 30°}$$

b) Na figura, sendo $\alpha + 60° = 90°$, os dois triângulos são retângulos. Então:

$$v'_A = v_A \cdot \cos \alpha = v_A \cdot \cos 30° \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v'_A = 10 \cdot 0{,}87 \Rightarrow \boxed{v'_A = 8{,}7 \text{ m/s}}$$

Respostas: a) 30°; b) 8,7 m/s

Observação:

No choque oblíquo e perfeitamente elástico entre corpos de massas iguais, estando inicialmente um dos corpos em repouso, após o choque os corpos se deslocam em direções perpendiculares.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *A conservação da quantidade de movimento*
Vídeo: *Tipos de colisões*
Simulador: *Colisões*

P. 400 Uma bola é lançada com velocidade v_1 sobre outra, parada, idêntica e que está próxima a uma parede. Os choques são perfeitamente elásticos e frontais e ocorrem num plano horizontal, sem atrito.

a) Quantos choques ocorrem no fenômeno? Descreva-os.

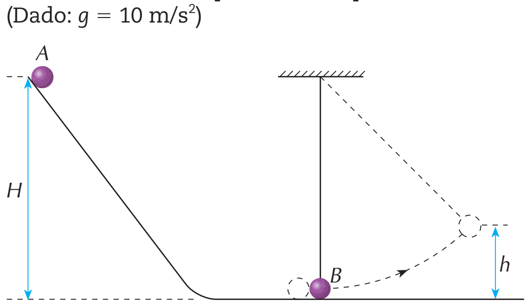
b) Quais são, após os choques, as velocidades das bolas? Justifique fisicamente.

P. 401 Um corpo de massa m choca-se frontalmente com outro de massa $4m$, que está em repouso num plano horizontal sem atrito. O choque é perfeitamente elástico e a velocidade do primeiro corpo no instante da colisão é 10 m/s. Determine as velocidades dos corpos após a colisão.

P. 402 A esfera A possui massa $m_A = 0{,}5$ kg e a esfera B possui $m_B = 3{,}0$ kg. A velocidade de A, no instante da colisão, é $v_A = 12$ m/s, e a de B, no mesmo instante, é $v_B = 1$ m/s em sentido contrário, como se indica na figura. A superfície de apoio é horizontal e sem atrito. O choque é frontal e perfeitamente elástico. Determine as novas velocidades de A e de B após o choque.

P. 403 Um vagão de 10 toneladas desloca-se a 0,90 m/s sobre trilhos horizontais, chocando-se com outro vagão carregado e de 20 toneladas, em repouso e com o freio solto. Se os dois carros engatam, determine sua velocidade após o choque e o decréscimo de energia resultante da colisão.

P. 404 A figura mostra uma esfera A que, partindo do repouso, desliza (sem rolar) ao longo de uma rampa de altura $H = 20$ m e, a seguir, ao longo de um plano horizontal, ambos sem atrito. Num dado ponto do plano horizontal, a esfera A se choca com uma esfera B de mesma massa, presa ao teto por um fio ideal. (Dado: $g = 10$ m/s^2)



Sendo esse choque parcialmente elástico com coeficiente de restituição $e = 0{,}4$, determine:

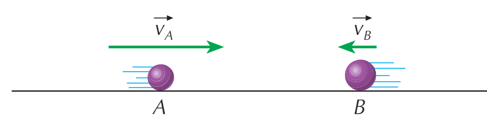
a) a velocidade com que a esfera A desliza no plano horizontal antes do choque;

b) as velocidades de A e de B imediatamente após o choque;

c) a altura máxima h atingida pela esfera B após o choque com A.

P. 405 Como indica a figura, um corpo A de massa 6,0 kg e velocidade 10 m/s choca-se com um corpo B de massa 8,0 kg inicialmente em repouso. Sendo $e = 0{,}50$ o coeficiente de restituição do choque, determine as velocidades dos corpos A e B após a colisão.

P. 406 Os corpos A e B esquematizados apresentam, nesse momento, velocidades 8,0 m/s e 4,0 m/s, respectivamente. As massas de A e B valem, respectivamente, 5,0 kg e 8,0 kg. Sendo $e = 0{,}40$ o coeficiente de restituição, determine as velocidades de A e B e o sentido de seus movimentos após a colisão.



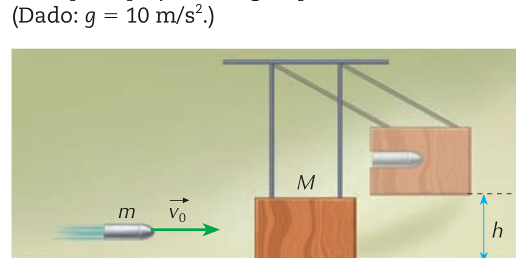
P. 407 Uma bola de 0,50 kg aproxima-se de uma parede com uma velocidade de 10 m/s e, após um choque com a parede, retorna, na mesma direção, sem alterar o módulo de sua velocidade. Determine:

a) a intensidade do impulso recebido pela bola na interação com a parede;

b) a intensidade da força média com que a parede atuou sobre a bola, supondo que a interação tenha durado 0,02 s;

c) o tipo de choque ocorrido entre a bola e a parede. Justifique.

P. 408 Na figura o projétil de massa $m = 5$ g bate no pêndulo de massa $M = 2$ kg e aí se aloja. Após o choque, o conjunto se eleva à altura $h = 5$ cm. Considere que os fios permaneçam paralelos. Calcule a velocidade com que o projétil atinge o pêndulo. (Dado: $g = 10$ m/s^2.)



P. 409 Admitindo os mesmos dados do exercício anterior, prove que a relação entre a energia cinética após a colisão E_{c_d} e a energia cinética antes da colisão E_{c_a} é dada por:

$$\frac{E_{c_d}}{E_{c_a}} = \frac{m}{m + M}$$ (onde m é a massa do projétil e M, a massa pendular).

P. 410 Uma esfera A de massa m encontra-se em repouso sobre uma superfície, quando é atingida por outra esfera B de mesma massa que se desloca com velocidade constante de intensidade 20 m/s. A esfera A passa a se movimentar formando um ângulo de 30° com a direção do movimento inicial da esfera B. Considerando que o choque é perfeitamente elástico, determine:

a) o desvio angular que sofre a esfera B em relação à sua direção original;

b) a velocidade das duas esferas após o choque.

(Dados: sen 60° = cos 30° = 0,87;
sen 30° = cos 60° = 0,5.)

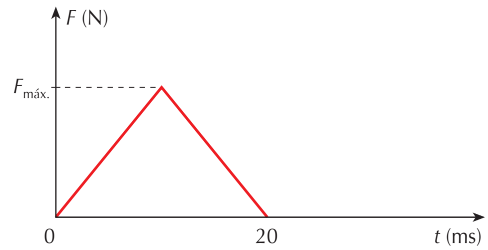
P. 411 (Olimpíada Brasileira de Física) Uma bola, de massa igual a 100 g, é abandonada de uma altura de 1,25 m, bate no chão e torna a subir até a altura de 0,80 m. Desprezando a resistência do ar, determine:

a) o coeficiente de restituição;

b) o impulso do chão sobre a bola;

c) a intensidade da força máxima exercida pelo chão sobre a bola, considerando que a colisão dure 20 ms e que a variação da intensidade da força com o tempo seja como no gráfico abaixo.

(Despreze o impulso do peso da bola durante sua interação com o chão.)



EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 412 (UFSCar-SP) Uma bola de tênis de massa 60 g adquire, num saque, velocidade inicial de 30 m/s. Admita que, ao ser atingida pela raquete, a bola esteja praticamente em repouso, e que o impacto seja normal à raquete e "sem efeito", isto é, a bola é lançada sem rotação. Adote $g = 10$ m/s^2.

a) Quais os valores do trabalho e do módulo do impulso exercidos pela raquete sobre a bola?

b) Suponha que o intervalo de tempo em que ocorre a interação entre a bola e a raquete seja de 0,10 s. Qual a razão $\frac{F}{P}$ entre o módulo da força média $\vec{F}$ exercida pela raquete sobre a bola durante esse intervalo de tempo e o módulo do peso $\vec{P}$ da bola?

P. 413 (Unicamp-SP) As histórias de super-heróis estão sempre repletas de feitos incríveis. Um desses feitos é o salvamento, no último segundo, da mocinha que cai de uma grande altura. Considere a situação em que a desafortunada caia, a partir do repouso, de uma altura de 81,0 m e que nosso super-herói a intercepte 1,0 m antes de ela chegar ao solo, demorando 0,05 s para detê-la, isto é, para anular sua velocidade vertical. Considere que a massa da mocinha é de 50 kg. Despreze a resistência do ar e considere $g = 10$ m/s^2.

a) Calcule a força média aplicada pelo super-herói sobre a mocinha, para detê-la.

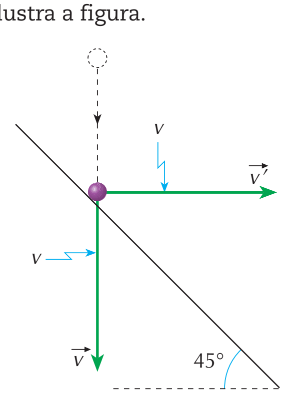
b) Uma aceleração 8 vezes maior que a gravidade ($8g$) é letal para um ser humano. Determine quantas vezes a aceleração à qual a mocinha foi submetida é maior que a aceleração letal.

P. 414 (UFJF-MG) As leis de trânsito proíbem viajar com crianças de colo nos bancos da frente dos automóveis por ser esta uma região mais vulnerável e também porque é muito difícil segurar a criança no caso de uma colisão.

a) Para ilustrar a importância deste último ponto, calcule a intensidade da força média que seria necessário exercer sobre o corpo de uma criança de 10 kg de massa, para impedir que ela fosse projetada para a frente, no caso de uma colisão frontal de um automóvel que estivesse viajando em uma estrada horizontal a uma velocidade de 72 km/h.
Admita que, na colisão, a velocidade do automóvel é reduzida a zero em 0,02 s.

b) Calcule a massa cujo peso é igual à intensidade da força do item anterior. (Use $g = 10$ m/s^2.)

P. 415 (UFRJ) Uma bola de pingue-pongue cai verticalmente e se choca, com velocidade $\vec{v}$, com um anteparo plano, inclinado 45° com a horizontal. A velocidade $\vec{v}'$ da bola imediatamente após o choque é horizontal, como ilustra a figura.



O peso da bola, o empuxo e a força de resistência do ar são desprezíveis quando comparados à força média que o anteparo exerce sobre a bola durante o choque. Suponha $|v| = |v'| = v$.

a) Determine a direção e o sentido da força média exercida pelo anteparo sobre a esfera durante o choque, caracterizando-os pelo ângulo que ela forma com o anteparo.

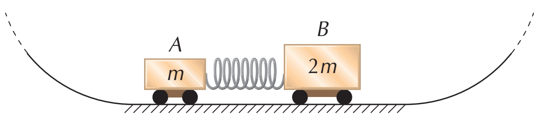
b) Calcule o módulo dessa força média em função da massa m da esfera, do módulo v de suas velocidades, tanto imediatamente antes quanto imediatamente após o choque, e do tempo Δt que a bola permanece em contato com o anteparo.

P. 416 (Vunesp) Durante um jogo de futebol, uma bola atingiu acidentalmente a cabeça de um policial, em pé e imóvel, nas proximidades do campo. A bola, com massa de 400 g e velocidade de 8 m/s, bateu e voltou na mesma direção, porém com velocidade de 7 m/s.

a) Qual foi o impulso da força exercida pela cabeça do policial na bola?

b) Pode-se afirmar que ocorreu transferência de momento linear (quantidade de movimento) da bola para o policial durante o choque? Justifique.

P. 417 (Vunesp) Um carrinho A, de massa m, e outro B, de massa $2m$, mantidos em repouso sobre uma superfície plana e horizontal, estão comprimindo uma mola, de massa desprezível, como mostra a figura.

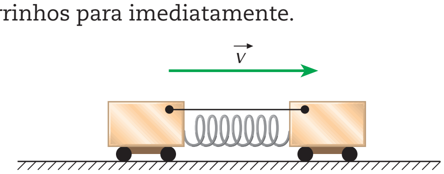


Quando os carrinhos são liberados simultaneamente, a mola se distende, impulsionando-os, e B adquire, depois que a mola estiver totalmente distendida, uma velocidade de 1,0 m/s.

a) Nessas condições, determine a velocidade adquirida por A.

b) Denominando h_A e h_B as alturas máximas alcançadas, respectivamente, pelos carrinhos A e B, ao subirem as rampas mostradas na figura, determine a razão $\frac{h_A}{h_B}$

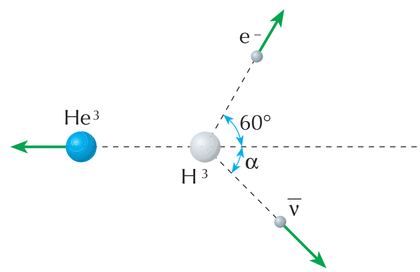
P. 418 (Fuvest-SP) Dois carrinhos iguais, com 1 kg de massa cada um, estão unidos por um barbante e se deslocam com velocidade de 3 m/s. Entre os carrinhos há uma mola comprimida, cuja massa pode ser desprezada. Num determinado instante o barbante se rompe, a mola se desprende e um dos carrinhos para imediatamente.



a) Qual é a quantidade de movimento inicial do conjunto?

b) Qual é a velocidade do carrinho que continua em movimento?

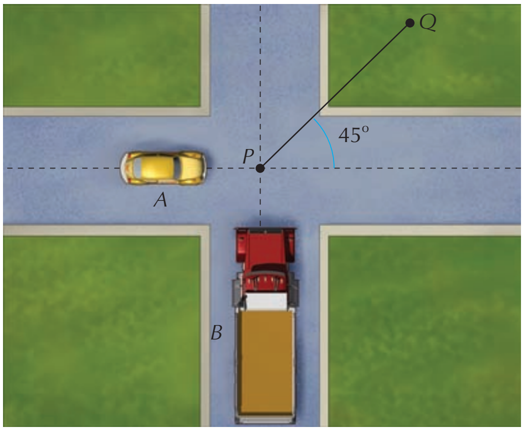
P. 419 (Unicamp-SP) A existência do neutrino e do antineutrino foi proposta em 1930 por Wolfgang Pauli, que aplicou as leis de conservação de quantidade de movimento e energia ao processo de desintegração β. O esquema abaixo ilustra esse processo para um núcleo de trítio, H^3 (um isótopo do hidrogênio), que se transforma em um núcleo de hélio, He^3, mais um elétron, e^-, e um antineutrino, $\bar{\nu}$. O núcleo de trítio encontra-se inicialmente em repouso. Após a desintegração, o núcleo de hélio possui uma quantidade de movimento com módulo de $12 \cdot 10^{-24}$ kg · m/s e o elétron sai em uma trajetória fazendo um ângulo de 60° com o eixo horizontal e uma quantidade de movimento de módulo $6{,}0 \cdot 10^{-24}$ kg · m/s.



a) O ângulo α que a trajetória do antineutrino faz com o eixo horizontal é de 30°. Determine o módulo da quantidade de movimento do antineutrino.

b) Qual é a velocidade do núcleo de hélio após a desintegração? A massa do núcleo de hélio é $5{,}0 \cdot 10^{-27}$ kg.

P. 420 (IME-RJ) O carro A foi abalroado pelo caminhão B de massa igual ao triplo da massa do carro. O caminhão desloca-se com velocidade 36 km/h. Após o choque, que se deu no ponto P, os dois veículos, unidos, deslocaram-se em linha reta até o ponto Q. O motorista do carro declarou que sua velocidade no instante do choque era inferior à máxima permitida, que é de 80 km/h. Diga, justificando, se essa declaração é falsa ou verdadeira.



P. 421 (Unicamp-SP) No episódio II do filme *Guerra nas Estrelas*, um personagem mergulha em queda livre, caindo em uma nave que se deslocava horizontalmente a 100 m/s com os motores desligados. O personagem resgatado chegou à nave com uma velocidade de 6 m/s na vertical. Considere que a massa da nave é de 650 kg, a do personagem resgatado de 80 kg e a do piloto de 70 kg.

a) Quais as componentes horizontal e vertical da velocidade da nave imediatamente após o resgate?

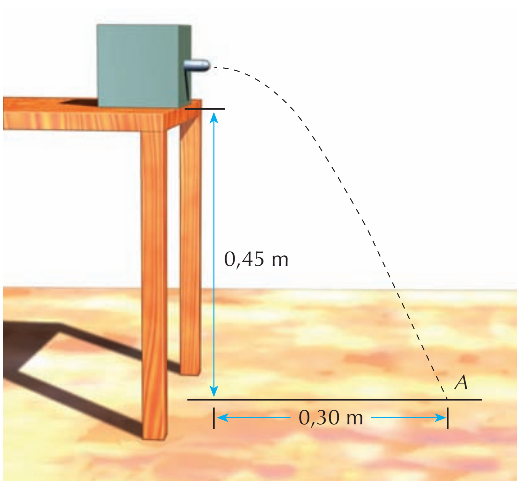
b) Qual foi a variação da energia cinética total nesse resgate?

P. 422 (Vunesp) Uma criança empurra um carrinho de supermercado de 10 kg, contendo 15 kg de mercadorias, com uma velocidade constante de 0,1 m/s, num piso plano e horizontal. Ela abandona o carrinho por alguns instantes, mas, como o atrito é desprezível, ele se mantém em movimento com a mesma velocidade constante. Sua mãe, preocupada, retira do carrinho um pacote de açúcar de 5 kg, verticalmente, em relação ao carrinho, sem exercer qualquer ação sobre o carrinho.

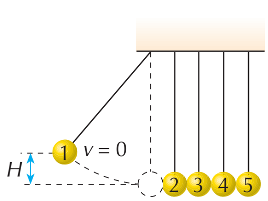
a) Qual é a quantidade de movimento do carrinho com as mercadorias, quando abandonado pela criança?

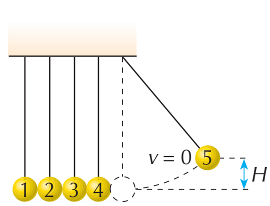
b) Quando a mãe retira o pacote de açúcar, a velocidade do carrinho varia? Justifique.

P. 423 (UFBA) A figura mostra um dispositivo constituído de uma caixa de massa 0,5 kg e de um projétil de massa 0,125 kg, preso a ela por um mecanismo de espoleta. Esse dispositivo se encontra na borda de uma mesa sem atrito, de altura 0,45 m. Sabendo-se que, disparada a espoleta, o projétil atinge o solo no ponto A, distando 0,3 m do pé da mesa, determine, em cm/s, a velocidade de recuo da caixa sobre a mesa. (Use $g = 10\ m/s^2$.)

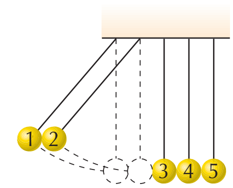


P. 424 (Olimpíada Brasileira de Física) São realizadas experiências com 5 pêndulos de mesmos comprimentos. As massas pendulares são de bolas de bilhar iguais, cada uma ligeiramente encostada na outra.
Experiência I: A bola 1 é erguida de uma altura *H* e abandonada. Ela colide com a bola 2. O choque se propaga e a bola 5 é lançada, praticamente, até a mesma altura *H*.





Experiência II: Agora as bolas 1 e 2 são erguidas conforme ilustra a figura e abandonadas. Elas caminham juntas até a colisão com a bola 3.

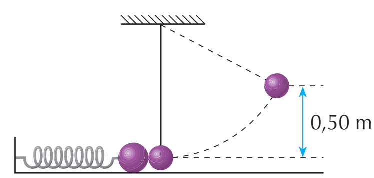


Dois estudantes, Mário e Pedro, têm respostas diferentes com relação à previsão do que irá ocorrer após a propagação do choque. Mário acha que somente a bola 5 irá se movimentar, saindo com velocidade duas vezes maior que as velocidades das bolas 1 e 2 incidentes. Pedro acha que as bolas 4 e 5 sairão juntas com a mesma velocidade das bolas incidentes 1 e 2.

a) A previsão de Mário é correta? Justifique.

b) A previsão de Pedro é correta? Justifique.

P. 425 (UFRJ) Uma esfera de massa igual a 100 g está sobre uma superfície horizontal sem atrito, e prende-se à extremidade de uma mola de massa desprezível e constante elástica igual a 9 N/m. A outra extremidade da mola está presa a um suporte fixo, conforme mostra a figura. Inicialmente a esfera encontra-se em repouso e a mola, no seu comprimento natural. A esfera é então atingida por um pêndulo de mesma massa que cai de uma altura igual a 0,5 m. Suponha a colisão elástica e $g = 10\ m/s^2$.



Calcule:

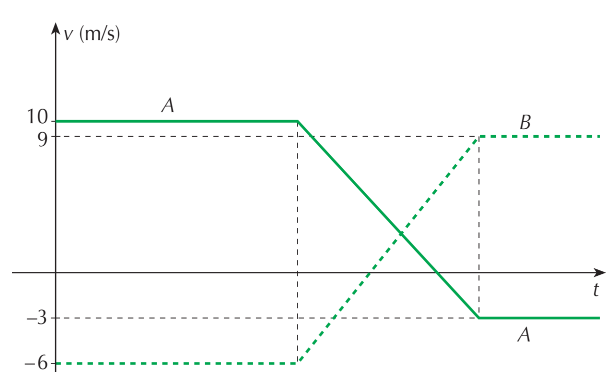
a) as velocidades da esfera e do pêndulo imediatamente após a colisão;

b) a compressão máxima da mola.

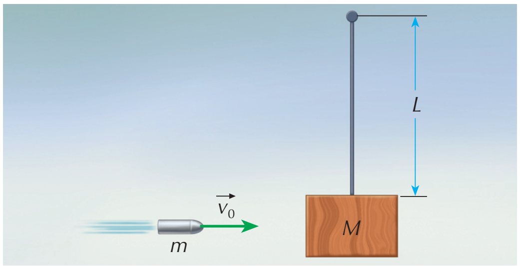
P. 426 (UFRJ) A figura representa o gráfico velocidade-tempo de uma colisão unidimensional entre dois carrinhos *A* e *B*.

a) Qual é o módulo da razão entre a força média que o carrinho *A* exerce sobre o carrinho *B* e a força média que o carrinho *B* exerce sobre o carrinho *A*? Justifique sua resposta.

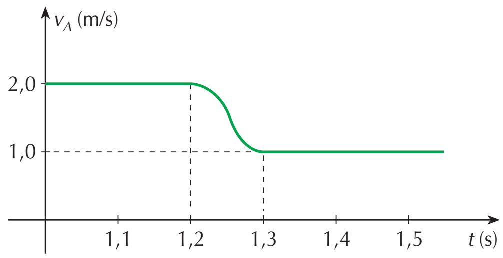
b) Calcule a razão entre as massas m_A e m_B dos carrinhos.



P. 427 (Unifei-MG) Um projétil de massa m e velocidade v_0 atravessa o bloco de massa M do pêndulo da figura. Sabendo que a velocidade do projétil após atravessar o pêndulo é $\frac{v_0}{2}$, qual é o menor valor de v_0 para que o bloco de massa M dê uma volta completa?



P. 428 (Ufes) Um patinador A de massa $m_A = 40$ kg persegue um patinador B de massa $m_B = 30$ kg. Ambos se deslocam inicialmente em movimento retilíneo uniforme com velocidades $v_A = 2{,}0$ m/s e $v_B = 1{,}0$ m/s no mesmo sentido. A variação da velocidade do patinador A, devido ao choque com B, é medida experimentalmente em função do tempo, cujo resultado é mostrado no gráfico abaixo.

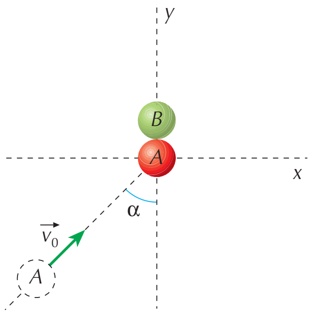


Considerando desprezíveis as forças de atrito, determine:

a) a velocidade do patinador B após o choque com o patinador A;

b) a intensidade da força média de contato entre A e B, durante o choque.

P. 429 (Unicamp-SP) Jogadores de sinuca e bilhar sabem que, após uma colisão não frontal de duas bolas A e B de mesma massa, estando a bola B inicialmente parada, as duas bolas saem em direções que formam um ângulo de 90°. Considere a colisão de duas bolas de 200 g, representada na figura abaixo. A se dirige em direção a B com velocidade $v_0 = 2{,}0$ m/s formando um ângulo α com a direção y tal que sen $\alpha = 0{,}80$. Após a colisão, B sai na direção y.



a) Calcule as componentes x e y das velocidades de A e B logo após a colisão.

b) Calcule a variação da energia (cinética de translação) na colisão.

(Nota: Despreze a rotação e o rolamento das bolas.)

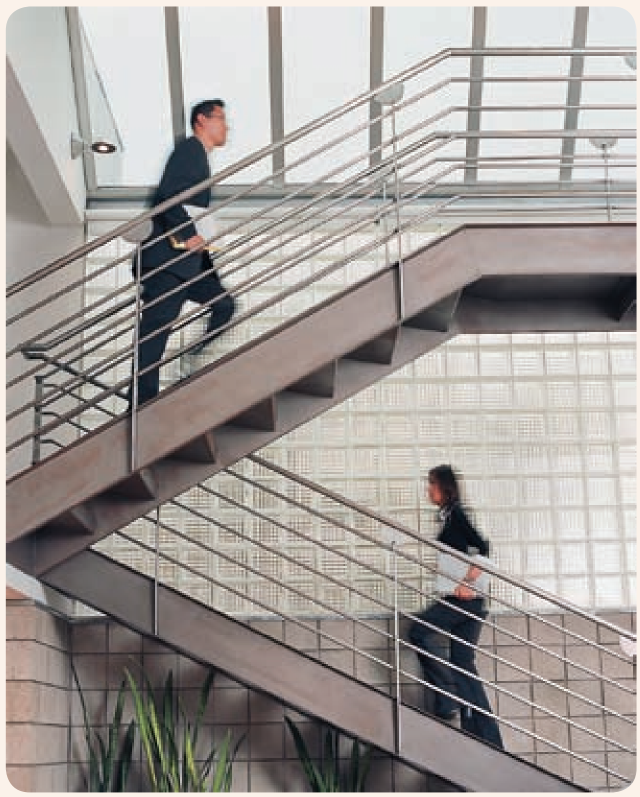
Atividade experimental

Realize a experiência com supervisão do seu professor

Calculando trabalho e potência

Ao subir uma escada, sua força muscular realiza trabalho. Conforme o intervalo de tempo gasto na subida, a potência que você despende é maior ou menor. Realize então o experimento seguinte.

Escolha uma certa escada, conte o número de degraus e meça a altura de cada degrau. Você terá assim a altura que vai se deslocar. Sua massa você deve saber. Se não, procure uma balança para determiná-la. Suba a escada e meça o tempo que você gastou nesse percurso.



TONY GARCIA/STONE-GETTY IMAGES

Responda

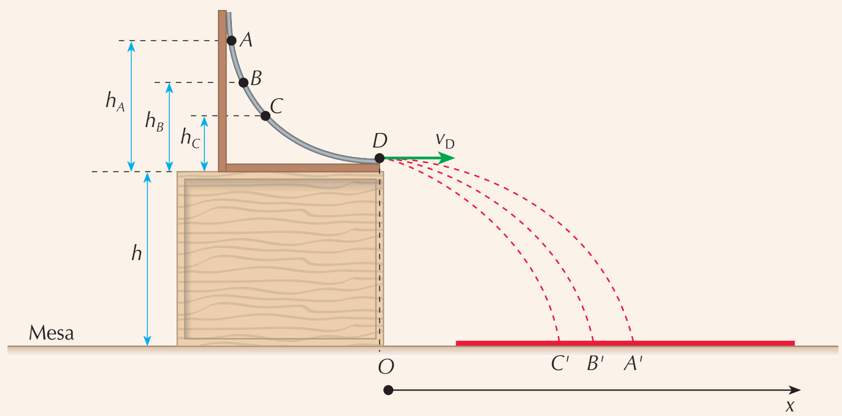
- Qual foi o trabalho que sua força peso realizou nesse deslocamento?
- Esse trabalho seria diferente se, caso fosse possível, você pulasse do piso até o último degrau? E se a escada fosse rolante?
- Calcule a potência despendida por você no deslocamento em questão. Ela seria maior, menor ou a mesma caso você se deslocasse mais rapidamente? Por quê?

Atividade experimental

Realize a experiência com supervisão do seu professor

Conversão de energia potencial gravitacional em energia cinética

Usando um pedaço de trilho de cortina, realize a experiência conforme esquematizado na figura.



Meça as alturas h_A, h_B e h_C, da posição inicial da qual a esfera foi abandonada nos experimentos sucessivos. Calcule a energia potencial gravitacional em cada posição em relação à face superior da caixa. Para tanto, determine previamente a massa m da esfera e considere $g = 10$ m/s².

Repita o cálculo das velocidades v_D com que a esfera abandona o trilho, como foi feito na atividade experimental de lançamento horizontal (neste portal). Calcule a energia cinética com a qual a esfera abandona o trilho em cada um dos experimentos $\left(E_c = \frac{mv^2}{2}\right)$.

Compare os valores obtidos para a energia cinética com os da energia potencial gravitacional.

Responda

- Que tipo(s) de transformação energética ocorreu(ram) durante o experimento?

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

Fontes convencionais e fontes alternativas de energia

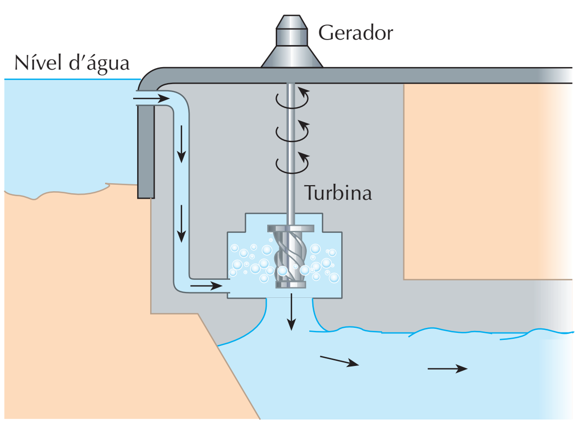
No Brasil, são exemplos de fontes convencionais de energia as usinas hidrelétricas e termelétricas, os combustíveis fósseis e o gás natural. Algumas ocasionam grandes danos ao meio ambiente, outras estão em via de se esgotarem.

As usinas hidrelétricas

Nas usinas hidrelétricas, a energia potencial gravitacional da água represada é transformada, durante a queda, em energia cinética que movimenta as pás da turbina. O eixo do gerador é movimentado gerando energia elétrica.

Na implantação de uma usina hidrelétrica, é fundamental a preservação do meio ambiente. Uma etapa importante dessa implantação é a formação do grande reservatório, a represa. A inundação de uma vasta área ocasiona profunda alteração no ecossistema da região. Por exemplo, haverá um significativo aumento na umidade relativa do ar da região, em virtude da evaporação da água da represa. As chuvas tendem a se tornar mais frequentes e mais intensas e a temperatura média no local se modifica. A região deve ser escolhida de modo a causar um mínimo de efeitos negativos.

No que diz respeito à flora, em vista do desaparecimento da vegetação nativa, impõe-se que se planeje um reflorestamento criterioso para repor as espécies vegetais.



A água em movimento aciona a turbina, gerando energia elétrica.

Antes da inundação deve ser feito o desmatamento da área para evitar que madeiras de boa qualidade sejam cobertas pelas águas.

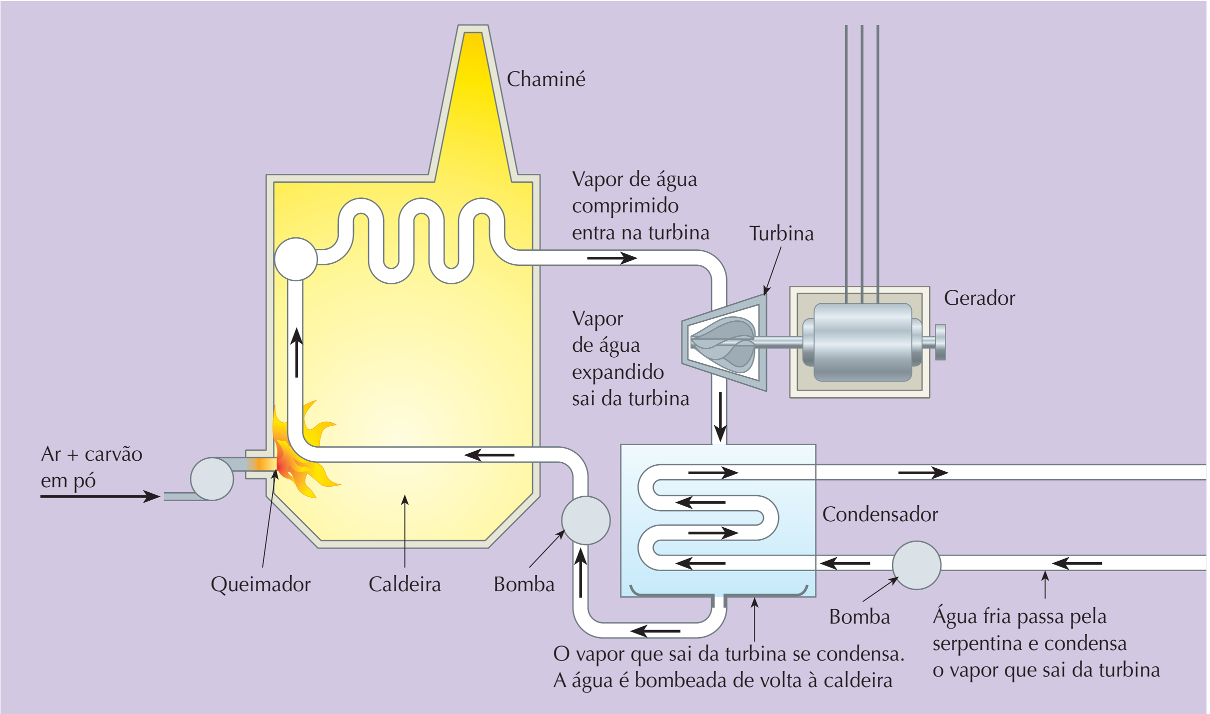
Atenção especial deve ser dada à fauna nativa da área a ser inundada, por meio de uma coleta criteriosa dos animais que vivem na região.

As populações humanas que habitam a região onde uma usina será implantada são seriamente afetadas. As pessoas devem ser assentadas em outros locais. O ideal seria que tivessem sua condição original de vida minimamente alterada ou até mesmo melhorada.

A eficiência de uma usina hidrelétrica, no que diz respeito à produção e aos impactos ambientais, pode ser avaliada pela **razão entre a potência instalada e a área inundada**. Por exemplo, na usina de Ilha Solteira, inundou-se uma área de 1.077 km^2 e a potência elétrica instalada é de 3.230 MW. Já na usina de Tucuruí esses valores são, respectivamente, 2.430 km^2 e 4.240 MW. A razão entre a potência instalada e a área inundada é de 3,0 MW/km^2 para a usina de Ilha Solteira e de 1,75 MW/km^2 para a usina de Tucuruí.

As usinas termelétricas

Nas usinas termelétricas a rotação das turbinas é feita pelo vapor de água produzido pela queima de um combustível como, por exemplo, o carvão. Essas usinas intensificam o "efeito estufa", fenômeno que produz um aumento da temperatura média da Terra, com graves consequências. Esse aquecimento ocorre porque a queima do carvão gera grande quantidade de gás carbônico (CO_2), que é despejado na atmosfera. Ele age como uma barreira, impedindo que a Terra perca para o espaço, durante a noite, uma grande quantidade do calor que recebe do Sol.



Esquema de uma usina termelétrica.

Novas fontes de energia

As reservas de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, estão próximas de se esgotarem, sem possibilidade de renovação.

Existem outras maneiras de aproveitar os recursos energéticos naturais. Entre as principais fontes de energia renováveis alternativas temos a energia eólica e a energia solar. A eólica é produzida pelos ventos, ou seja, pelas correntes de ar que se formam na atmosfera. Essas correntes incidem sobre as pás das turbinas, movimentando-as. A energia solar pode ser captada pelos **coletores solares**, utilizados para o aquecimento de água, e pelas **células fotovoltaicas**, que convertem diretamente energia solar em energia elétrica.

HANK MORGAN/SPL-LATINSTOCK

Complexo de captação de energia solar no deserto de Mojave, na Califórnia (Estados Unidos). A potência elétrica total gerada é de 275 MW.

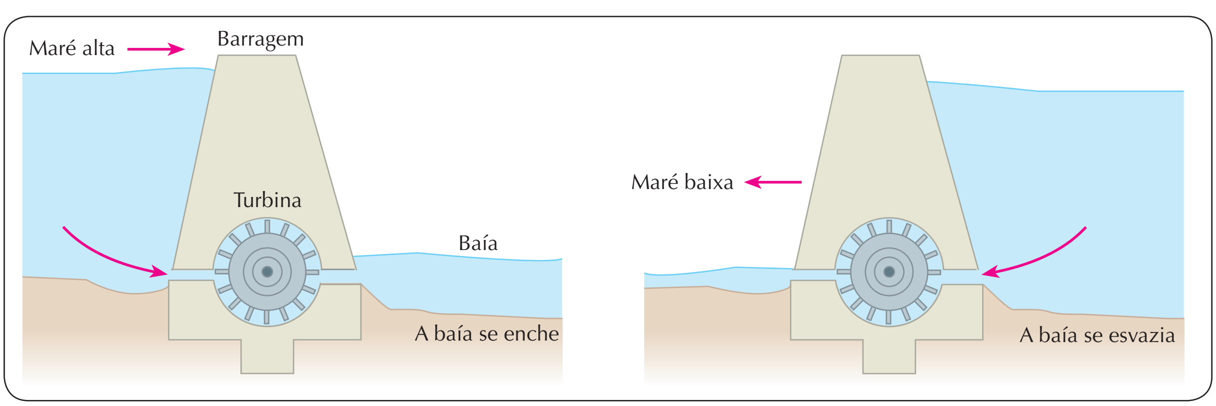
JOHN MEAD/SPL-LATINSTOCK

Captadores de energia eólica, em Palm Springs, na Califórnia (Estados Unidos). A potência elétrica gerada numa turbina é proporcional ao cubo da velocidade com que o vento incide nas hélices.

Há outras fontes renováveis e alternativas de energia, como a energia da biomassa e a energia das marés.

A biomassa é um biocombustível, originado de resíduos agrícolas, madeira, plantas e partes biodegradáveis de resíduos industriais e urbanos. O álcool, extraído da cana-de-açúcar, é o biocombustível mais conhecido. O biodiesel é um combustível biodegradável, produzido por diversas espécies vegetais como a mamona, o girassol, a soja, o amendoim e o dendê. O biodiesel é bem menos poluente do que o óleo diesel obtido a partir do petróleo, podendo substituí-lo parcial ou totalmente.

A energia das marés é utilizada em regiões onde ocorre um grande desnível entre as marés alta e baixa. De modo análogo ao das usinas hidrelétricas, é construída uma barragem, originando um reservatório junto ao mar. Por ocasião da maré alta, a água que enche o reservatório passa pela turbina acionando-a. Na maré baixa, o reservatório esvazia e novamente a turbina entra em rotação gerando energia elétrica. Entretanto, esse processo é descontínuo e de baixo rendimento, o que limita sua utilização. Em La Rance, na França, existe uma usina mareomotriz em funcionamento, onde o desnível entre as marés alta e baixa chega a 13 m e a capacidade instalada é de 240 MW.



Esquema de funcionamento de uma usina mareomotriz.

A energia nuclear

Em alguns países, como a França, por exemplo, a energia nuclear não é uma fonte alternativa de energia, mas sim a principal fonte de obtenção de energia elétrica. As usinas nucleares funcionam basicamente como as termelétricas: as turbinas são acionadas pelo vapor de água. Enquanto nas termelétricas o vapor é obtido pela queima de combustível, nas nucleares a produção do calor é proveniente da fissão nuclear: núcleos pesados, como os dos isótopos do urânio-235, ao serem bombardeados por nêutrons, originam núcleos menores, liberando uma grande quantidade de energia.

A implantação ou não de usinas nucleares tem provocado inúmeras discussões. Muitos consideram uma forma limpa de energia e os riscos decorrentes de sua utilização perfeitamente controláveis. Outros afirmam que os riscos, que advêm dos resíduos radioativos que se formam quando o urânio é preparado para ser usado como "combustível", são extremamente graves e contraindicam a utilização da energia nuclear. Além disso, após seu processamento, obtém-se como produto final o "lixo atômico", também radioativo, ainda sem um local definido para ser colocado. Na Alemanha, a instalação de novas usinas nucleares está proibida. O desmonte dos reatores nucleares ainda existentes deve ser completado até 2021.

Teste sua leitura

L.21 (Enem-MEC) Na avaliação da eficiência de usinas quanto à produção e aos impactos ambientais, utilizam-se vários critérios, tais como: razão entre produção efetiva anual de energia elétrica e potência instalada ou razão entre potência instalada e área inundada pelo reservatório. No quadro abaixo, esses parâmetros são aplicados às duas maiores hidrelétricas do mundo: Itaipu, no Brasil, e Três Gargantas, na China.

Parâmetros	Itaipu	Três Gargantas
potência instalada	12.600 MW	18.200 MW
produção efetiva de energia elétrica	93 bilhões de kWh/ano	84 bilhões de kWh/ano
área inundada pelo reservatório	1.400 km²	1.000 km²

Fonte: www.itaipu.gov.br

Com base nessas informações, avalie as afirmativas que se seguem:

I. A energia elétrica gerada anualmente e a capacidade máxima de geração da hidrelétrica de Itaipu são maiores que as da hidrelétrica de Três Gargantas.

II. Itaipu é mais eficiente que Três Gargantas no uso da potência instalada na produção de energia elétrica.

III. A razão entre potência instalada e área inundada pelo reservatório é mais favorável na hidrelétrica Três Gargantas do que em Itaipu.

É correto apenas o que se afirma em:

a) I   b) II   c) III   d) I e III   e) II e III

L.22 (Enem-MEC) A construção de grandes projetos hidroelétricos também deve ser analisada do ponto de vista do regime das águas e de seu ciclo na região. Em relação ao ciclo da água, pode-se argumentar que a construção de grandes represas:

a) não causa impactos na região, uma vez que a quantidade total de água da Terra permanece constante.

b) não causa impactos na região, uma vez que a água que alimenta a represa prossegue depois rio abaixo com a mesma vazão e velocidade.

c) aumenta a velocidade dos rios, acelerando o ciclo da água na região.

d) aumenta a evaporação na região da represa, acompanhada também por um aumento local da umidade relativa do ar.

e) diminui a quantidade de água disponível para a realização do ciclo da água.

L.23 (Enem-MEC) Em usinas hidrelétricas, a queda-d'água move turbinas que acionam geradores. Em usinas eólicas, os geradores são acionados por hélices movidas pelo vento. Na conversão direta solar-elétrica são células fotovoltaicas que produzem tensão elétrica. Além de todos produzirem eletricidade, esses processos têm em comum o fato de:

a) não provocarem impacto ambiental.

b) independerem de condições climáticas.

c) a energia gerada poder ser armazenada.

d) utilizarem fontes de energia renováveis.

e) dependerem das reservas de combustíveis fósseis.

L.24 (Enem-MEC) Não é nova a ideia de se extrair energia dos oceanos aproveitando-se a diferença das marés alta e baixa. Em 1967, os franceses instalaram a primeira usina "maré-motriz", construindo uma barragem equipada de 24 turbinas, aproveitando-se a potência máxima instalada de 240 MW, suficiente para a demanda de uma cidade com 200 mil habitantes. Aproximadamente 10% da potência total instalada são demandados pelo consumo residencial.

Nessa cidade francesa, aos domingos, quando parcela dos setores industrial e comercial para, a demanda diminui 40%. Assim, a produção de energia correspondente à demanda aos domingos será atingida mantendo-se:

I. todas as turbinas em funcionamento, com 60% da capacidade máxima de produção de cada uma delas.

II. a metade das turbinas funcionando em capacidade máxima e o restante, com 20% da capacidade máxima.

III. quatorze turbinas funcionando em capacidade máxima, uma com 40% da capacidade máxima e as demais desligadas.

Está correta a situação descrita:

a) apenas em I.
b) apenas em II.
c) apenas em I e III.
d) apenas em II e III.
e) em I, II e III.

L.25 (Enem-MEC) Um problema ainda não resolvido da geração nuclear de eletricidade é a destinação dos rejeitos radiativos, o chamado "lixo atômico". Os rejeitos mais ativos ficam por um período em piscinas de aço inoxidável nas próprias usinas antes de ser, como os demais rejeitos, acondicionados em tambores que são dispostos em áreas cercadas ou encerrados em depósitos subterrâneos secos, como antigas minas de sal. A complexidade do problema do lixo atômico, comparativamente a outros lixos com substâncias tóxicas, se deve ao fato de:

a) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, em um processo que não tem como ser interrompido artificialmente.

b) acumular-se em quantidades bem maiores do que o lixo industrial convencional, faltando assim locais para reunir tanto material.

c) ser constituído de materiais orgânicos que podem contaminar muitas espécies vivas, incluindo os próprios seres humanos.

d) exalar continuamente gases venenosos, que tornariam o ar irrespirável por milhares de anos.

e) emitir radiações e gases que podem destruir a camada de ozônio e agravar o efeito estufa.

Atividade experimental

Realize as experiências com supervisão do seu professor

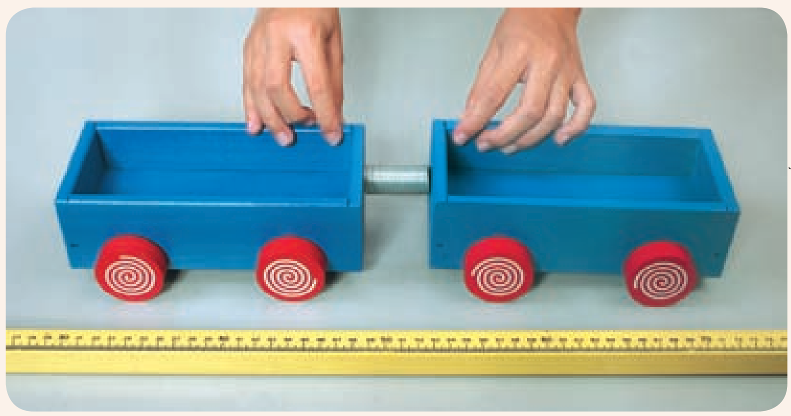
A conservação da quantidade de movimento

1ª experiência

Usando duas caixas de madeira A e B, idênticas, abertas na face superior e providas de rodinhas, construa dois carrinhos. Sejam m_A e m_B suas massas. Como as caixas são idênticas, temos $m_A = m_B$. Determine essas massas utilizando uma balança.

Mantenha uma mola comprimida entre os carrinhos sobre uma mesa horizontal, conforme mostra a foto da direita.


SÉRGIO DOTTA JR./CID


SÉRGIO DOTTA JR./CID

Soltando-se o sistema, a mola se distende, desprende-se dos carrinhos e estes entram em movimento. Com auxílio de uma régua, medimos as distâncias percorridas pelos carrinhos em um certo intervalo de tempo Δt (por exemplo: 3,0 s).

Responda

- Os carrinhos A e B percorrem a mesma distância?
- As velocidades médias dos carrinhos A (v_A) e B (v_B) são iguais? Calcule-as.
- Os produtos $m_A v_A$ e $m_B v_B$ são iguais?

Coloque, agora, dentro da caixinha A um corpo de massa conhecida. Seja m_A a nova massa total de A e m_B a massa de B.

Repita a experiência anterior.

Responda

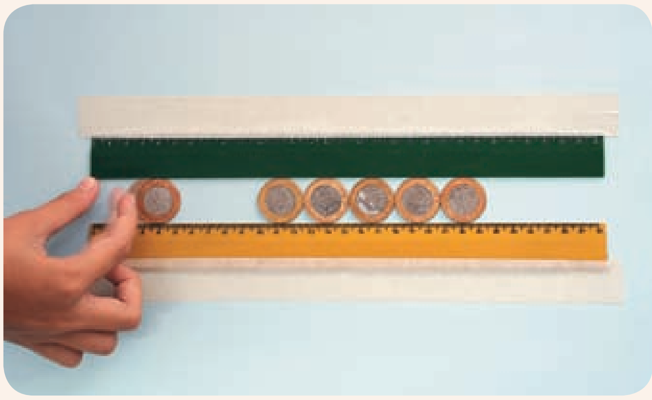
- Os carrinhos A e B percorrem a mesma distância?
- As velocidades médias dos carrinhos A (v_A) e B (v_B) são iguais? Calcule-as.
- Os produtos $m_A v_A$ e $m_B v_B$ são iguais?
- Qual é a quantidade de movimento do sistema antes e depois de ele ser liberado?

2ª experiência

Fixe, usando fita adesiva, duas réguas de 30 cm sobre a mesa, de modo a formarem um trilho pelo qual possa se movimentar uma moeda (por exemplo, de 1 real). Faça uma fileira com pelo menos 5 moedas idênticas e coloque-as a partir de 10 cm de uma das extremidades.

Dê um piparote em outra moeda colocada a uma distância de 5 cm da fileira, de modo que ela atinja a primeira moeda da fileira.

Observe que somente a última moeda se movimenta, permanecendo as demais em repouso.



SÉRGIO DOTTA JR./CID

Responda

- Por que apenas a última moeda se movimenta?
- Se, em vez de uma, lançarmos duas moedas contra a fileira, o que acontece? Faça a experiência e verifique se sua previsão se confirma.
- Explique o porquê do sucedido.

A FÍSICA EM NOSSO MUNDO

O *air-bag*

Quando um veículo sofre uma colisão, ocorre uma variação brusca no módulo da quantidade de movimento. A intensidade do impulso que age no veículo e em seus ocupantes é igual à correspondente variação no módulo da quantidade de movimento ($I = \Delta Q$).

De $I = F \cdot \Delta t$, concluímos que a intensidade F da força média, que age no veículo e em seus ocupantes, depende do intervalo de tempo Δt durante o qual ocorre a colisão. Para o mesmo ΔQ, quanto maior o intervalo de tempo, menor a intensidade da força.

A utilização de bolsas infláveis (*air-bags*) nos automóveis tem essa função: sensores detectam a rápida desaceleração do veículo e essas bolsas, instaladas no volante e no painel de instrumentos, acima do porta-luvas, são acionadas. Imediatamente elas inflam e o motorista e o passageiro, numa colisão frontal, são projetados contra os *air-bags*, em vez de contra os para-brisas. A deformação das bolsas exige um intervalo de tempo relativamente grande, reduzindo de forma considerável a intensidade da força atuante nas pessoas no interior do carro.

ROMILY LOCKYER/THE IMAGE BANK-GETTY IMAGES

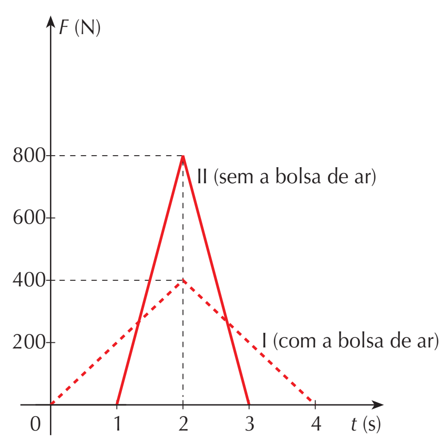
A barreira de pneus nos circuitos de corridas automobilísticas tem a mesma finalidade. A batida contra essa barreira demanda um tempo maior do que se o choque fosse contra um muro de concreto, fazendo com que o veículo fique submetido a uma força de menor intensidade, protegendo o piloto.

MARINO/CANTRELL/NEWSCOM

Teste sua leitura

L.26 (UFRN) Alguns automóveis dispõem de um eficiente sistema de proteção para o motorista, que consiste de uma bolsa inflável de ar. Essa bolsa é automaticamente inflada, do centro do volante, quando o automóvel sofre uma desaceleração súbita, de modo que a cabeça e o tórax do motorista, em vez de colidirem com o volante, colidem com a bolsa.

A figura abaixo mostra dois gráficos da variação temporal da força que age sobre a cabeça de um boneco que foi colocado no lugar do motorista. Os dois gráficos foram registrados em duas colisões de testes de segurança. A única diferença entre essas colisões é que, na colisão I, se usou a bolsa e, na colisão II, ela não foi usada.



Da análise desses gráficos, concluiu-se que a explicação para o sucesso da bolsa como equipamento de proteção é:

a) A bolsa diminui o intervalo de tempo da desaceleração da cabeça do motorista, diminuindo, portanto, a força média que atua sobre a cabeça.

b) A bolsa aumenta o intervalo de tempo da desaceleração da cabeça do motorista, diminuindo, portanto, a força máxima que atua sobre a cabeça.

c) A bolsa diminui o impulso total transferido para a cabeça do motorista, diminuindo, portanto, a força máxima que atua sobre a cabeça.

d) A bolsa diminui a variação total de momento linear transferida para a cabeça do motorista, diminuindo, portanto, a força média que atua sobre a cabeça.

L.27 (Unifesp) Uma xícara vazia cai de cima da mesa de uma cozinha e quebra ao chocar-se com o piso rígido. Se essa mesma xícara caísse, da mesma altura, da mesa da sala e, ao atingir o piso, se chocasse com um tapete felpudo, ela não se quebraria. Adote $g = 10\ m/s^2$.

a) Por que no choque com o piso rígido a xícara se quebra e no choque com o piso fofo (do tapete) não?

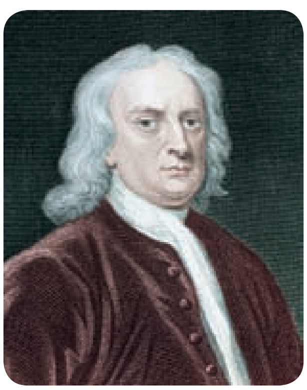
b) Suponha que a xícara caia sobre o tapete e pare, sem quebrar. Admita que a massa da xícara seja 0,10 kg, que ela atinja o solo com velocidade de 2,0 m/s e que o tempo de interação do choque seja de 0,50 s. Qual será a intensidade média da força exercida pelo tapete sobre a xícara? Qual seria essa força, se o tempo de interação fosse 0,010 s?

HISTÓRIA DA FÍSICA

A conservação da quantidade de movimento

SHEILA TERRY/SPL-LATINSTOCK

Descartes



SHEILA TERRY/SPL-LATINSTOCK

Newton

A ideia da existência de uma grandeza que medisse a *quantidade de movimento* do Universo e que permanecesse invariável com o tempo nasceu na verdade de especulações filosóficas. Para os pensadores do século XVII era impossível conceber que o Universo — divina criação — pudesse ser um mecanismo imperfeito, cujos movimentos cessassem algum dia. Para eles, a *quantidade de movimento* do Universo, fosse lá o que fosse, deveria manter-se invariável, apesar da interação entre os corpos. Mas que grandeza seria essa?

Muitos filósofos e cientistas se debruçaram sobre o problema, sem conseguir resolvê-lo. Foi RENÉ DESCARTES (1596-1650), cientista e filósofo francês, quem primeiro propôs uma formulação adequada para o problema. Segundo ele*, essa grandeza, à qual deu o nome de **quantidade de movimento**, corresponderia ao produto da massa m do corpo por sua velocidade escalar v. Assim, nas interações entre os corpos, a grandeza escalar $Q = mv$ se manteria invariável.

Coube a ISAAC NEWTON (1642-1727) formular de maneira correta e completa a hipótese cartesiana. Na realidade, a grandeza criada por Descartes mantinha-se invariável apenas em algumas situações, não se mantendo constante, por exemplo, quando as colisões entre os corpos deixavam de ser frontais. Newton propôs, então, que a quantidade de movimento de um corpo deveria ser uma grandeza vetorial ($\vec{Q}$), e não escalar, como supusera Descartes. Desse modo, a quantidade de movimento seria dada pelo produto da massa m do corpo pela velocidade vetorial $\vec{v}$, $\vec{Q} = m\vec{v}$. Com essa formulação, os cientistas verificaram ser verdadeiro que a quantidade de movimento total do Universo permanece constante.

O princípio da conservação da quantidade de movimento, ao lado de outras leis da Física, é considerado um dos princípios fundamentais da Física. No campo da Física Atômica e Nuclear, em particular, a aplicação desse princípio às colisões de partículas nos aceleradores tem permitido uma série de importantíssimas descobertas, responsáveis por muito do desenvolvimento científico de nossa civilização.

CERN/SPL-LATINSTOCK

O LEP (Large Electron-Positron collider), em Genebra, é o maior acelerador de partículas da Europa. Na foto, sua extensão de 27 km está assinalada sobre a região na qual foi instalado, abaixo do solo. A circunferência menor representa outro acelerador, para colisões de prótons e antiprótons.

* Fontes: BEN-DOV, Yoav. *Convite à Física*. Rio de Janeiro, Jorge Zahar, 1996. p. 43; PROJECTO FÍSICA. *O triunfo da Mecânica* — unidade 3. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.