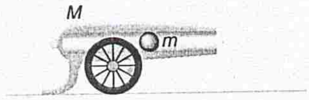


Figura 5.8 Canhão e bala em repouso.

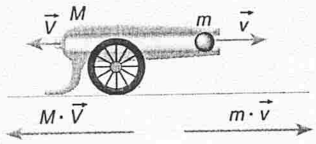


Figura 5.9 Canhão e bala logo após o disparo.

Ao projetarmos essa igualdade vetorial na direção dos eixos Ox e Oy, obtemos duas igualdades escalares.

Podemos aplicar a conservação da quantidade de movimento no caso de um canhão, inicialmente em repouso e capaz de se mover livremente num plano horizontal, que dispara uma bala horizontalmente. Sejam m e M as massas da bala e do canhão, respectivamente, v a velocidade com que a bala é lançada e V a velocidade de recuo do canhão.

A quantidade de movimento permanece a mesma imediatamente antes e imediatamente depois do disparo. Como o sistema está inicialmente em repouso ($v_{sistema} = 0$), a quantidade de movimento antes do disparo é nula, o mesmo acontecendo com a quantidade de movimento depois. (**Fig. 5.8**)

Desse modo, a quantidade de movimento da bala para a direita, por exemplo, deve ser anulada pela quantidade de movimento do canhão que recua para a esquerda. (**Fig. 5.9**)

Assim, as quantidades de movimento da bala e do canhão têm mesma direção, sentidos opostos e módulos iguais, isto é: $M \cdot V = m \cdot v$.

Semelhante a esse exemplo e de mesma solução, temos os casos a seguir.

- Uma garota de massa M sobre patins, que atira horizontalmente com velocidade v uma bola de massa m. A garota recua com velocidade V. (**Fig. 5.10**)
- Um garoto de massa M caminha com velocidade V sobre um carrinho de massa m, que recua com velocidade v. (**Fig. 5.11**)
- Um homem de massa M caminha com velocidade V num barco de massa m, que recua com velocidade v. (**Fig. 5.12**)
- Um foguete de massa M adquire velocidade V quando os gases de massa m, produzidos pela queima do combustível, são lançados para fora com velocidade v. (**Fig. 5.13**)

Em qualquer das situações citadas, temos:

$$M \cdot V = m \cdot v$$

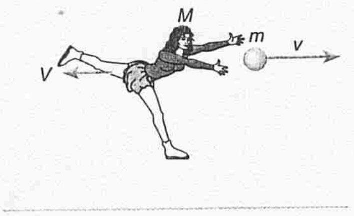


Figura 5.10

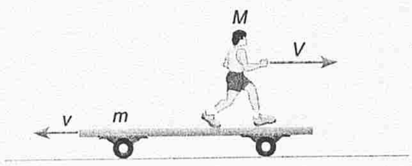


Figura 5.11

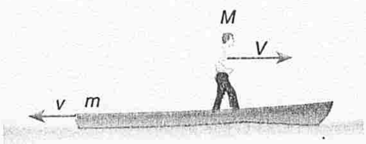


Figura 5.12

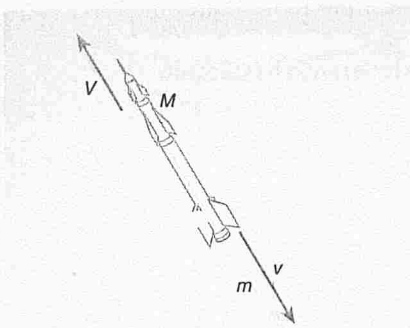
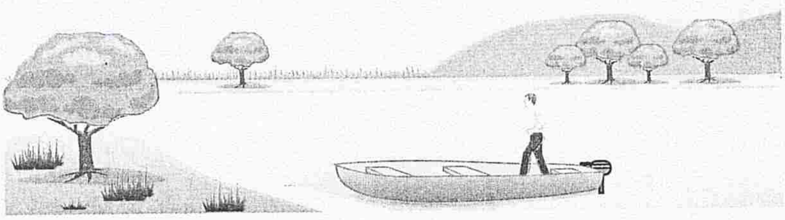


Figura 5.13

Você sabe por quê?

Um jovem estaciona seu barco com a proa perpendicular à margem de uma lagoa de águas tranqüilas.

O jovem caminha da popa em direção à proa, com a finalidade de descer do barco. Entretanto, ele não consegue seu intento. Explique. (O atrito entre as águas e o barco pode ser desprezado.)



UNIDADE II

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

2 O PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Podemos aplicar o princípio da conservação da quantidade de movimento a qualquer interação entre corpos? A resposta é: **podemos aplicar o princípio da conservação da quantidade de movimento à interação entre os corpos de um sistema isolado de forças externas.**

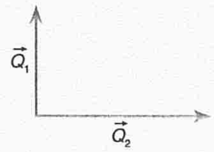
Um sistema de corpos é considerado isolado de forças externas quando:

- não atuam forças externas, isto é, forças provenientes de corpos não pertencentes ao sistema. Entretanto, pode haver forças internas, ou seja, forças que um corpo exerce sobre outro corpo do sistema. É o caso da força que uma bola de bilhar exerce sobre a outra durante a colisão;
- podem existir forças externas, mas de resultante nula; ou de intensidades desprezíveis, quando comparadas com as forças internas (como nas colisões e na explosão de uma granada).

Vamos aplicar o princípio da conservação da quantidade de movimento em algumas situações.

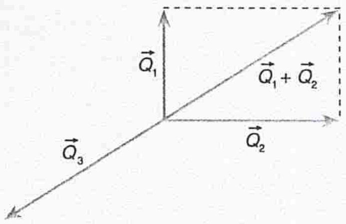
Consideremos, inicialmente, a conservação da quantidade de movimento em uma "explosão".

Um núcleo atômico radioativo, inicialmente em repouso, desintegra-se em três partículas de quantidades de movimento, $\vec{Q}_1$, $\vec{Q}_2$ e $\vec{Q}_3$. Na figura ao lado, representamos as quantidades de movimento $\vec{Q}_1$ e $\vec{Q}_2$. Como seria representada a quantidade de movimento $\vec{Q}_3$ da terceira partícula?



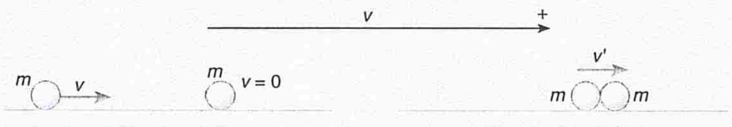
Como o núcleo está inicialmente em repouso, a quantidade de movimento antes da desintegração é nula, o mesmo devendo ocorrer com a quantidade de movimento após a desintegração. Nessas condições, a soma dos vetores $\vec{Q}_1$, $\vec{Q}_2$ e $\vec{Q}_3$ deve ser nula. Para isto o vetor $\vec{Q}_3$ deve anular a soma dos vetores $\vec{Q}_1$ e $\vec{Q}_2$, conforme mostra a figura ao lado.

Observe que o vetor $\vec{Q}_3$ tem o mesmo módulo, a mesma direção e sentido contrário ao do vetor $\vec{Q}_1 + \vec{Q}_2$.



Analisemos uma situação na qual dois corpos se chocam e passam a se mover juntos.

Um garoto lança uma bolinha de argila com velocidade *v*, que colide frontalmente com outra, inicialmente parada. Ambas possuem a mesma massa *m*. Após a colisão, as duas se grudam uma à outra e passam a se mover juntas. A colisão, nesta situação, é denominada **perfeitamente inelástica**. Qual será a velocidade das duas após a colisão?



Antes da colisão

Depois da colisão

Como todos os vetores têm a mesma direção, podemos trabalhar com uma igualdade escalar:

$$(\text{Quantidade de movimento})_{antes} = (\text{Quantidade de movimento})_{depois}$$

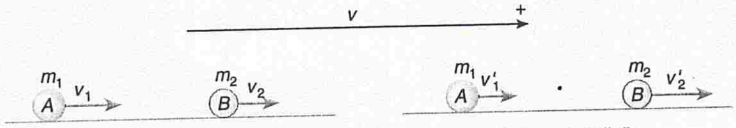
$$m \cdot v = 2 \cdot m \cdot v'$$

$$v' = \frac{v}{2}$$

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Consideremos agora um choque no qual os corpos não se movimentam juntos após a colisão.

Uma bolinha A, de massa $m_1 = 50$ g, colide frontalmente com outra, B, de massa $m_2 = 20$ g. Elas possuem velocidades $v_1 = 3$ m/s e $v_2 = 1$ m/s, antes da colisão. Após a colisão, a bolinha A passa a ter velocidade $v_1' = 2$ m/s. Qual será a velocidade v_2' da bolinha B após a colisão? Todas as velocidades têm mesma direção e mesmo sentido.



Antes da colisão
Depois da colisão

$$(\text{Quantidade de movimento})_{\text{antes}} = (\text{Quantidade de movimento})_{\text{depois}}$$

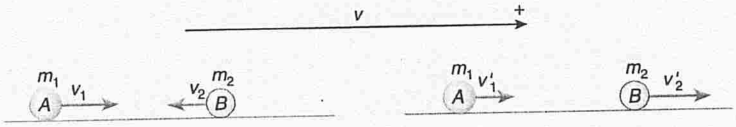
$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2'$$

$$50 \cdot 3 + 20 \cdot 1 = 50 \cdot 2 + 20 \cdot v_2'$$

$$v_2' = 3{,}5 \text{ m/s}$$

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Vamos refazer o exemplo anterior, considerando $v_1' = 1$ m/s, mantendo os demais valores numéricos, mas supondo que o sentido da velocidade v_2 é contrário ao de v_1.



Antes da colisão
Depois da colisão

$$(\text{Quantidade de movimento})_{\text{antes}} = (\text{Quantidade de movimento})_{\text{depois}}$$

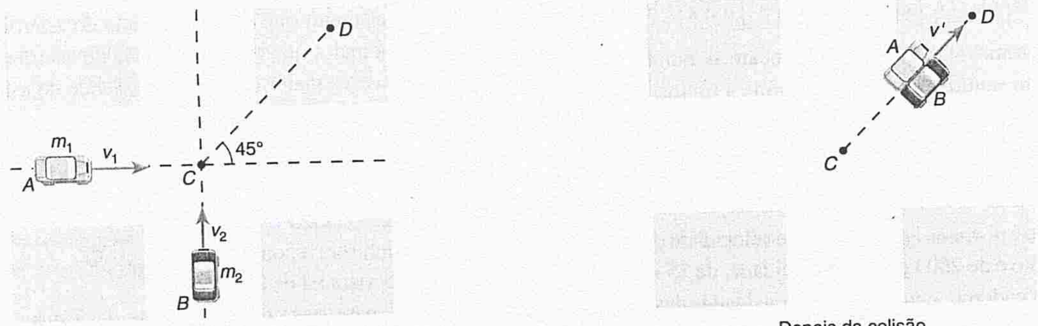
$$m_1 \cdot v_1 - m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2'$$

$$50 \cdot 3 - 20 \cdot 1 = 50 \cdot 1 + 20 \cdot v_2'$$

$$v_2' = 4 \text{ m/s}$$

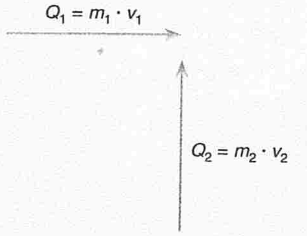
Na aplicação seguinte os corpos movimentam-se em direções distintas.

Dois automóveis, A e B, colidem num ponto C de um cruzamento e, unidos, deslocam-se em linha reta até o ponto D. O automóvel A tem massa $m_1 = 1.000$ kg e deslocava-se com velocidade $v_1 = 40$ km/h. O automóvel B tem massa $m_2 = 800$ kg. Vamos calcular a velocidade do automóvel B antes da colisão (v_2) e a velocidade dos automóveis depois da colisão (v').

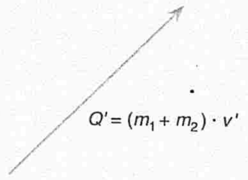


Antes da colisão
Depois da colisão

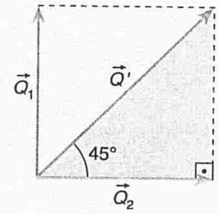
Devemos resolver este exemplo considerando o princípio da conservação da quantidade de movimento vetorialmente, pois as direções das velocidades são diferentes. Na figura abaixo, representamos as quantidades de movimento dos carros *A* e *B* antes da colisão e depois da colisão. A soma dos vetores $\vec{Q}_1$ e $\vec{Q}_2$ deve ser igual ao vetor $\vec{Q}'$.



Antes da colisão



Depois da colisão



O triângulo colorido é isósceles. Logo:

$$Q_1 = Q_2$$
$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$$
$$1.000 \cdot 40 = 800 \cdot v_2$$
$$v_2 = 50 \text{ km/h}$$

Para o cálculo de v' devemos observar que Q' é a hipotenusa do triângulo retângulo colorido. Sendo $Q' = (m_1 + m_2) \cdot v' = 1.800 \cdot v'$, aplicando o teorema de Pitágoras, vem:

$$(Q')^2 = (Q_1)^2 + (Q_2)^2$$
$$(1.800 \cdot v')^2 = (1.000 \cdot 40)^2 + (800 \cdot 50)^2$$
$$v' = 31{,}4 \text{ km/h}$$

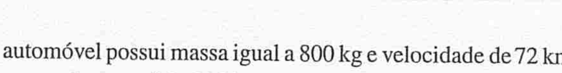
EXERCÍCIOS

Considere uma partícula de massa m e velocidade vetorial $\vec{v}$. A grandeza vetorial $\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$ é denominada **quantidade de movimento** da partícula. A direção e o sentido de $\vec{Q}$ são os mesmos de $\vec{v}$. Sua intensidade é dada por $Q = m \cdot v$. No SI a unidade de Q é kg · m/s. Com base no texto, responda às questões de 1 a 3.

Uma bola de massa $m = 400$ g possui, num certo instante, velocidade horizontal, sentido da esquerda para a direita e intensidade $v = 20$ m/s. Dê as características (direção, sentido e intensidade) da quantidade de movimento $\vec{Q}$ da bola, nesse instante.

Uma pedra possui, num certo instante, quantidade de movimento de direção vertical, sentido para cima e intensidade $Q = 2{,}0$ kg · m/s. Dê as características da velocidade da pedra no instante considerado. (A massa da pedra é igual a 0,20 kg.)

Um automóvel e uma moto deslocam-se numa pista dupla retilínea, em sentidos opostos, conforme a figura:



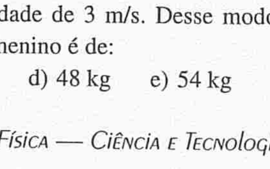
O automóvel possui massa igual a 800 kg e velocidade de 72 km/h. A massa da moto é de 200 kg, e sua velocidade, de 15 m/s. Copie a figura em seu caderno, determine as intensidades das quantidades de movimento do automóvel e da moto e represente na figura esses vetores.

(Unicamp-SP) Um canhão de massa $M = 300$ kg dispara na horizontal uma bala de massa $m = 15$ kg com uma velocidade de 60 m/s em relação ao chão. Qual a velocidade de recuo do canhão em relação ao chão?

(UEPI) Um filme mostra o Super-Homem, parado no ar, lançando ao espaço um asteróide, com velocidade igual à de uma bala de fuzil (aproximadamente 800 m/s). O asteróide tem uma massa aproximadamente igual a mil vezes a massa do Super-Homem. Após esse lançamento, o Super-Homem permanece em repouso. Caso ele obedecesse às leis da Física, ao invés de ficar parado, deveria ter adquirido, após o lançamento, uma velocidade de cujo módulo seria:

a) igual ao da velocidade do asteróide.
b) cem vezes maior que o da velocidade do asteróide.
c) mil vezes maior que o da velocidade do asteróide.
d) cem mil vezes maior que o da velocidade do asteróide.
e) mil vezes menor que o da velocidade do asteróide.

6 (U. Mackenzie-SP) Na figura, o menino e o carrinho têm juntos 60 kg. Quando o menino salta do carrinho em repouso, com velocidade horizontal de 2 m/s, o carrinho vai para trás com velocidade de 3 m/s. Desse modo, podemos afirmar que a massa do menino é de:



a) 12 kg b) 24 kg c) 36 kg d) 48 kg e) 54 kg

7 (Vunesp) Um corpo x, de massa $m_x = 2{,}0$ kg e velocidade $v_x = 20$ m/s, chocou-se com outro corpo y, de massa $m_y = 3{,}0$ kg e velocidade $v_y = 15$ m/s, que se movia na mesma direção e sentido. Após o choque, os corpos passaram a se mover juntos com velocidade, em m/s, igual a:

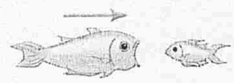
a) 35,0
b) 25,5
c) 18,0
d) 17,5
e) 17,0

8 (Unisa-SP) Duas pequenas esferas A e B, de massas $m_A = 0{,}20$ kg e $m_B = 0{,}10$ kg, com velocidades escalares $V_A = 5{,}0$ m/s e $V_B = 10$ m/s, respectivamente, movem-se sobre uma mesma trajetória retilínea, uma de encontro à outra, como mostra a figura abaixo:

Desprezando os atritos, o módulo da quantidade de movimento do sistema, constituído pelas duas esferas, imediatamente após o choque, em unidades do Sistema Internacional, vale:

a) 15,0
b) 5,0
c) 2,0
d) 0,30
e) zero

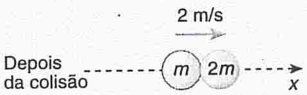
9 (UFRJ) Um peixe de 4 kg, nadando com velocidade de 1 m/s, no sentido indicado pela figura, engole um peixe de 1 kg, que estava em repouso, e continua nadando no mesmo sentido.



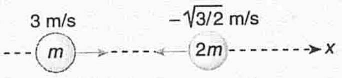
A velocidade, em m/s, do peixe maior, imediatamente após a ingestão, é igual a:

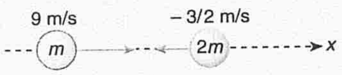
a) 1,0 b) 0,8 c) 0,6 d) 0,4

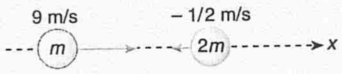
10 (Vunesp) Duas esferas, uma de massa m e outra de massa $2m$, sofreram colisão enquanto estavam se movendo ao longo de uma direção x, livres da ação de quaisquer forças externas. Após a colisão, as esferas mantiveram-se unidas, deslocando-se para a direita com velocidade de 2 m/s, como mostra a figura.

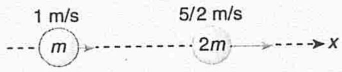


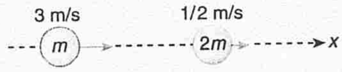
Assinale a alternativa que apresenta o par de valores possíveis para as velocidades das esferas antes da colisão.

a)


b)


c)


d)


e)


11 (Unip-SP) O filme *Impacto profundo* trata da colisão de um cometa com o planeta Terra.

Admita que o cometa está se movendo, rumo à Terra, com velocidade constante $\vec{V}_0$. Uma bomba é introduzida no interior do cometa, cuja massa total vale M.

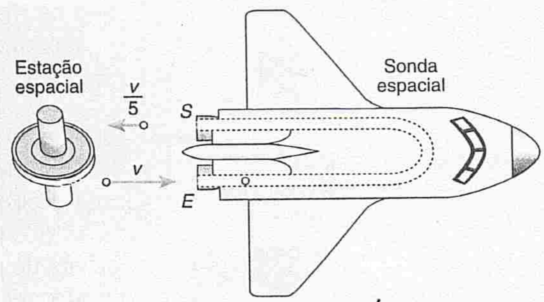
Com a explosão, o cometa se fragmenta em duas partes, A e B, de massas respectivamente iguais a $\frac{M}{3}$ e $\frac{2}{3}M$.

Sabe-se que, após a explosão, o fragmento A continua caminhando para a frente, na mesma direção e sentido de $\vec{V}_0$, com velocidade de intensidade de $2V_0$. A velocidade do fragmento B, após a explosão, será igual a:

a) $-\frac{\vec{V}_0}{2}$ b) $-\frac{\vec{V}_0}{4}$ c) $\vec{V}_0$ d) $\frac{\vec{V}_0}{4}$ e) $\frac{\vec{V}_0}{2}$

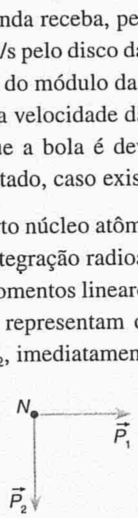
12 (UnB-DF) Novos sistemas de propulsão de foguetes e de sondas espaciais estão sempre sendo estudados pela Nasa. Um dos projetos utiliza o princípio de atirar e receber bolas de metal. O sistema funcionaria da seguinte forma: em uma estação espacial, um disco, girando, atiraria bolas metálicas a uma velocidade de 7.200 km/h. Uma sonda espacial as receberia e as mandaria de volta ao disco da estação. Segundo pesquisadores, esse sistema de receber e atirar bolas de metal poderia ser usado na propulsão inicial de naves ou de sondas espaciais que já estivessem em órbita.

(*Folha de S.Paulo*, 13/12/98, com adaptações)



Considere uma sonda espacial com massa de 1 tonelada, em repouso em relação a uma estação espacial, conforme ilustra a figura. Suponha que a sonda receba, pela entrada E, uma bola de 10 kg, atirada a 2.000 m/s pelo disco da estação, e a devolva, pela saída S, com um quinto do módulo da velocidade inicial. Calcule, em m/s, o módulo da velocidade da sonda em relação à estação, no instante em que a bola é devolvida. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

13 (UERJ) Um certo núcleo atômico N, inicialmente em repouso, sofre uma desintegração radioativa, fragmentando-se em três partículas, cujos momentos lineares são: $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ e $\vec{P}_3$. A figura mostra os vetores que representam os momentos lineares das partículas 1 e 2, $\vec{P}_1$ e $\vec{P}_2$, imediatamente após a desintegração.

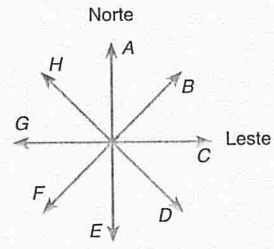


O vetor que melhor representa o momento linear da partícula 3, $\vec{P}_3$, é:

a) b) c)  d) 

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

14 (E. E. Mauá-SP) Um carro de massa $1,5 \cdot 10^3$ kg, que trafega para leste com velocidade de 25 m/s, colide, em um cruzamento, com uma camioneta de massa $2,5 \cdot 10^3$ kg, que se deslocava para norte com 15 m/s. Admitindo que a colisão seja perfeitamente inelástica, isto é, os veículos, após a colisão, permanecem solidamente ligados, determine o módulo da velocidade do conjunto após a colisão e indique a letra correspondente à seta do diagrama que representa a direção e o sentido seguidos pelo conjunto após a colisão.



3 O IMPULSO DE UMA FORÇA E A VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Quando ocorre uma interação entre corpos, um exerce força sobre o outro e isso provoca variações em suas velocidades e, conseqüentemente, em suas quantidades de movimento.

A variação da quantidade de movimento sofrida por um corpo, que indicaremos por $\Delta\vec{Q} = m \cdot \Delta\vec{v}$, depende da força resultante $\vec{F}$ atuante no corpo e do intervalo de tempo Δt durante o qual a força age.

Quanto mais intensa for a força, menor o intervalo de tempo necessário para produzir certa variação na quantidade de movimento. Reciprocamente quanto menos intensa for a força, maior deverá ser o intervalo de tempo necessário para que ocorra a mesma variação da quantidade de movimento.

Tal conclusão pode ser expressa pela fórmula:

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

TV / REUTERS-PRESSLINK

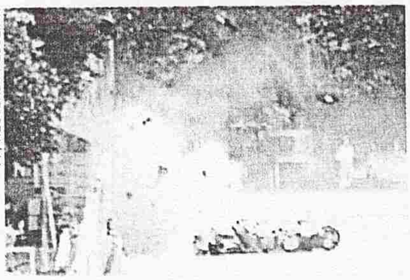


Figura 5.14 Acidente ocorrido com Ayrton Senna, no Grande Prêmio de Ímola, Itália, em 1º de maio de 1994.

Imagine um carro de corrida colidindo com um muro de concreto. A força de impacto é extremamente intensa, e o intervalo de tempo de impacto é pequeno. (Fig. 5.14) Se o muro estiver protegido por uma barreira de pneus, o intervalo de tempo de impacto será maior e, conseqüentemente, a intensidade da força de impacto diminuirá para a mesma variação da quantidade de movimento.

PPCM / KEYSTONE

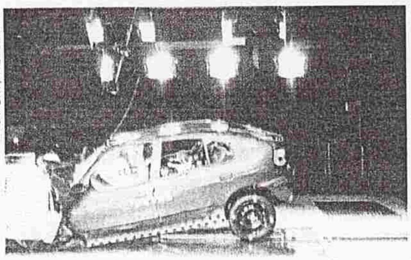


Figura 5.15 *Crash-test* mostrando o uso de *air-bag* em colisão.

Verifica-se uma situação semelhante quando um carro freia bruscamente. O motorista é jogado contra o pára-brisa. A existência do *air-bag* aumenta o intervalo de tempo de impacto e diminui a intensidade da força de impacto. (Fig. 5.15)

Quando pulamos de certa altura, ao atingirmos o solo não mantemos as pernas estendidas, mas as flexionamos durante a colisão, a fim de aumentarmos o intervalo de tempo de contato com o solo e diminuirmos a intensidade da força de impacto. (Fig. 5.16)

Você já deve ter observado lutadores de caratê quebrando uma tábua grossa ou uma pilha de tijolos com um golpe rápido. Sendo o intervalo de tempo em que ocorre o golpe extremamente pequeno, a força de impacto é muito intensa. (Fig. 5.17)

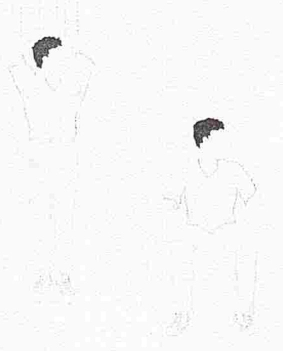


Figura 5.16 (A) Pulo. (B) Impacto com o solo.

CID

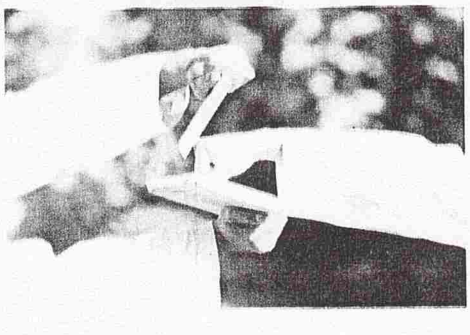
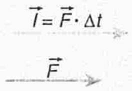


Figura 5.17 Lutador de caratê quebrando tábua.

A grandeza vetorial $\vec{F} \cdot \Delta t$ é indicada por $\vec{I}$ e recebe o nome de **impulso da força $\vec{F}$ durante o intervalo de tempo Δt**. Ou seja:

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

A direção e o sentido do impulso $\vec{I}$ são os mesmos da força $\vec{F}$. No SI, a unidade de medida do impulso é o N · s.



Assim, podemos escrever: $\Delta\vec{Q} = \vec{I}$

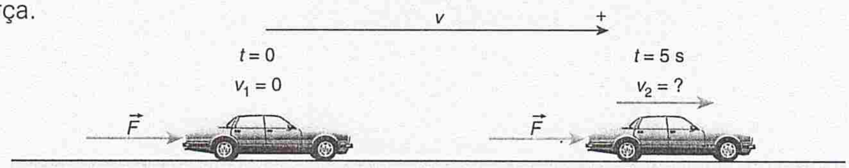
Ou seja:

A variação da quantidade de movimento de um corpo num certo intervalo de tempo é igual ao impulso da força resultante no mesmo intervalo de tempo.

Esse resultado constitui o **teorema do impulso**. Note que, no SI, o kg · m/s é equivalente a N · s: $1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}$

Para aplicarmos os conceitos expostos, considere a situação proposta a seguir.

Um carrinho de massa 0,5 kg, inicialmente em repouso numa mesa, é submetido à ação de uma força horizontal constante de intensidade 2 N. Vamos calcular a velocidade que o carrinho adquire 2 s após a aplicação da força.

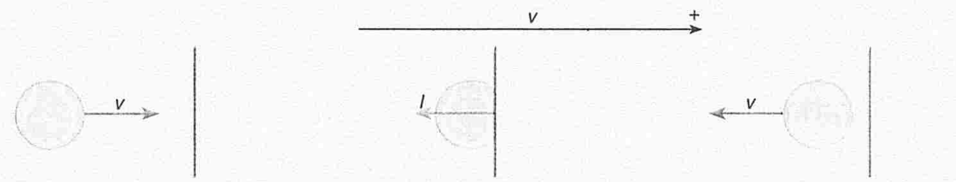


Como todos os vetores têm a mesma direção, podemos aplicar o teorema do impulso, trabalhando com uma igualdade escalar:

$$\Delta Q = I$$
$$m \cdot v_2 - m \cdot v_1 = F \cdot \Delta t$$
$$0{,}5 \cdot v_2 - 0{,}5 \cdot 0 = 2 \cdot 2$$
$$v_2 = 8 \text{ m/s}$$

No caso a seguir, o impulso da força provoca inversão no sentido da velocidade.

Uma bola de tênis de massa m colide com uma parede. Imediatamente antes e imediatamente depois da colisão, a velocidade da bola é perpendicular à parede e tem o mesmo módulo v (colisão perfeitamente elástica). Vamos determinar o módulo do impulso da força que a parede exerce sobre a bola.



Antes da colisão · Durante a colisão · Depois da colisão

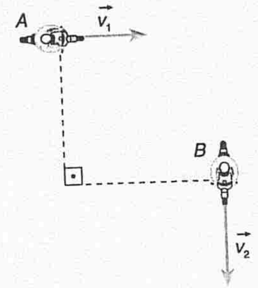
$$\Delta Q = I$$
$$m \cdot v_2 - m \cdot v_1 = I$$
$$m \cdot v - (-m \cdot v) = I$$
$$I = 2 \cdot m \cdot v$$

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Observe como calcular a variação $\Delta\vec{Q}$ da quantidade de movimento no caso de as velocidades terem direções diferentes.

Uma moto de massa $m = 200$ kg atinge o ponto A de sua trajetória com velocidade $v_1 = 15$ m/s. Em seguida, descreve uma trajetória circular, atingindo o ponto B com velocidade $v_2 = 20$ m/s, continuando seu movimento em linha reta, conforme a figura ao lado.

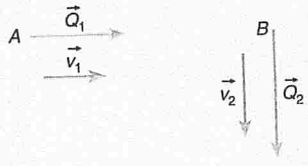
Vamos representar, entre as posições A e B, a variação $\Delta\vec{Q}$ da quantidade de movimento da moto e, em seguida, calcular seu módulo.



Na figura ao lado, representamos as quantidades de movimento da moto nas posições A e B. Seus módulos valem:

$$Q_1 = m \cdot v_1 = 200 \cdot 15 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 3.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$Q_2 = m \cdot v_2 = 200 \cdot 20 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 4.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$



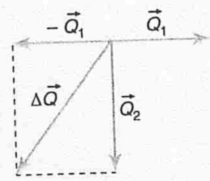
O vetor $\Delta\vec{Q} = \vec{Q}_2 - \vec{Q}_1 = \vec{Q}_2 + (-\vec{Q}_1)$ é obtido somando o vetor $\vec{Q}_2$ com o vetor $-\vec{Q}_1$. Este último tem a mesma direção, o mesmo módulo e sentido contrário de $\vec{Q}_1$.

O módulo de $\Delta\vec{Q}$ é obtido pela aplicação do teorema de Pitágoras ao triângulo colorido:

$$(\Delta Q)^2 = (Q_1)^2 + (Q_2)^2$$

$$(\Delta Q)^2 = (3.000)^2 + (4.000)^2$$

$$\Delta Q = 5.000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$



Observe que a variação da quantidade de movimento $\Delta\vec{Q}$ é o impulso $\vec{I}$ que a moto sofreu entre as posições A e B.

Proposta experimental

Para este experimento, você precisa do seguinte material:

- uma bolinha de tênis;
- uma bolinha feita com massa de modelar ou massa de vidraceiro;
- uma trena ou uma fita métrica.

Solte cada uma das bolinhas de uma certa altura H, por exemplo $H = 2$ m. Após o primeiro choque com o solo, determine a correspondente altura máxima h que cada bolinha atinge. Existe uma grandeza chamada **coeficiente de restituição** (e) que depende das propriedades elásticas dos materiais que constituem os corpos que colidem (no caso, a bolinha de tênis e o solo e a bolinha feita de massa de modelar e o solo). O coeficiente de restituição é calculado pela relação: $e = \sqrt{\frac{h}{H}}$.

Determine o coeficiente de restituição referente a cada um dos choques na experiência que você realizou.

Existem três tipos de choques:

1º) perfeitamente elástico: $e = 1$. Neste caso, temos $h = H$.

2º) perfeitamente inelástico: $e = 0$. Neste tipo de choque, resulta $h = 0$.

3º) parcialmente elástico: $0 < e < 1$, o que implica $0 < h < H$.

Como se classifica cada um dos choques, na experiência que você realizou (perfeitamente elástico, perfeitamente inelástico ou parcialmente elástico)?

EXERCÍCIOS

O impulso de uma força constante $\vec{F}$ que age numa partícula durante um intervalo de tempo Δt é a grandeza vetorial $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$. A direção e o sentido de $\vec{I}$ são os mesmos de $\vec{F}$. A intensidade de $\vec{I}$ é igual a $I = F \cdot \Delta t$. A unidade de $\vec{I}$ no SI é N · s. Com base no texto, responda às questões de 15 a 17.

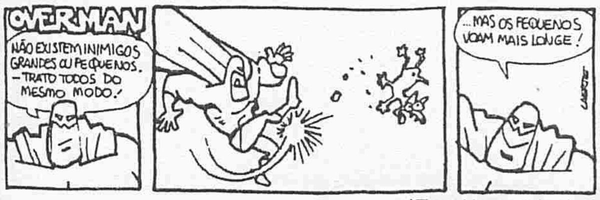
Um jogador de futebol dá um chute em uma bola, aplicando-lhe uma força de intensidade 400 N, durante 0,10 s. Determine a intensidade do impulso da força aplicada pelo jogador.

16 Uma bola de massa $m = 0{,}50$ kg é abandonada de certa posição e atinge o solo depois de 2,0 s. Sendo a aceleração gravitacional $g = 10$ m/s^2, determine a direção, o sentido e a intensidade do impulso do peso da bola, durante o intervalo de tempo de queda.

17 Num jogo de vôlei, um jogador, ao efetuar uma cortada, aplica na bola um impulso de intensidade de 80 N · s. Se a duração da cortada é de 0,20 s, determine a intensidade média da força que o jogador aplica na bola.

18 (Unisinos-RS)

STRIPTIRAS **Laerte**



(*Zero Hora*, 20/08/98)

Para um mesmo impulso aplicado em dois corpos diferentes, o de maior massa sofre variação da quantidade de movimento ____________ de menor massa e ____________ variação de velocidade. As lacunas são corretamente preenchidas, respectivamente, por:

a) menor que o; maior
b) menor que o; menor
c) igual ao; menor
d) igual ao; maior
e) maior que o; maior

19 Na cobrança de uma falta, um jogador de futebol dá um chute em uma bola de massa 0,5 kg. Imediatamente após o chute, a bola adquire a velocidade de 30 m/s.

a) Determine o módulo do impulso que o pé do jogador aplica sobre a bola.
b) Sendo a intensidade da força média que o pé do jogador aplica sobre a bola $1{,}5 \cdot 10^3$ N, determine o intervalo de tempo de interação do pé com a bola.

20 (PUC-Campinas-SP) Um carrinho de massa igual a 1,5 kg está em movimento retilíneo com velocidade de 2,0 m/s quando fica submetido a uma força resultante de intensidade 4,0 N, na mesma direção e sentido do movimento, durante 6,0 s. Ao final de 6,0 s, a quantidade de movimento e a velocidade do carrinho têm valores, em unidades do SI, respectivamente iguais a:

a) 27 e 18
b) 24 e 18
c) 18 e 16
d) 6,0 e 16
e) 3,0 e 16

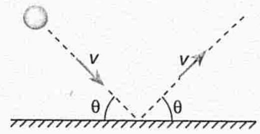
21 Uma bola de massa de 200 g move-se com velocidade 20 m/s quando se choca perpendicularmente com uma parede. Após a colisão, a bola retorna com velocidade de 20 m/s no sentido oposto ao do movimento inicial. Determine:

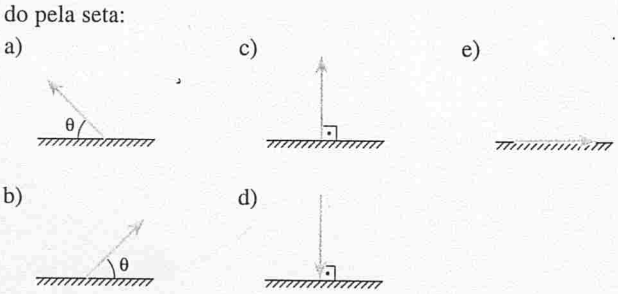
a) o módulo da variação da quantidade de movimento sofrida pela bola.
b) a intensidade da força média sobre a bola, sabendo-se que a colisão durou 0,01 s.

22 (UFMS) Considere uma panela com milho de pipoca. Os grãos estouram a uma taxa constante de n grãos por segundo. Suponha que cada grão, ao estourar, adquira uma velocidade v_0 na direção vertical e que essa velocidade seja mantida até que o grão se choque contra a tampa da panela, quando, então, o grão adquire velocidade $-v_0$. Qual é a força média que os grãos de massa uniforme m exercem sobre a tampa da panela? Despreze o peso de cada grão.

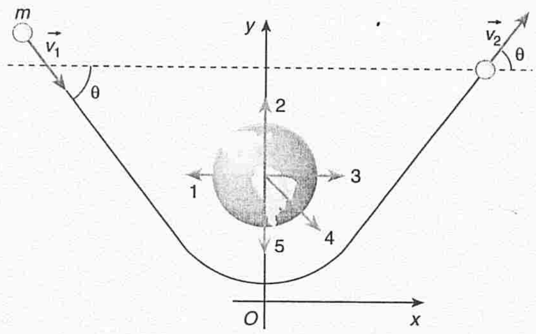
a) $n \cdot m \cdot v_0$
b) $2n \cdot m \cdot v_0$
c) $m \cdot v_0$
d) $\frac{1}{2} \cdot n \cdot m \cdot v_0$
e) $4n \cdot m \cdot v_0$

23 A figura representa a vista superior da trajetória de uma bola de bilhar quando colide com a tabela da mesa. A velocidade da bola antes e depois da colisão tem o mesmo módulo v. O impulso $\vec{I}$ exercido sobre a bola, durante a colisão, é mais bem representado pela seta:





24 (Fuvest-SP) Um meteorito, de massa m muito menor que a massa M da Terra, dela se aproxima, seguindo a trajetória indicada na figura. Inicialmente, bem longe da Terra, podemos supor que sua trajetória seja retilínea e sua velocidade $\vec{v}_1$. Devido à atração gravitacional da Terra, o meteorito faz uma curva em torno dela e escapa para o espaço sem se chocar com a superfície terrestre. Quando se afasta suficientemente da Terra, atinge uma velocidade final $\vec{v}_2$, de forma que, aproximadamente, $|\vec{v}_2| = |\vec{v}_1|$, podendo sua trajetória ser novamente considerada retilínea. Ox e Oy são os eixos de um sistema de referência inercial, no qual a Terra está inicialmente em repouso.



Podemos afirmar que a direção e o sentido da quantidade de movimento adquirida pela Terra são indicados aproximadamente pela seta:

a) 1
b) 2
c) 3
d) 4
e) 5

25 (U. E. Londrina-PR) Um veículo de massa 500 kg, percorrendo uma estrada horizontal, entra numa curva com velocidade de 54 km/h e sai numa direção que forma ângulo de 60° com a direção inicial e com a mesma velocidade de 54 km/h. Em unidades do SI, a variação da quantidade de movimento do veículo ao fazer a curva, em módulo, foi de:

a) $7{,}5 \cdot 10^4$
b) $5{,}0 \cdot 10^4$
c) $3{,}0 \cdot 10^4$
d) $7{,}5 \cdot 10^3$
e) $3{,}0 \cdot 10^3$

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Aplicação Tecnológica

O *air-bag*

Para evitar que o motorista e o passageiro do banco da frente sejam projetados contra o pára-brisa, numa colisão frontal, muitos carros são equipados com *air-bags*. São bolsas infláveis instaladas no volante e no painel de instrumentos, acima do porta-luvas. As bolsas inflam quando o carro sofre desaceleração brusca, detectada por sensores eletrônicos. Estes enviam um sinal para uma unidade de controle que ativa um explosivo, provocando reações químicas. Nessas reações um determinado volume de gás nitrogênio (N_2) é liberado, inflando os *air-bags* rápida e simultaneamente.

A mistura responsável pelas reações químicas é constituída por nitreto de sódio (NaN_3) – também conhecido como azoteto de sódio ou azida sódica –, por nitrato de potássio (KNO_3) e por dióxido de silício (SiO_2).

Com a detonação do explosivo, deflagra-se a seguinte reação química:

$$2NaN_3 \longrightarrow 2Na + 3N_2$$

Nesta reação, 130 gramas de NaN_3 produzem 67 litros de N_2.

O sódio, produto altamente reativo da reação anterior, reage com o nitrato de potássio, gerando mais nitrogênio.

$$10Na + 2KNO_3 \longrightarrow K_2O + 5Na_2O + N_2$$

O óxido de potássio (K_2O) e o óxido de sódio (Na_2O) reagem com o dióxido de silício (SiO_2), formando um silicato alcalino, que é um composto estável e não inflamável.

$$K_2O + Na_2O + SiO_2 \longrightarrow \text{silicato alcalino}$$

Ao serem preenchidos pelo gás nitrogênio, os *air-bags* rompem as capas protetoras existentes no volante e no painel, dando passagem às bolsas infladas.

O que diz a Mídia!

Reportagem

O *air-bag* chega ao cinto

Depois de aparecer no volante, no painel e acima das janelas, o *air-bag* chega agora ao cinto de segurança. A idéia é bem-vinda: apesar de salvar vidas, o cinto também machuca o ocupante em acidentes mais graves, principalmente se utilizado de modo errado, muito perto do pescoço. A Ford está em fase adiantada do projeto Cinto Inteligente (*Smart Belt*). A marca desenvolveu um tubo inflável para proteger toda a área em contato com o corpo. É quase imperceptível de tão fino e compacto. Na verdade, o sistema de ar comprimido que serve de disparador fica fora do cinto, na coluna do carro. Os testes comprovaram que é possível reduzir o impacto e os ferimentos, sobretudo no pescoço. Os estudos indicam que a redução nas lesões chega a 50%.

CARVALHO, Alexandre. *Galileu*, Globo, edição 116, março de 2001.

4 CENTRO DE GRAVIDADE

Você provavelmente conhece o brinquedo João-Teimoso. Quando deslocado da posição de equilíbrio, ele sempre retorna à posição inicial. (Fig. 5.18)

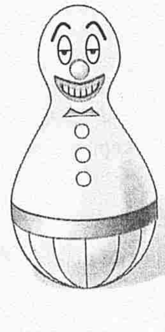


Figura 5.18

Sentado numa cadeira, com o tronco e as tíbias na vertical e os pés no solo, você não consegue se levantar por esforço próprio. (Fig. 5.19)

Para explicar essas situações, devemos saber o que é e onde se localiza o **centro de gravidade *CG*** de um corpo e quais as condições para que o corpo esteja em equilíbrio estável.

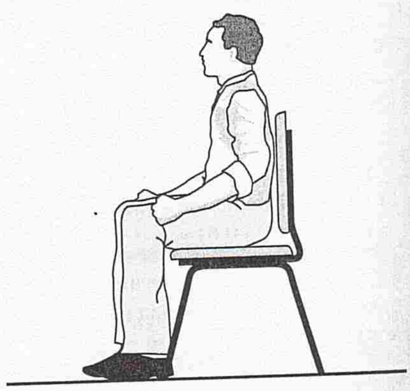


Figura 5.19

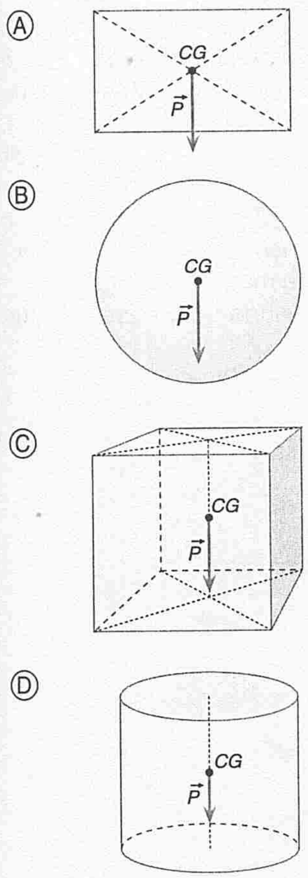


Figura 5.20 Corpos com distribuição homogênea de massa e simétricos. (A) chapa retangular, (B) esfera, (C) cubo e (D) cilindro.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

O centro de gravidade *CG* de um corpo é o ponto de aplicação do peso do corpo. É um ponto no qual, podemos imaginar, concentra-se todo o peso do corpo.

Para os corpos homogêneos e que apresentam simetria, o centro de gravidade coincide com o seu centro geométrico. (Fig. 5.20)

Pode-se localizar o centro de gravidade de uma placa de forma irregular da seguinte maneira:

- suspende-se a placa por um ponto *A* e traça-se, com auxílio de um fio de prumo, a reta vertical *r* que passa pelo ponto de suspensão;
- repete-se a operação, suspendendo-se a placa por um outro ponto *B*, e determina-se a reta vertical *s*.

O centro da gravidade da placa é o ponto de interseção das retas *r* e *s*. (Fig. 5.21)

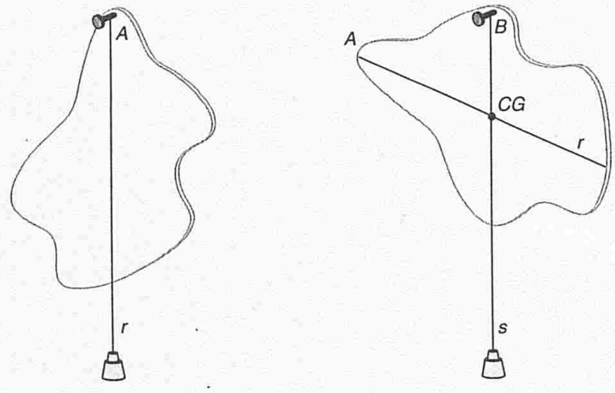


Figura 5.21 Determinação do centro de gravidade (CG) em uma placa de forma irregular.

Além do centro de gravidade *CG*, outro ponto apresenta propriedades importantes. É o **centro de massa *CM***, no qual podemos considerar que se concentra toda a massa do corpo.

Nos locais onde podemos considerar a aceleração gravitacional *g* constante, o centro de gravidade **coincide** com o centro de massa.

Um corpo que se encontra no espaço, livre da atração gravitacional da Terra e de outros corpos celestes, tem centro de massa mas não tem centro de gravidade.

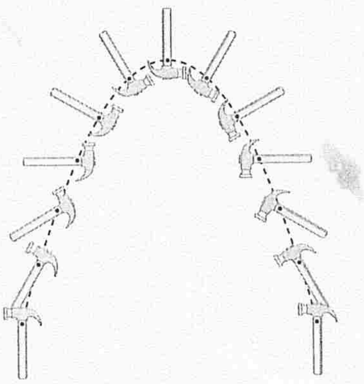


Figura 5.22 Trajetória do centro de massa.

Propriedade do centro de massa

Quando um corpo qualquer é lançado obliquamente das proximidades da superfície terrestre, embora seus pontos descrevam um movimento desordenado, o centro de massa desloca-se como se fosse um ponto material de massa igual à massa total do corpo e submetido ao peso total do corpo. Desse modo, o centro de massa descreve uma trajetória parabólica. (Fig. 5.22)

O movimento do centro de massa de um corpo somente se altera se houver forças externas agindo sobre este.

Portanto, as forças internas não alteram o movimento do centro de massa. Assim, ao pular de um trampolim, realizando um salto ornamental, a atleta movimenta seus braços, pernas e cabeça, alterando a posição do centro de massa do seu corpo. Entretanto, as forças responsá-

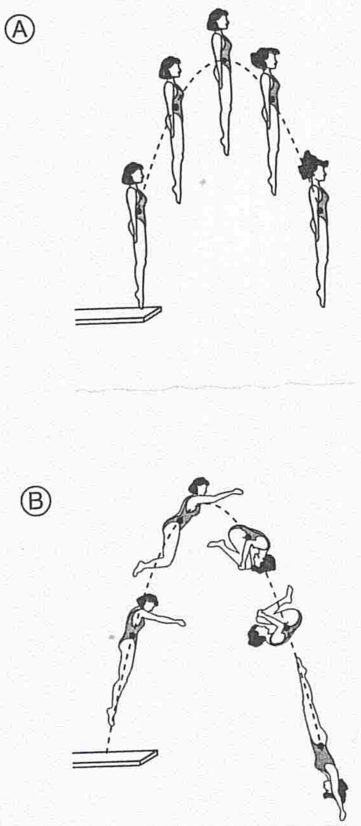


Figura 5.23

veis por essa alteração são internas e não modificam o movimento do centro de massa, que descreve uma trajetória parabólica em relação à Terra. O movimento pode ser de translação pura (Fig. 5.23-A), ou de translação e rotação. (Fig. 5.23-B).

O mesmo acontece quando uma pessoa pula verticalmente. Ao sair do chão, ela fica somente sob a ação de seu peso. Qualquer movimentação de braços, pernas e cabeça que a pessoa faça, durante seu percurso, altera a posição do seu centro de massa, mas não altera seu movimento vertical nem a altura máxima que seu centro de massa irá atingir.

Note as posições do centro de massa quando uma pessoa ergue um braço e quando ergue os dois. (Fig. 5.24)

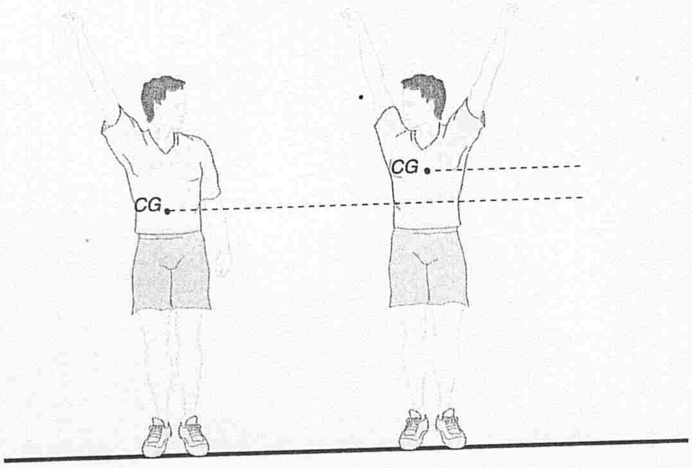


Figura 5.24 O centro de gravidade (CG) "sobe" quando a pessoa levanta os dois braços.

Ao saltar com um braço erguido, uma pessoa atinge uma altura maior do que com os dois. Isto porque o centro de massa deve atingir a mesma altura máxima. Estamos considerando que o impulso que o chão aplica na pessoa é o mesmo nos dois casos. É por isso que, num jogo de vôlei, o atleta ergue um só braço para "cortar", e ergue os dois braços para bloquear. (Fig. 5.25)

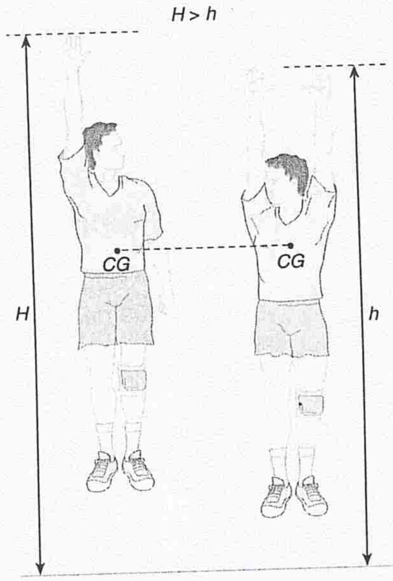


Figura 5.25 Ao dar uma "cortada", o jogador de vôlei atinge uma altura maior (H) do que quando faz um bloqueio.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

5 EQUILÍBRIO DE CORPOS APOIADOS

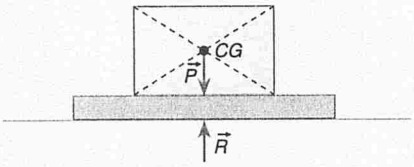


Figura 5.26

Um bloco de centro de gravidade *CG* está apoiado sobre uma tábua horizontal. O peso do bloco é $\vec{P}$, e $\vec{R}$ é a força que a tábua exerce no bloco. Essas forças têm mesma direção, mesma intensidade e sentidos opostos. A resultante é nula e, portanto, o bloco está em equilíbrio. (Fig. 5.26)

Vamos inclinar gradativamente a tábua e supor que o atrito seja suficiente para o bloco não escorregar. Vejamos três etapas. Na primeira, o bloco não tomba, e **a reta vertical traçada pelo centro de gravidade *CG* passa pela base de apoio**. Em outras palavras, o centro de gravidade *CG* está sobre a área que serve como base de apoio. (Fig. 5.27-A). Na segunda etapa, o bloco também não tomba, mas está na iminência de tombar. (Fig. 5.27-B) Na terceira etapa, com um ligeiro aumento na inclinação da tábua, o bloco tomba. Note agora que a reta vertical traçada pelo *CG* não passa pela base de apoio. (Fig. 5.27-C)

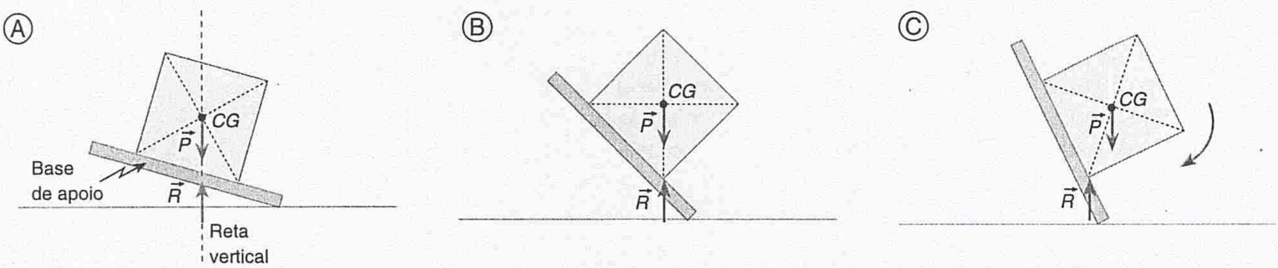


Figura 5.27 Condições de equilíbrio para o bloco.

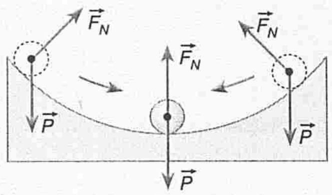


Figura 5.28 Esfera em equilíbrio estável.

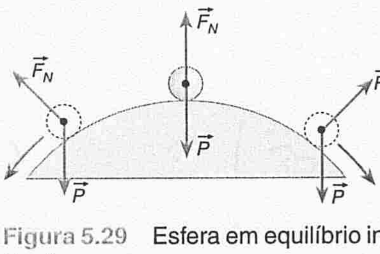


Figura 5.29 Esfera em equilíbrio instável.

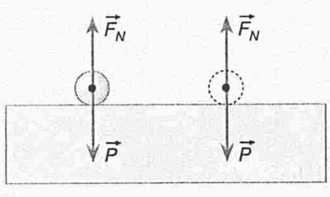


Figura 5.30 Esfera em equilíbrio indiferente.

Tipos de equilíbrio

Considere uma esfera homogênea em equilíbrio num apoio côncavo. Deslocando-a ligeiramente da posição de equilíbrio e abandonando-a em seguida, ela tende a voltar à posição de equilíbrio. Nesse caso, dizemos que o equilíbrio da esfera é **estável**. (Fig. 5.28)

Se a esfera estiver em equilíbrio num apoio convexo, o equilíbrio é **instável**: deslocando-se ligeiramente a esfera da posição de equilíbrio, ela se afasta ainda mais dessa posição. (Fig. 5.29)

Se a esfera estiver em equilíbrio num plano horizontal, seu equilíbrio é **indiferente**: se for ligeiramente deslocada da posição de equilíbrio, mantida no plano horizontal, ela permanece em equilíbrio na nova posição. (Fig. 5.30)

Em geral, no equilíbrio estável, um deslocamento qualquer do corpo eleva seu *CG*; no equilíbrio instável, seu *CG* é abaixado; no equilíbrio indiferente, a altura do *CG* não se altera.

Considere um corpo, ou um sistema de corpos, apoiado num ponto e em equilíbrio. **Quanto mais baixo estiver o centro de gravidade em relação ao ponto de apoio, mais estável é o equilíbrio.**

Para constatar esse fato, considere uma rolha atravessada por um prego. O centro de gravidade situa-se na própria rolha. Espetam-se dois garfos iguais um em cada lado da rolha e apóia-se o sistema no gargalo de uma garrafa, pela ponta do prego. O centro de gravidade do sistema fica abaixo do ponto de apoio, e o sistema adquire grande estabilidade. (Fig. 5.31)

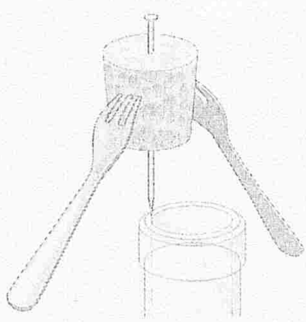


Figura 5.31 Sistema em equilíbrio estável.

O brinquedo João-Teimoso tem seu centro de gravidade *CG* muito baixo — bem próximo da base de apoio —, o que lhe confere grande estabilidade. Quando ele é inclinado, o ponto CG sofre uma elevação e, quando solto, o João-Teimoso retorna à posição de equilíbrio. (Fig. 5.32)

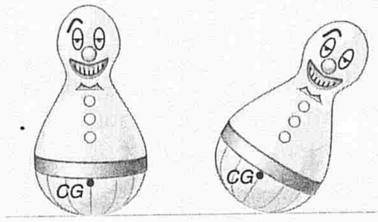


Figura 5.32

Já uma pessoa, sentada numa cadeira, mantendo o tronco e as tíbias na posição vertical e os pés no chão, não consegue por esforço próprio se levantar. Quando tenta se levantar, ela perde contato com a cadeira, e a reta vertical traçada pelo seu *CG* não passa pela base de apoio, que é a área definida pelos seus pés e pelo espaço entre os pés. (Fig. 5.33)

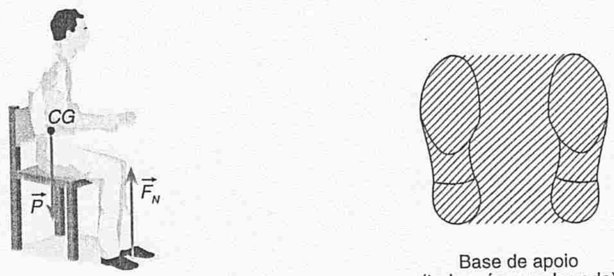


Figura 5.33

EXERCÍCIOS

26 Um caminhão que transporta uma carga está parado numa ladeira, conforme a figura 1. Nessa situação, o centro de gravidade do sistema (caminhão e carga) é o ponto *A*. A carga escorrega, e o centro de gravidade do sistema passa a ser o ponto *B* (figura 2). Verifique se o sistema tomba.

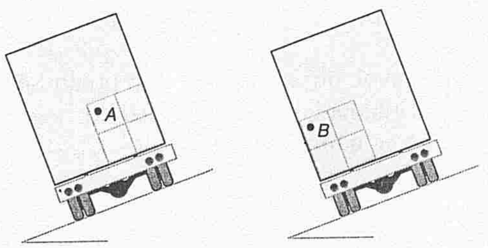
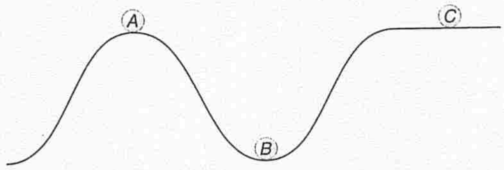
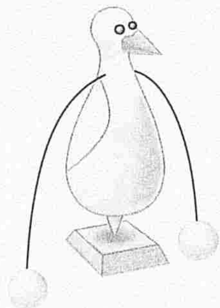


Figura 1 Figura 2

27 Três esferas, *A*, *B* e *C*, idênticas, encontram-se em equilíbrio nas posições mostradas na figura. Qual o tipo de equilíbrio de cada esfera?



28 (Vunesp-SP) É dado um passarinho de madeira cujo centro de gravidade situa-se no seu próprio corpo. Em seguida, fixamos no passarinho um arame com duas bolas de madeira, conforme indica a figura.



Apoiando-se o pé do passarinho numa superfície plana, ele permanece em equilíbrio estável, porque o centro de gravidade do sistema (passarinho + fio com bolas) situa-se:

a) no pescoço do passarinho, por onde passa o fio.
b) na barriga do passarinho.
c) no bico do passarinho.
d) entre os olhos do passarinho.
e) abaixo do ponto de apoio do passarinho na superfície plana.

6 MOMENTO ANGULAR

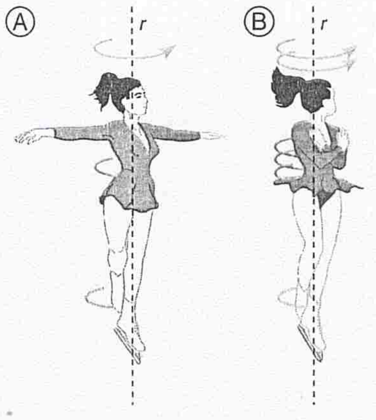


Figura 5.34

Observe uma patinadora girando em torno do eixo vertical *r*. Inicialmente ela gira com os braços abertos (**Fig. 5.34-A**) e, em seguida, fechados (**Fig. 5.34-B**). Será que alguma grandeza física permanece constante durante os movimentos de rotação, a exemplo do que ocorre nas colisões, explosões, enfim nos chamados movimentos de translação, conforme já estudamos?

Ao passar de uma posição (A) para a outra (B), modificou-se a distribuição de massa em relação ao eixo de rotação da patinadora, e também a velocidade com que ela gira em torno desse eixo sofre uma variação.

Com os braços fechados, a massa está mais concentrada em relação ao eixo *r*, e a velocidade de rotação é maior. Com os braços abertos, ocorre exatamente o contrário.

A grandeza que leva em conta a distribuição de massa de um corpo em relação a um eixo de rotação é chamada **momento de inércia** ou **inércia rotacional do corpo**, e é representada pelo símbolo I.

Essa grandeza mede a resistência do corpo à variação de seu estado de rotação, em torno de um certo eixo. Quanto mais próxima a massa estiver do eixo de rotação, menor será o momento de inércia. Assim, o momento de inércia da patinadora em relação ao eixo *r* é menor com os braços fechados do que com os braços abertos. Mas, com os braços fechados, maior será o módulo da **velocidade de rotação** ($\vec{\omega}$), isto é, a **velocidade angular** (ω) é maior.

O produto do momento de inércia pela velocidade de rotação **permanece constante durante a rotação** e recebe o nome de **momento angular** ($\vec{L}$) : $\vec{L} = \vec{I} \cdot \vec{\omega}$

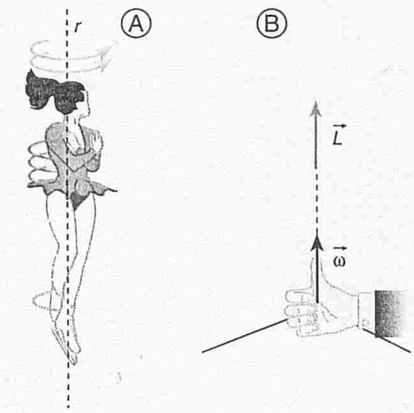


Figura 5.35 (A) Bailarina girando com os braços fechados em torno do eixo de rotação *r*. (B) Representação dos vetores momento angular ($\vec{L}$) e velocidade angular ($\vec{\omega}$).

A direção e o sentido de $\vec{L}$ são os mesmos de $\vec{\omega}$: a direção de $\vec{\omega}$ é a do eixo de rotação, e o sentido é dado pela regra da mão direita, isto é, o polegar da mão direita fornece o sentido de $\vec{\omega}$, quando os demais dedos semidobrados são dispostos no sentido de rotação. (**Fig. 5.35**)

Outra situação análoga ocorre quando um atleta realiza um "salto mortal".

Note que, à medida que ele sobe, seu momento de inércia — em relação ao eixo *r* perpendicular ao plano de seu movimento e que passa pelo seu centro de gravidade — diminui, e sua velocidade angular aumenta. (**Fig. 5.36**)

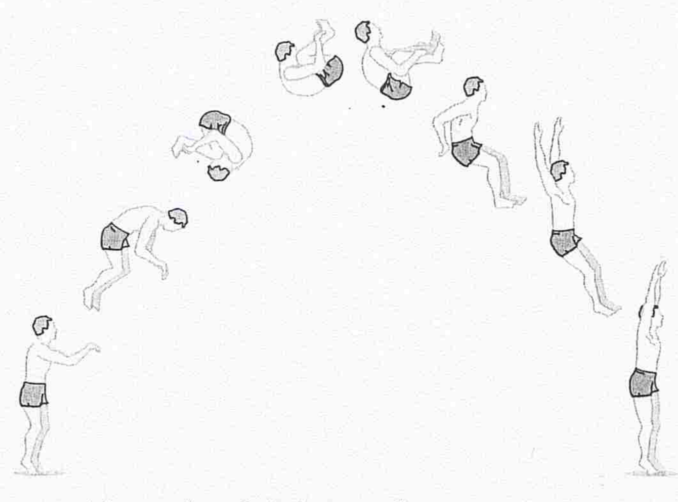


Figura 5.36 Atleta realizando "salto mortal".

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Você sabe por quê?

Sente-se numa cadeira giratória e não encoste os pés no chão. Fique com os braços estendidos e peça a um colega para girar a cadeira. Em seguida, feche os braços. A cadeira passa a girar mais depressa, isto é, aumenta sua velocidade angular. Você sabe explicar por que isso ocorre?

Repetindo o que foi descrito, mas segurando um par de halteres, o efeito observado é mais acentuado. Explique também por quê.

FOTOS: POMPEU / STUDIO 47

A conservação do momento angular

Considere uma engrenagem que pode girar em torno de um eixo fixo *r*. Se aplicarmos ao corpo uma força $\vec{F}$, cuja direção **não passa pelo eixo de rotação**, ele entra em movimento de rotação em torno do eixo *r*. (Fig. 5.37) Dizemos, nesse caso, que a força produz um **torque** ou um **momento** em relação ao eixo de rotação *r*, que é responsável pela variação do momento angular do corpo.

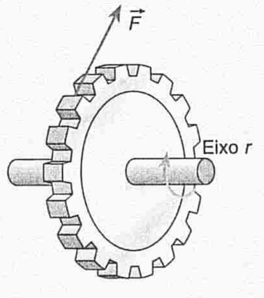


Figura 5.37 Engrenagem acoplada a um eixo *r*.

A roda pode girar em torno do eixo *r*, que é perpendicular ao plano da roda e passa pelo centro *O*. (**Fig. 5.38**) O torque $\vec{T}$ da força $\vec{F}$ em relação ao eixo *r* tem módulo dado pelo produto do módulo da força pela distância *d* do ponto *O* à linha de ação da força: $T = F \cdot d$

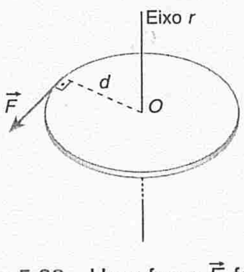


Figura 5.38 Uma força $\vec{F}$ faz a roda girar, produzindo um torque $\vec{T}$.

A direção de $\vec{T}$ é a do eixo *r*, e o sentido é dado pela regra da mão direita: o polegar da mão direita fornece o sentido de $\vec{T}$, quando os demais dedos semidobrados são dispostos no sentido da rotação que a força $\vec{F}$ produz no disco em torno do ponto *O*. (**Fig. 5.39**)

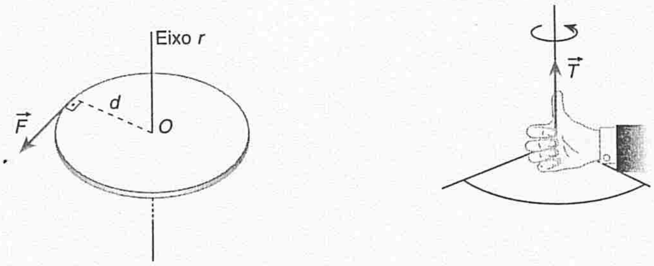


Figura 5.39 Sentido do torque $\vec{T}$.

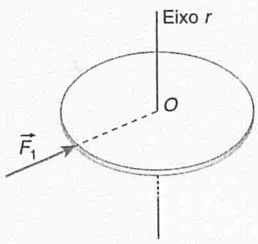


Figura 5.40 Situação em que o torque é nulo.

O torque da força $\vec{F}_1$ em relação ao ponto *O* é nulo, pois a distância de *O* à linha de ação de $\vec{F}_1$ é nula. Esse torque não produz rotação do disco em torno do eixo *r*. (Fig. 5.40)

Já o torque da força $\vec{F}_2$ em relação ao ponto *O* tem módulo dado por $T = F_2 \cdot \text{sen}\,\theta \cdot d$.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

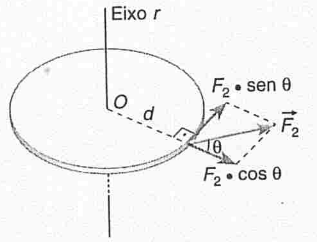


Figura 5.41

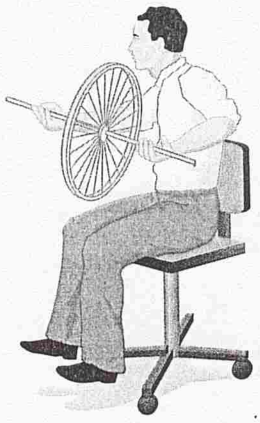


Figura 5.42

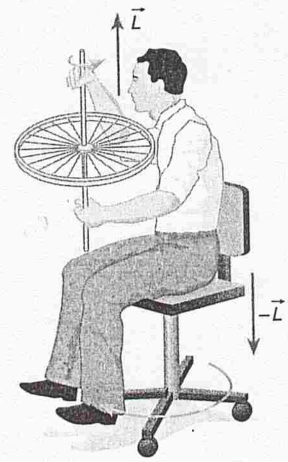


Figura 5.43

Observe que o momento da componente $F_2 \cdot \cos \theta$ é nulo, pois sua linha de ação passa pelo eixo de rotação. (Fig. 5.41)

Se o torque externo resultante que age num corpo em rotação for nulo, então o momento angular permanece constante.

O enunciado acima constitui o **princípio da conservação do momento angular**.

Para exemplificarmos a aplicação desse princípio, consideremos uma cadeira que pode girar em torno de seu eixo vertical, praticamente sem atrito. Nessas condições, o torque externo vertical é nulo. Uma pessoa encontra-se sentada na cadeira, sem encostar os pés no chão e segurando o eixo de uma roda de bicicleta. Imagine a roda girando em torno desse eixo, inicialmente na horizontal. (Fig. 5.42)

Como o torque externo vertical é nulo, concluímos que há conservação da componente vertical do momento angular. Inicialmente ele é nulo.

Imagine agora que a pessoa gire o eixo da roda, de modo a mantê-lo vertical e a roda girando num certo sentido. A cadeira passa a girar em sentido contrário para que o momento angular vertical permaneça nulo. (Fig. 5.43)

Quando o momento angular não se conserva

Se o torque externo resultante que age num corpo não for nulo, ocorrerá variação do momento angular do corpo.

Para exemplificarmos, considere um garoto que coloca um pião a girar em torno de seu eixo, que é inicialmente vertical. O peso $\vec{P}$ do pião passa pelo ponto O de contato com o solo e, portanto, seu torque em relação a O é nulo. O momento angular $\vec{L}$ tem a direção do eixo de rotação. (Fig. 5.44)

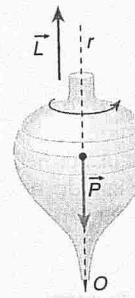


Figura 5.44 Pião com eixo de rotação na vertical.

Entretanto, por causa do atrito do pião com o solo, a velocidade de rotação do pião diminui, e ele se inclina. O pião continua a girar em torno de seu eixo de rotação, agora inclinado. O torque do peso $\vec{P}$ em relação ao ponto O deixa de ser nulo, e o momento angular $\vec{L}$ não mais se conserva. O eixo do pião passa a descrever uma superfície cônica em relação ao eixo vertical. Esse movimento recebe o nome de **movimento de precessão**. (Fig. 5.45)

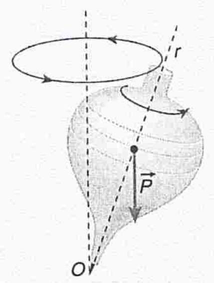


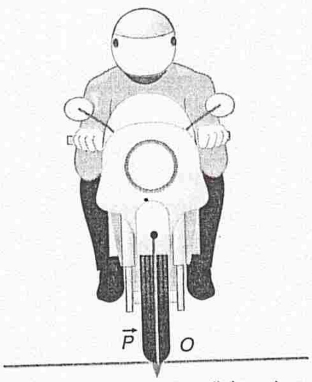
Figura 5.45 Pião em precessão.

Além dos movimentos de rotação e de translação, a Terra possui também movimento de precessão: o eixo inclinado da Terra muda gradualmente de direção, descrevendo uma superfície cônica em torno da reta normal ao plano de sua órbita em torno do Sol (plano da eclíptica). O período desse movimento é relativamente grande (aproximadamente 26.000 anos) e por isso nós não o percebemos.

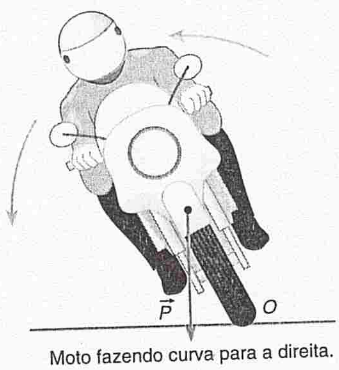
Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

Ciência, Tecnologia e Sociedade

Baseado nos conceitos de momento angular $\vec{L}$ e de torque $\vec{T}$, e sabendo que o sentido do torque é o mesmo da variação do momento angular $\Delta\vec{L}$, faça uma pesquisa e discuta com seus colegas por que um motociclista, para virar paraa direita, inclina o corpo e a moto para a direita, sem necessidade de girar a direção.



Moto deslocando se em linha reta.



Moto fazendo curva para a direita.

Aplicação Tecnológica

O helicóptero

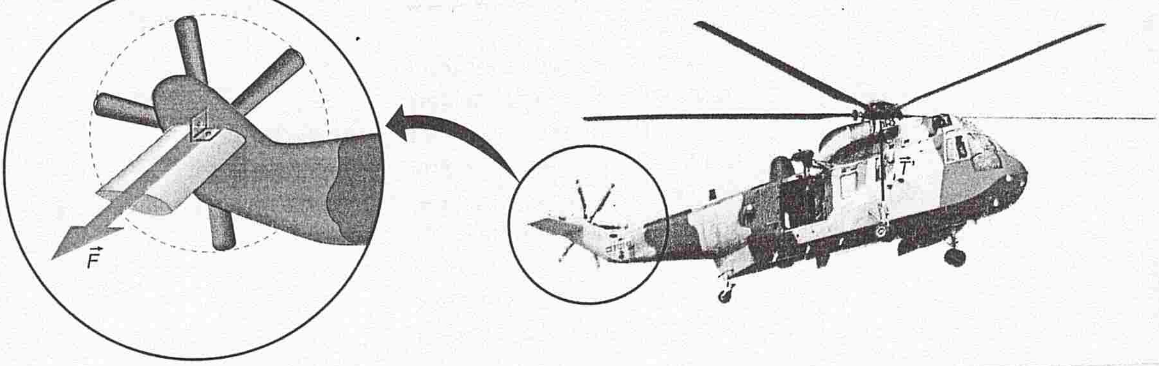
Vamos analisar o helicóptero que possui, além da hélice principal, uma outra, menor, na lateral traseira.

Quando o motor é ligado, a hélice principal gira, impulsionando o ar para baixo (força de ação). Pelo princípio da ação e reação, o ar aplica na hélice uma força de reação para cima, o que faz o helicóptero subir. Qualquer variação da velocidade angular da hélice produz uma variação de seu momento angular. Seja $\vec{T}$ o torque das forças propulsoras, responsável por essa variação de momento angular da hélice. Seja $-\vec{T}$ a reação do torque $\vec{T}$, agindo no corpo do helicóptero. Esse torque tende a girar o corpo do helicóptero em sentido oposto ao da hélice principal.

Para que isso não ocorra, é necessária a existência da hélice lateral. Esta, ao girar, empurra o ar e, pelo princípio da ação e reação, o ar empurra a hélice com uma força $\vec{F}$, que se transmite para a cauda do helicóptero.

O torque $\vec{T}'$ que a força $\vec{F}$ produz no corpo do helicóptero anula o torque $-\vec{T}$, o que dá estabilidade ao aparelho.

FOTOS: CID



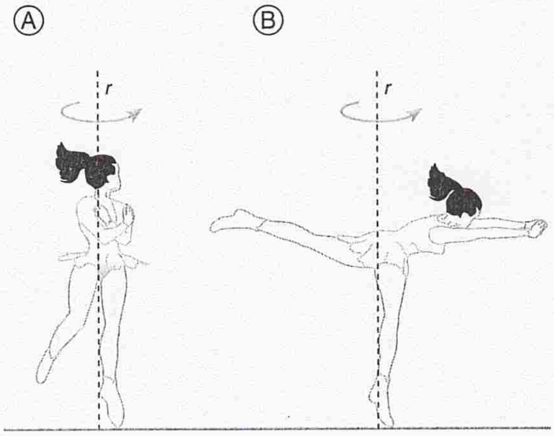
Você sabe por quê?

Existem helicópteros dotados de duas hélices principais, não possuindo hélice lateral. Explique como essas hélices agem no sentido de dar estabilidade ao aparelho.

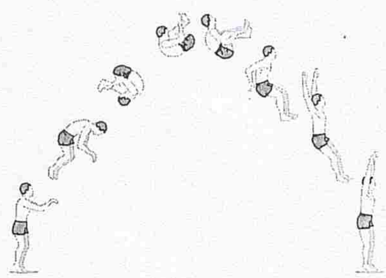
CID

EXERCÍCIOS

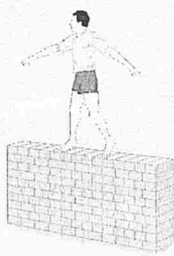
29 Uma bailarina gira em torno de um eixo vertical *r*. Analise o que ocorre com o momento de inércia da bailarina, em relação ao eixo *r*, e com sua velocidade angular, quando passa da posição (A) para a (B).



30 Um atleta realiza um "salto mortal". O que ocorre com o momento de inércia, em relação ao eixo *r* perpendicular ao plano do movimento e que passa pelo seu centro de gravidade, e com a velocidade angular do atleta, durante a subida e durante a descida?



31 Ao andar sobre um muro com os braços estendidos, uma pessoa possui maior resistência à rotação do que com os braços abaixados. Explique por quê.



Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

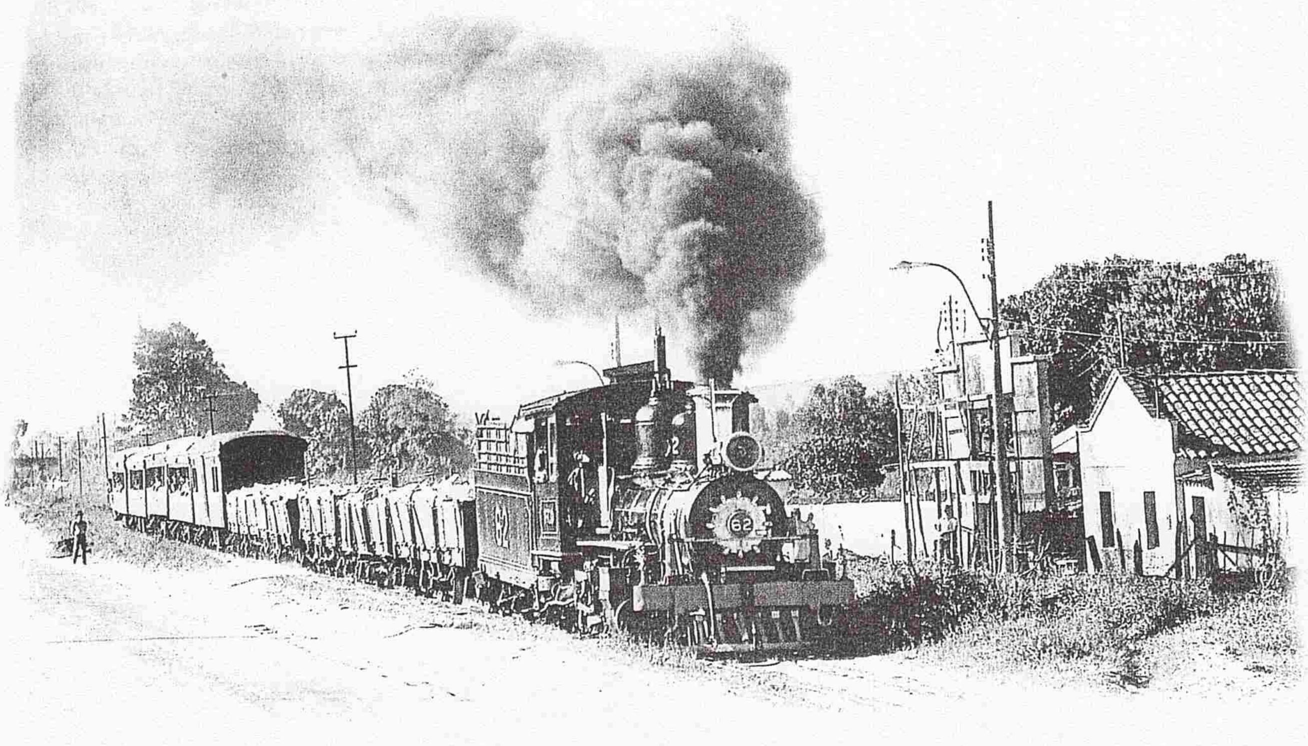
Sugestões de leitura

***Convite à Física*, de Yoav Ben-Dov. Trad. Maria Luiza X. de A. Borges (Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1996)**

"Ao partir da história para seguir o fio da evolução das idéias, *Convite à Física* remonta às questões fundadoras desta complexa ciência e oferece um notável panorama de seus grandes postulados teóricos, desde a Grécia Clássica até a teoria da relatividade de Einstein". No capítulo 3, "Matéria e força", no item **Advento das Ciências Exatas**, o livro trata dos princípios de conservação, isto é, de certas grandezas que permanecem invariantes no curso do movimento. Entre estas grandezas, destaca-se a "quantidade de movimento", sugerida por Descartes e Newton. Este livro é um irrecusável convite para conhecermos melhor o fascinante mundo da Física.

"O teste do pulo", de Mauro Ferreira (*Ciência Hoje das Crianças*, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência — SBPC —, setembro de 2.000, ano 12, n. 95)

Este artigo mostra que, para saltar de modo a atingir a maior altura possível, todos nós fazemos os mesmos movimentos de braços e pernas, mesmo sem ter aprendido com outra pessoa. Mas por que isso acontece? A Física explica.



O Brasil nos trilhos

O termo Revolução Industrial foi aplicado originalmente aos eventos que transformaram a Inglaterra, entre 1750 e 1830, de uma nação com população predominantemente rural, e com uma economia baseada na produção artesanal e na agricultura, em outra, com população crescentemente urbana, utilizada como mão-de-obra das fábricas emergentes.

Na época, os avanços da máquina a vapor consolidaram o país na posição de potência mundial. Os ingleses detinham o quase monopólio da aplicação da tecnologia a vapor no acionamento de teares e no transporte ferroviário.

No Brasil, a nova tecnologia foi utilizada pela primeira vez em 1813, na instalação de um engenho de cana na Bahia, com moenda movida a vapor. Mas foi apenas em 1852 que Irineu Evangelista de Sousa, o Visconde de Mauá, organizou a Companhia de Navegação a Vapor do Amazonas e, em 1854, criou a primeira ferrovia do Brasil, ligando Petrópolis ao Rio de Janeiro, a Estrada de Ferro Pedro II, que mais tarde passou a se chamar Central do Brasil.

A energia, que está por trás de todos esses acontecimentos, é a base de toda a sociedade. Cabe à Física estudá-la e estabelecer os princípios de sua utilização. É o que começamos a fazer neste capítulo, dando continuidade nos capítulos seguintes.

Reprodução proibida. Art.184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.