

Capítulo

12

Forças de atrito

Para melhor compreender como as forças influenciam o movimento dos corpos, devemos analisar a presença de forças descritas por leis experimentais, como a força de atrito de escorregamento e a força de resistência do ar.

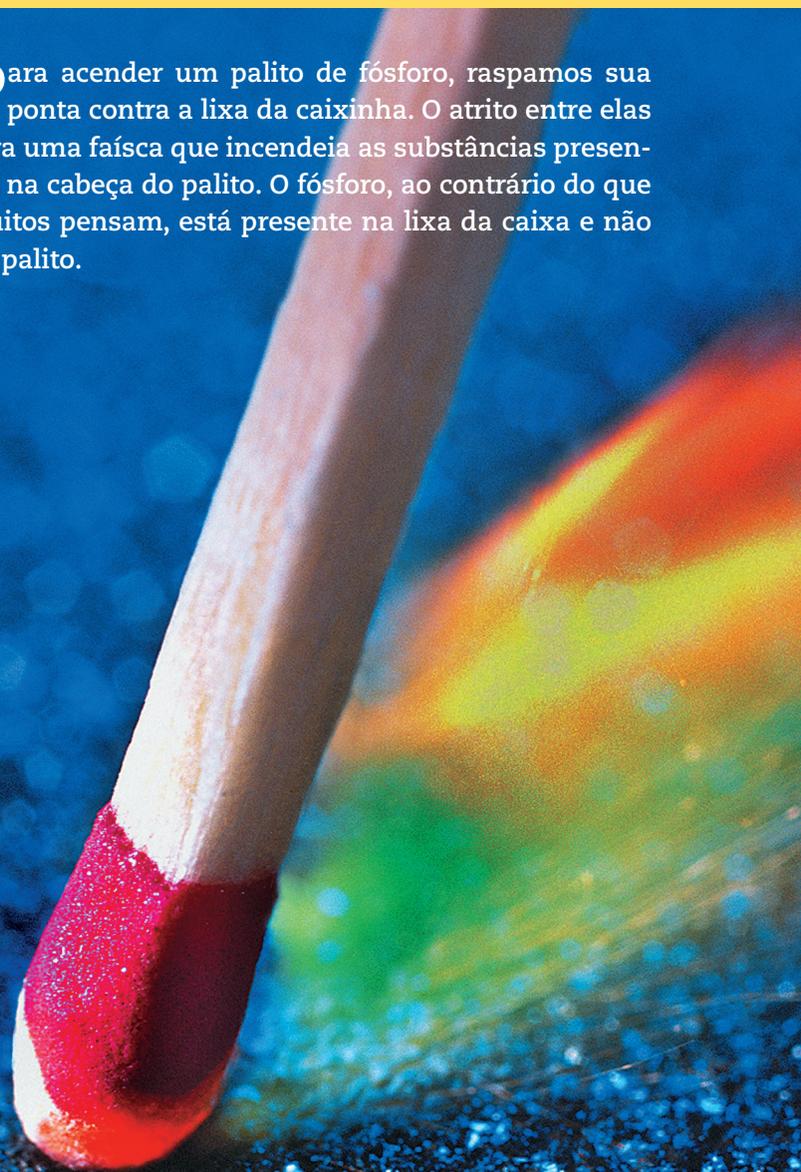
▶ 12.1 Força de atrito de escorregamento

As forças de atrito são opostas ao movimento relativo ou à tendência de movimento das superfícies em contato.

▶ 12.2 Força de resistência do ar

A força de resistência que um líquido ou um gás (em particular o ar) exerce num corpo opõe-se ao seu movimento.

Para acender um palito de fósforo, raspamos sua ponta contra a lixa da caixinha. O atrito entre elas gera uma faísca que incendeia as substâncias presentes na cabeça do palito. O fósforo, ao contrário do que muitos pensam, está presente na lixa da caixa e não no palito.



Força de atrito de escorregamento

Objetivos

- ▶ Analisar as forças de atrito que atuam sobre corpos em contato.
- ▶ Diferenciar atrito dinâmico de atrito estático e seus respectivos coeficientes.
- ▶ Discutir a dependência da força de atrito em relação à velocidade e à área de contato do corpo que desliza sobre uma superfície.
- ▶ Comparar as intensidades das forças de atrito dinâmica e estática máxima.

Termos e conceitos

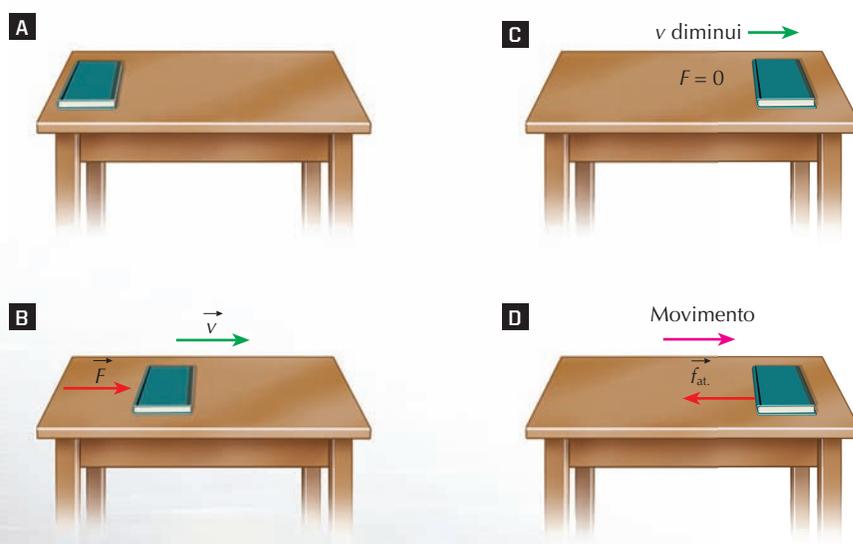
- atrito estático
- atrito dinâmico
- coeficiente de atrito estático
- coeficiente de atrito dinâmico
- iminência de movimento

No capítulo anterior discutimos as leis de Newton, da Dinâmica, aplicadas a corpos em situações ideais – as superfícies em contato eram isentas de atrito e desprezamos a resistência do ar. Agora, para que possamos compreender melhor essas leis, será necessária uma discussão mais profunda das forças.

Comecemos analisando a **força de atrito de escorregamento** entre sólidos. O atrito é denominado **dinâmico** quando há movimento relativo entre os corpos em contato. Quando não há movimento, o atrito é denominado **estático**.

1 Atrito dinâmico

Considere um livro apoiado sobre uma mesa (fig. 1A). Pela aplicação de uma força ele atinge, após certo tempo, uma velocidade v (fig. 1B). Quando cessa a força, a velocidade diminui até o livro parar (fig. 1C). Interpretamos esse fato considerando uma força de resistência oposta ao movimento relativo dos corpos, chamada **força de atrito dinâmico** (fig. 1D).



▶ **Figura 1.** A força de atrito \vec{f}_{at} é oposta ao movimento relativo das superfícies em contato.

◀ É o atrito que possibilita a um carro diminuir sua velocidade quando é freado.

A força de atrito é devida às rugosidades das superfícies em contato e às forças de adesão entre as moléculas das duas superfícies. As rugosidades se interpenetram e as forças de adesão entre os pontos de contato formam “microsoldas”, dificultando o movimento de um corpo em relação ao outro.

Quando há movimento, a experiência mostra que a intensidade da força de atrito, dentro de uma boa aproximação, é proporcional à intensidade da força normal F_N :

$$f_{\text{at.}} = \mu_d \cdot F_N$$

Nessa fórmula, μ_d é uma constante de proporcionalidade chamada **coeficiente de atrito dinâmico**.

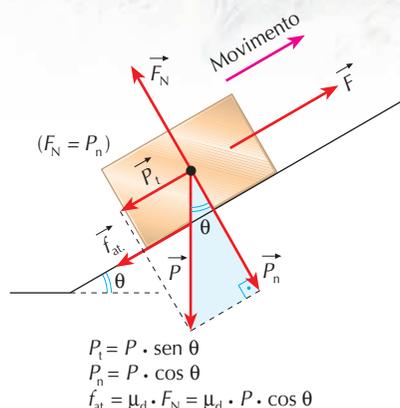
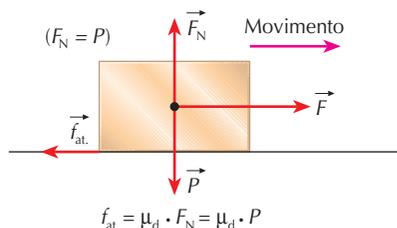
O coeficiente μ_d não possui unidade, pois é a relação entre duas intensidades de forças $\left(\mu_d = \frac{f_{\text{at.}}}{F_N}\right)$. Em Física, grandezas que não têm unidades são chamadas **grandezas adimensionais**.

O coeficiente de atrito depende da natureza dos sólidos em contato (aço sobre aço, madeira sobre aço etc.) e do estado de polimento das superfícies. Pode variar desde valores baixos (por exemplo, 0,02) até valores bastante elevados (por exemplo, 1,20).

A força normal \vec{F}_N entre as superfícies em contato tem intensidade igual ao próprio peso P ou sua componente $P_n = P \cdot \cos \theta$, nos casos simples indicados na **figura 2**.



Figura 2.
Em movimento:
 $f_{\text{at.}} = \mu_d \cdot F_N$



A força de atrito dinâmico independe da velocidade com que o corpo desliza sobre a superfície e também independe da área de contato entre o corpo e a superfície. Assim, por exemplo, um bloco de madeira desliza sobre uma mesa por ação de uma força \vec{F} (**fig. 3**). A força de atrito $\vec{f}_{\text{at.}}$ tem a mesma intensidade, quer o bloco se apoie na face de maior área ou na de menor área.

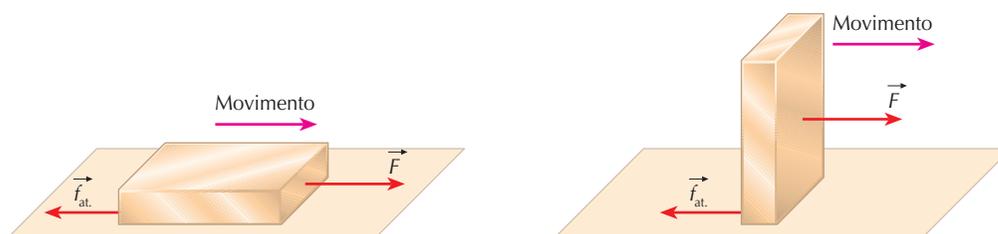


Figura 3. A intensidade da força de atrito $\vec{f}_{\text{at.}}$ independe da área de contato entre o bloco e a superfície sobre a qual desliza.



O coeficiente de atrito dinâmico é também chamado **coeficiente de atrito cinético**.



▶ A força aplicada pelo operador sobre a placa de madeira desloca-a em movimento uniforme. A força de atrito dinâmico tem intensidade igual à da força aplicada pelo operador e que é indicada pelo dinamômetro: 2,2 N.

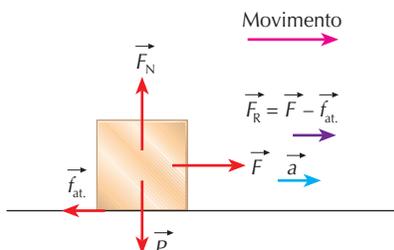


▶ Ao colocar a carga sobre a placa, para que seu movimento continue uniforme, a intensidade da força aplicada pelo operador passa para 3,7 N. Isso significa que a intensidade da força de atrito aumenta, pois aumenta a intensidade da força normal que a mesa exerce na placa.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 98 Um bloco de massa $m = 10 \text{ kg}$ movimenta-se numa mesa horizontal sob ação de uma força horizontal \vec{F} de intensidade 30 N. O coeficiente de atrito dinâmico entre o bloco e a mesa é $\mu_d = 0,20$. Sendo $g = 10 \text{ m/s}^2$, determine a aceleração do bloco.

Solução:



Na figura representamos as forças que agem no bloco. A força de atrito é dada por $f_{\text{at}} = \mu_d F_N$, e sendo $F_N = P = mg$, vem $f_{\text{at}} = \mu_d mg$.

Sendo $\mu_d = 0,20$, $m = 10 \text{ kg}$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$, temos:

$$f_{\text{at}} = 0,20 \cdot 10 \cdot 10 \Rightarrow f_{\text{at}} = 20 \text{ N}$$

A equação fundamental da Dinâmica ($\vec{F}_R = m\vec{a}$) fornece:

$$F_R = ma \Rightarrow F - f_{\text{at}} = ma \Rightarrow$$

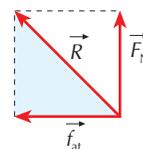
$$\Rightarrow 30 - 20 = 10a \Rightarrow \boxed{a = 1,0 \text{ m/s}^2}$$

Resposta: $1,0 \text{ m/s}^2$

Observação:

A força de atrito \vec{f}_{at} e a força normal \vec{F}_N são as componentes da força resultante \vec{R} que a mesa exerce no bloco, isto é, $\vec{R} = \vec{f}_{\text{at}} + \vec{F}_N$.

A intensidade de \vec{R} é calculada pela aplicação do teorema de Pitágoras ao triângulo destacado:



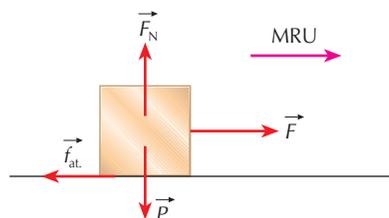
$$R = \sqrt{f_{\text{at}}^2 + F_N^2}$$

Sendo $f_{\text{at}} = 20 \text{ N}$ e $F_N = 100 \text{ N}$, temos:

$$R = \sqrt{(20)^2 + (100)^2} \Rightarrow \boxed{R \approx 102 \text{ N}}$$

R. 99 Um bloco de massa $m = 5,0 \text{ kg}$ realiza um movimento retilíneo e uniforme numa mesa horizontal, sob ação de uma força horizontal \vec{F} de intensidade 10 N. Sendo $g = 10 \text{ m/s}^2$, determine o coeficiente de atrito dinâmico entre o bloco e a mesa.

Solução:



Na figura apresentamos as forças que agem no bloco. Observe, inicialmente, que o movimento é horizontal e portanto \vec{F}_N e \vec{P} se anulam. Como o movimento é retilíneo e uniforme, a aceleração \vec{a} é nula e, pela equação fundamental da Dinâmica ($\vec{F}_R = m\vec{a}$), concluímos que a resultante é nula. Nessas condições, \vec{F} e $\vec{f}_{at.}$ têm mesma direção, sentidos opostos e intensidades iguais: $f_{at.} = F$. Sendo $f_{at.} = \mu_d F_N$ com $F_N = mg$, vem:

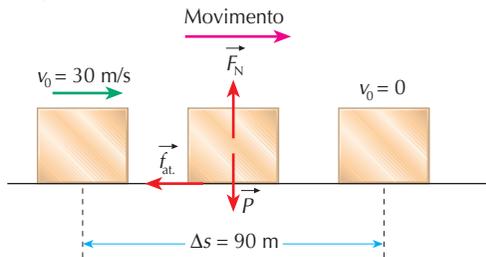
$$\mu_d \cdot mg = F$$

$$\mu_d \cdot 5,0 \cdot 10 = 10 \Rightarrow \mu_d = 0,20$$

Resposta: 0,20

R. 100 Um bloco é lançado sobre um plano horizontal com velocidade de 30 m/s e percorre 90 m até parar. Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$ e calcule o coeficiente de atrito dinâmico entre o bloco e o plano.

Solução:



Com a equação de Torricelli determinamos a aceleração escalar do bloco:

$$v^2 = v_0^2 + 2\alpha\Delta s \Rightarrow 0^2 = 30^2 + 2\alpha \cdot 90 \Rightarrow \alpha = -5,0 \text{ m/s}^2$$

Como \vec{F}_N e \vec{P} se anulam, concluímos que a resultante é a força de atrito ($\vec{F}_R = \vec{f}_{at.}$).

Mas $f_{at.} = \mu_d F_N$ e $F_N = P = mg$.

Logo: $F_R = f_{at.} = \mu_d \cdot mg$.

Pela equação fundamental da Dinâmica

($\vec{F}_R = m\vec{a}$), vem:

$$F_R = ma \Rightarrow \mu_d \cdot mg = ma \Rightarrow \mu_d \cdot g = a$$

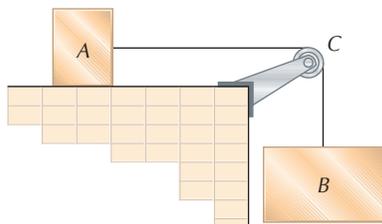
Sendo $g = 10 \text{ m/s}^2$ e $a = |\alpha| = 5,0 \text{ m/s}^2$, resulta:

$$\mu_d \cdot 10 = 5,0 \Rightarrow \mu_d = 0,50$$

Resposta: 0,50

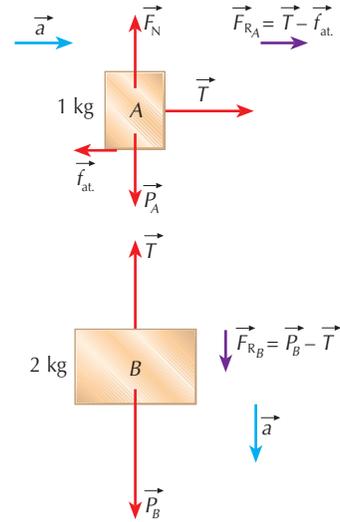
R. 101 Dois corpos A e B de massas $m_A = 1 \text{ kg}$ e $m_B = 2 \text{ kg}$ estão ligados por uma corda de peso desprezível, que passa sem atrito pela polia C. Entre A e o apoio existe atrito de coeficiente $\mu_d = 0,5$. Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$. Determine:

- a aceleração dos corpos;
- a tração do fio.



Solução:

- As forças que atuam em cada corpo estão indicadas nas figuras.



Corpo A: $m_A = 1 \text{ kg}$; $P_A = m_A g = 10 \text{ N}$;

$F_N = P_A = 10 \text{ N}$

$f_{at.} = \mu_d F_N = 0,5 \cdot 10 \Rightarrow f_{at.} = 5 \text{ N}$

Corpo B: $m_B = 2 \text{ kg}$; $P_B = m_B g = 20 \text{ N}$

Pela equação fundamental da Dinâmica ($\vec{F}_R = m\vec{a}$), obtemos o seguinte sistema:

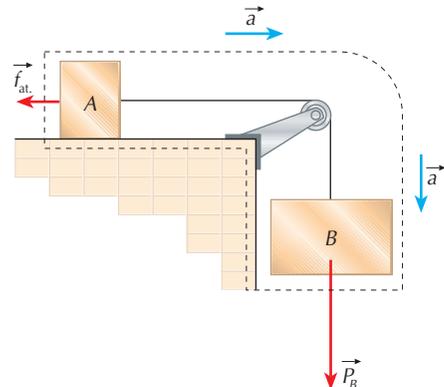
$$\begin{cases} T - f_{at.} = m_A a & (\text{corpo A}) \\ P_B - T = m_B a & (\text{corpo B}) \\ P_B - f_{at.} = (m_A + m_B) \cdot a \Rightarrow \\ \Rightarrow 20 - 5 = (1 + 2) \cdot a \Rightarrow 15 = 3a \Rightarrow a = 5 \text{ m/s}^2 \end{cases}$$

- Substituindo na primeira equação:

$$T - f_{at.} = m_A a \Rightarrow T - 5 = 1 \cdot 5 \Rightarrow T = 10 \text{ N}$$

Respostas: a) 5 m/s^2 ; b) 10 N

Observação:



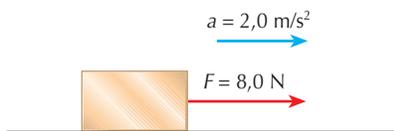
A aceleração pode ser determinada considerando-se os dois corpos como um sistema. A força favorável ao movimento é $P_B = 20 \text{ N}$ e a força resistente é $f_{at.} = 5 \text{ N}$ em A.

Logo, para o sistema de massa total $m_A + m_B$, temos:

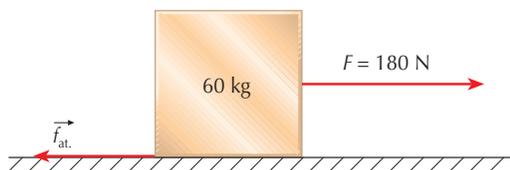
$$P_B - f_{at.} = (m_A + m_B) \cdot a \Rightarrow 20 - 5 = (1 + 2) \cdot a \Rightarrow a = 5 \text{ m/s}^2$$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

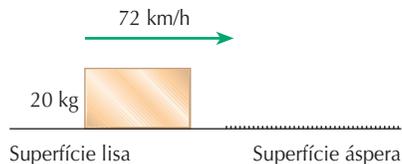
- P. 267** Um corpo de massa $m = 2,0$ kg movimenta-se numa mesa horizontal sob ação de uma força horizontal \vec{F} de intensidade $8,0$ N, conforme a figura ($g = 10$ m/s²). Sendo $2,0$ m/s² a aceleração que o corpo adquire, determine:
- a intensidade da força de atrito que a mesa exerce no corpo;
 - o coeficiente de atrito dinâmico entre o corpo e a mesa;
 - a intensidade da força resultante que a mesa exerce no corpo.



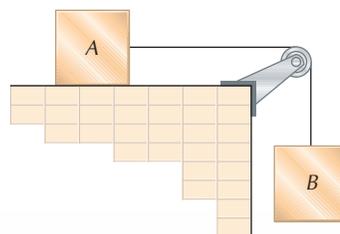
- P. 268** Arrasta-se um corpo de massa 60 kg sobre um plano horizontal rugoso, em movimento retilíneo uniforme, mediante uma força horizontal de intensidade 180 N. Qual é o coeficiente de atrito dinâmico entre o corpo e o plano? (Adote $g = 10$ m/s².)



- P. 269** Um pequeno bloco de massa $m = 20$ kg desloca-se numa superfície lisa com velocidade de 72 km/h. A seguir, atinge uma superfície áspera, onde o atrito entre o corpo e a superfície tem coeficiente $\mu_d = 0,4$. As superfícies são consideradas horizontais. Determine o espaço percorrido pelo bloco na superfície áspera até parar ($g = 10$ m/s²).



- P. 270** Dois corpos A e B, de massas iguais a 10 kg, estão ligados por um fio de peso desprezível, que passa por uma polia sem atrito, como se indica na figura. Entre A e o apoio existe atrito de coeficiente $\mu_d = 0,6$. Determine a aceleração dos corpos e a tração do fio ($g = 10$ m/s²).



2 Atrito estático

Considere um corpo em repouso sobre uma superfície horizontal. Vamos aplicar no corpo uma força \vec{F} que tende a deslocá-lo na direção horizontal. Enquanto o corpo estiver em repouso, à medida que a intensidade da força solicitadora \vec{F} aumenta, a intensidade da força de atrito também aumenta, de modo que \vec{F} e $\vec{f}_{at.}$ se equilibram (fig. 4).

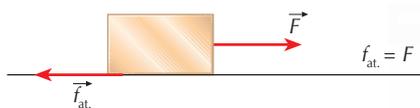
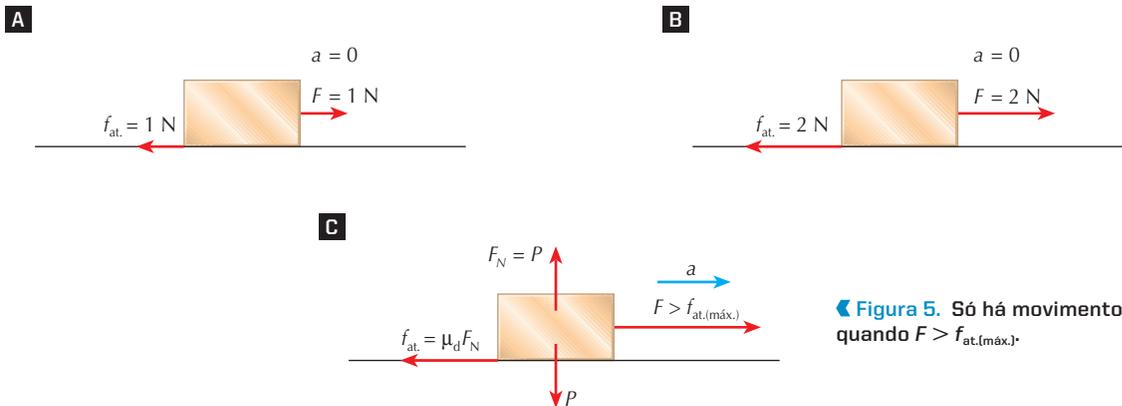


Figura 4.

Se, por exemplo, a força solicitadora tiver intensidade F igual a 1 N (fig. 5A) e o corpo não se mover, a força de atrito no corpo terá também intensidade igual a 1 N, pela condição de equilíbrio (resultante nula). Se F cresce para 2 N e o corpo continua em repouso, decorre que $f_{at.} = 2$ N (fig. 5B).

Na ausência de movimento, a força de atrito tem o mesmo módulo da força solicitadora.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph11br/n2law_br.htm (acesso em junho/2009), você pode aplicar a segunda lei de Newton para o movimento (com ou sem atrito) de um sistema constituído de dois blocos.



◀ **Figura 5.** Só há movimento quando $F > f_{\text{at.}(máx.)}$.

Assim, a força de atrito $\vec{f}_{\text{at.}}$ tem intensidade igual à da força solicitadora \vec{F} enquanto não houver movimento. Se F continuar crescendo, $f_{\text{at.}}$ também crescerá até atingir um valor máximo e o corpo ficará na iminência de movimento.

A máxima intensidade da força de atrito estático, e que corresponde à **iminência de movimento**, é dada por:

$$f_{\text{at.}(máx.)} = \mu_e F_N$$

Nessa fórmula, μ_e é uma constante de proporcionalidade chamada **coeficiente de atrito estático**.

A partir desse momento, se F crescer, o corpo entra em movimento e a força de atrito passa a ser a força de atrito dinâmico ($f_{\text{at.}} = \mu_d F_N$), conforme a **figura 5C**.

Admita que o corpo da figura anterior tenha massa igual a 2 kg (peso $P = 20$ N e normal $F_N = P = 20$ N). Supondo-se que o valor do coeficiente de atrito estático entre o corpo e o apoio seja $\mu_e = 0,4$, o máximo valor da força de atrito é:

$$f_{\text{at.}(máx.)} = \mu_e F_N = 0,4 \cdot 20 \Rightarrow f_{\text{at.}(máx.)} = 8 \text{ N}$$

Esse resultado significa que o bloco somente entrará em movimento quando a força \vec{F} tiver intensidade maior que 8 N. Se aplicarmos $F = 6$ N, a força de atrito terá intensidade 6 N e o bloco permanecerá em repouso. Se aplicarmos $F = 8$ N, $f_{\text{at.}}$ atingirá seu valor máximo (8 N) e o bloco estará na iminência de movimento.

Verifica-se experimentalmente que a intensidade da força de atrito dinâmico ($f_{\text{at.}(d)} = \mu_d F_N$) é menor do que a intensidade da força de atrito estático máxima ($f_{\text{at.}(máx.)} = \mu_e F_N$). Desse modo, temos $\mu_d < \mu_e$. Na tabela abaixo apresentamos valores de coeficientes de atrito estático e dinâmico para alguns materiais.



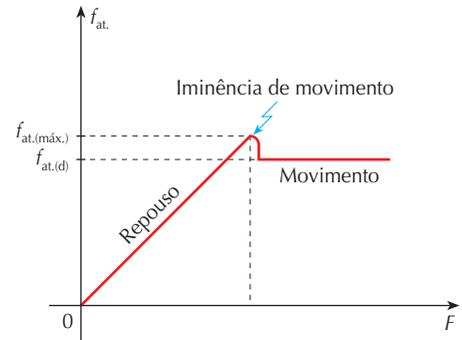
▶ Quando as rodas estão travadas, é o atrito dinâmico o responsável pela freada do veículo.

Materiais	Coeficiente de atrito	
	Estático (μ_e)	Dinâmico (μ_d)
aço com aço	0,74	0,57
alumínio com aço	0,61	0,47
cobre com aço	0,53	0,36
borracha com asfalto seco	1,0	0,80
borracha com asfalto molhado	0,30	0,25



No gráfico da **figura 6**, representamos a intensidade da força de atrito ($f_{at.}$) em função da intensidade da força solicitadora (F) para o bloco em repouso (atrito estático) e, em seguida, para o bloco em movimento (atrito dinâmico).

Da noção de iminência de movimento podemos estabelecer um método experimental simples para a determinação do coeficiente de atrito estático. Inclínamos aos poucos o plano de apoio até o instante em que o corpo fique na iminência de escorregar (**fig. 7**). Quando o corpo está na iminência de escorregar, a força de atrito atinge seu valor máximo:

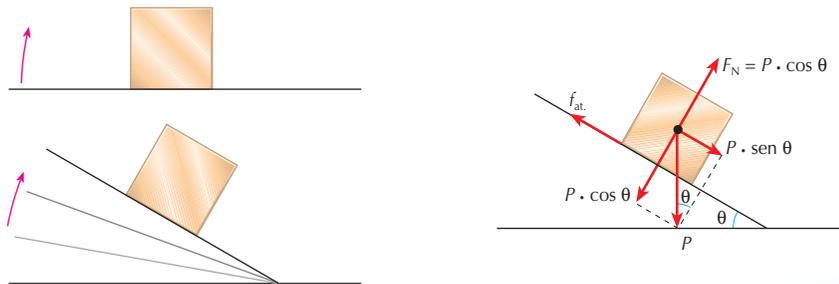


▶ **Figura 6.** Corpo em repouso: $0 \leq f_{at.} \leq \mu_e F_N$
Corpo em movimento: $f_{at.} = \mu_d F_N$

$$f_{at.(máx.)} = \mu_e F_N = \mu_e P \cdot \cos \theta$$

Estando o corpo em equilíbrio, decorre que $f_{at.(máx.)}$ e $P \cdot \sin \theta$ devem ser iguais:

$$f_{at.(máx.)} = P \cdot \sin \theta \Rightarrow \mu_e P \cdot \cos \theta = P \cdot \sin \theta \Rightarrow \mu_e = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \Rightarrow \mu_e = \operatorname{tg} \theta$$



▶ **Figura 7.**

Conhecendo o ângulo θ do plano com a horizontal, quando o corpo se encontra na iminência de escorregar, teremos determinado o coeficiente de atrito estático pela expressão:

$$\mu_e = \operatorname{tg} \theta$$

Observação

Existem casos em que os valores de μ_e e μ_d são muito próximos. Nessas situações, consideraremos $\mu_e = \mu_d$ e indicaremos esse valor por μ , chamando-o simplesmente de **coeficiente de atrito**. Nessas condições, temos:

$$\text{corpo em repouso: } 0 \leq f_{at.} \leq \mu F_N$$

$$\text{corpo em movimento: } f_{at.} = \mu F_N$$

O carro não desce a ladeira, pois a força de atrito estático é igual à componente do peso na direção do declive. ▶

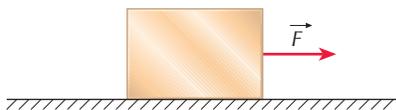


Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *Determinação do coeficiente de atrito estático*
Vídeo: *Atrito estático e atrito dinâmico*

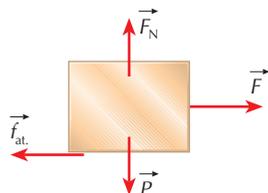


EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 102 O coeficiente de atrito estático entre o corpo de massa $m = 10 \text{ kg}$ e a superfície plana horizontal de apoio é $\mu_e = 0,2$. Em que intervalo pode variar a intensidade da força horizontal \vec{F} para que o corpo permaneça em repouso? Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Solução:



As forças que atuam no corpo estão indicadas na figura. A força máxima de atrito, que corresponde à iminência de o corpo escorregar, tem intensidade:

$$f_{\text{at.}(m\acute{a}x.)} = \mu_e F_N$$

Sendo $F_N = mg$, vem:

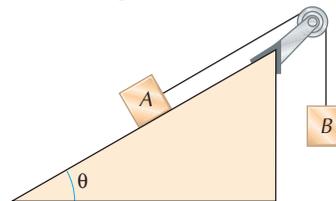
$$f_{\text{at.}(m\acute{a}x.)} = \mu_e \cdot mg = 0,2 \cdot 10 \cdot 10 \Rightarrow f_{\text{at.}(m\acute{a}x.)} = 20 \text{ N}$$

Nessas condições, a máxima intensidade da força \vec{F} , estando o corpo em repouso, é igual a 20 N. Por outro lado, o mínimo valor de F é zero, situação que ocorre quando o corpo não é solicitado.

Resposta: $0 \leq F \leq 20 \text{ N}$

R. 103 O bloco A de massa $m = 3,0 \text{ kg}$ está apoiado num plano inclinado que forma um ângulo θ em relação à horizontal. O bloco A está na iminência de escorregar para baixo. Determine, nessas condições, o peso P_B do bloco B. O coeficiente de atrito estático entre o bloco A e o plano é $\mu_e = 0,50$. (Dados: $\sin \theta = 0,60$; $\cos \theta = 0,80$; $g = 10 \text{ m/s}^2$.)

Considere o fio e a polia ideais.



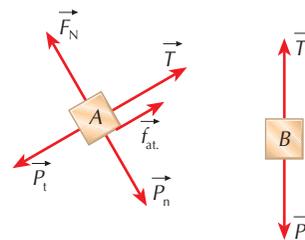
Solução:

Vamos inicialmente calcular as componentes P_t e P_n do peso P_A do bloco A:

$$P_t = P_A \cdot \sin \theta \Rightarrow P_t = 3,0 \cdot 10 \cdot 0,60 \Rightarrow P_t = 18 \text{ N}$$

$$P_n = P_A \cdot \cos \theta \Rightarrow P_n = 3,0 \cdot 10 \cdot 0,80 \Rightarrow P_n = 24 \text{ N}$$

Na figura abaixo representamos as forças que agem em cada bloco.



Observe que a força de atrito \vec{f}_{at} , que o plano exerce em A, tem sentido para cima, pois o bloco A está na iminência de escorregar para baixo. Estando os blocos em equilíbrio, podemos escrever:

$$\text{bloco B: } T = P_B$$

$$\text{bloco A: } T + f_{\text{at}} = P_t$$

$$\text{Portanto: } P_B + f_{\text{at}} = P_t$$

Como o bloco A está na iminência de escorregar, temos: $f_{\text{at}} = f_{\text{at.}(m\acute{a}x.)} = \mu_e F_N = \mu_e P_n$.

$$\text{Logo: } P_B + \mu_e P_n = P_t \Rightarrow P_B + 0,50 \cdot 24 = 18 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_B = 6,0 \text{ N}$$

Resposta: 6,0 N

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

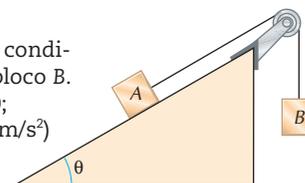
P. 271 Um corpo de massa $m = 20 \text{ kg}$ está inicialmente em repouso sobre uma superfície horizontal. O coeficiente de atrito estático entre o corpo e a superfície é $\mu_e = 0,3$ e o coeficiente de atrito dinâmico é $\mu_d = 0,2$. A aceleração da gravidade é $g = 10 \text{ m/s}^2$. Aplica-se ao corpo uma força horizontal \vec{F} . Verifique se ele entra ou não em movimento nos casos:

- $F = 40 \text{ N}$
- $F = 60 \text{ N}$
- $F = 80 \text{ N}$

Calcule, em cada caso, a intensidade da força de atrito.

P. 272 O bloco A de massa $m = 3,0 \text{ kg}$ está apoiado num plano inclinado que forma um ângulo θ com a horizontal. O bloco A está na iminência de escorregar para cima. O coeficiente de atrito estático entre o bloco A e o plano é $\mu_e = 0,50$. Considere o fio e a polia ideais.

Determine, nessas condições, o peso P_B do bloco B. (Dados: $\sin \theta = 0,60$; $\cos \theta = 0,80$; $g = 10 \text{ m/s}^2$)



Entre na rede No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph11br/inclplane_br.htm (acesso em junho/2009), você pode simular o movimento de um bloco ao longo de um plano inclinado, com ou sem atrito.

Quando o atrito é importante!

As forças de atrito são opostas à tendência de movimento ou ao movimento relativo das superfícies em contato e são tangentes a essas superfícies.

No entanto, as forças de atrito podem eventualmente ser favoráveis ao movimento de um corpo. Assim, observe que conseguimos andar porque há atrito entre o chão e a sola de nosso sapato. Pelo princípio da ação e reação, se nosso sapato exerce no solo a força de intensidade f_{at} , empurrando-o para trás, o solo exerce na sola do sapato outra força, de mesma intensidade f_{at} , mas em sentido contrário. Na sola do sapato a força de atrito tem sentido oposto ao da tendência de movimento do pé em relação ao solo. Porém, para o homem que caminha, a força de atrito é favorável ao seu movimento.



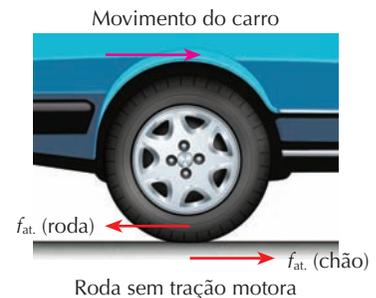
Podemos observar o mesmo fato no movimento das rodas de um carro ligadas ao motor. Essas rodas são chamadas “rodas de tração motora”: o movimento de seu eixo é comandado pelo motor do carro.



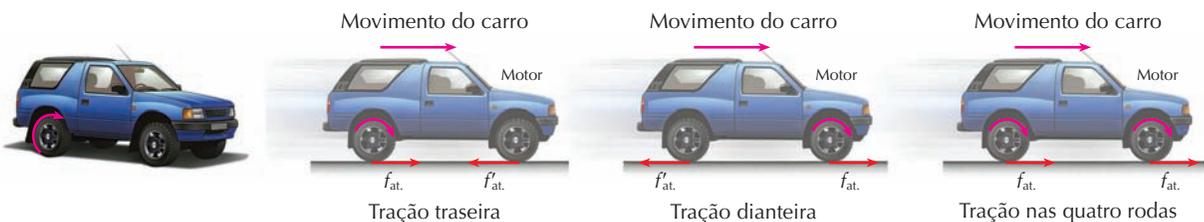
Quando aceleramos um carro, as rodas de tração motora “empurram” o chão para trás e, pelo princípio da ação e reação, o chão exerce uma força de mesma intensidade e sentido contrário, movimentando o automóvel para a frente.



Ainda com o carro em movimento acelerado, a roda que não tem tração motora “empurra” o chão para a frente e, na roda, a força de atrito tem sentido oposto, como indica a figura.



Um carro de tração traseira possui o eixo traseiro das rodas ligado ao motor. As rodas traseiras têm tração motora, e as da frente, não. Há carros de tração dianteira e de tração nas quatro rodas. Ao acelerarmos o carro, as forças de atrito nas rodas de tração têm o mesmo sentido do movimento do automóvel; nas rodas não tracionadas, têm sentido oposto.



Objetivos

- ▶ Discutir a atuação da força de resistência do ar nos movimentos.
- ▶ Analisar os fatores que afetam a intensidade da força de resistência do ar.
 - ▶ Definir velocidade limite de um corpo em queda.

Termos e conceitos

- coeficiente de arrasto aerodinâmico
- túnel aerodinâmico
- velocidade limite

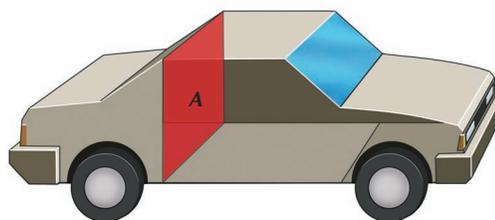
Considere um corpo movendo-se em contato com um líquido ou um gás. Esses meios aplicam ao corpo forças que se opõem ao movimento. As intensidades dessas forças resistentes são determinadas experimentalmente.

Para o movimento de um corpo em contato com o ar (por exemplo, a queda vertical de um bloco, o movimento de um carro ou de um avião), considerando-se as velocidades usuais, a **força de resistência do ar** tem intensidade R diretamente proporcional ao quadrado da velocidade v do corpo:

$$R = kv^2$$

Estudos experimentais sobre a constante de proporcionalidade k concluem que ela depende:

- **da forma do corpo**, caracterizada por uma grandeza adimensional chamada **coeficiente de arrasto aerodinâmico** C_x . Para os veículos, seu valor varia, em geral, de 0,30 a 0,90.
A gota de chuva é o corpo que possui a mais perfeita aerodinâmica, com $C_x = 0,05$. Para os automóveis modernos, C_x fica em torno de 0,30, para os ônibus, 0,70 e para os caminhões, 0,90.
- **da maior área A** da seção transversal do corpo perpendicular à direção do movimento.



- **da densidade d do ar**. Um mesmo corpo, deslocando-se com a mesma velocidade, ficará sob ação de uma força de resistência de menor intensidade num local onde a densidade do ar é menor.

A constante k é dada por: $k = \frac{1}{2} dAC_x$

Nessas condições, temos para a intensidade R da força de resistência do ar:

$$R = \frac{1}{2} dAC_x v^2$$

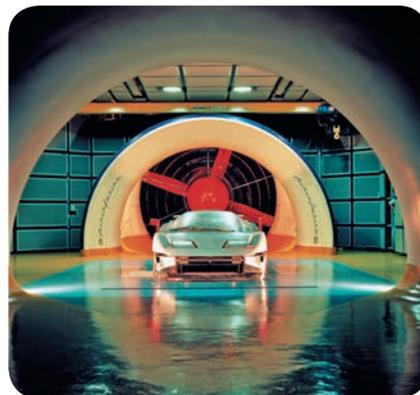
Ao aterrissar, o ônibus espacial abre o freio aerodinâmico (paraquedas) para aumentar a área de atuação da força de resistência do ar. ♡



Túnel aerodinâmico

No desenvolvimento do projeto de aviões ou de automóveis, uma etapa muito importante é o teste de seu comportamento aerodinâmico. Para tal, constrói-se um protótipo ou uma miniatura do veículo, que é colocado no interior de um túnel de vento (túnel aerodinâmico). Nesse recinto, o modelo permanece estático e o vento é direcionado rapidamente sobre ele. Com isso consegue-se reproduzir as condições do veículo em movimento. Por meio de um monitoramento bem elaborado, é possível determinar a intensidade e a direção das forças que agem sobre o veículo em teste e, se necessário, corrigir sua forma, de modo a obter o melhor rendimento possível.

Historicamente, foram os irmãos Wright que, em 1901, construíram o primeiro túnel aerodinâmico, com a finalidade de testar as asas de seus “aeroplanos” nos primórdios da aviação. Hoje em dia, há várias outras situações em que os túneis aerodinâmicos são utilizados: projetos de mísseis, testes de veículos ferroviários e rodoviários, efeitos dos ventos em prédios, pontes, linhas de alta tensão, antenas etc.



▶ Para minimizar a resistência do ar, a aerodinâmica dos automóveis é testada em túneis de vento, que simulam o movimento relativo entre o veículo e o ar.

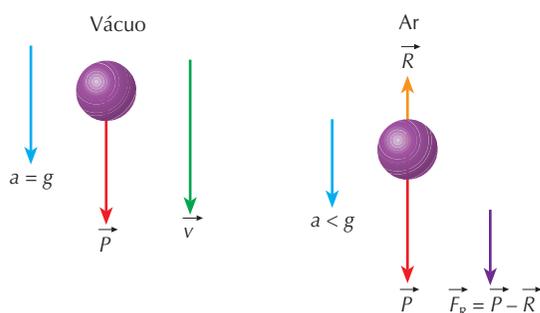
Velocidade limite

Considere um corpo em queda livre no vácuo. A única força atuando é o peso \vec{P} , e seu movimento é uniformemente acelerado, com velocidade crescente. Porém, se o corpo cair no ar, devido à força de resistência \vec{R} , sua velocidade não será sempre crescente. A força resultante de \vec{P} e \vec{R} tem intensidade:

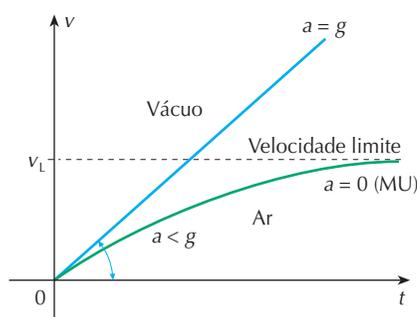
$$F_R = P - R$$

$$F_R = P - kv^2$$

F_R diminui à medida que aumenta v , pois $R = kv^2$ aumenta.



▶ **Figura 8.** No ar, devido à força de resistência \vec{R} , a aceleração diminui até chegar a zero, quando então a velocidade de queda permanece constante.



▶ **Figura 9.** No vácuo, a velocidade é sempre crescente. No ar, após certo intervalo de tempo, ela atinge o valor limite v_L .

Assim, à medida que R cresce com a velocidade, a resultante F_R decresce e a aceleração a é cada vez menor: a velocidade tende para um valor limite v_L ao mesmo tempo que F_R tende a zero.

Essa velocidade v_L , chamada **velocidade limite**, é, em muitas situações, rapidamente atingida na queda de um corpo no ar: é o caso da queda de gotas de chuva e de flocos de neve.

Quando atinge a velocidade limite, o corpo adquire movimento uniforme.

Esse fenômeno é utilizado no salto de paraquedas. A face côncava do paraquedas dirigida contra o ar aumenta consideravelmente o coeficiente k , de modo que é elevada a intensidade da força de resistência \vec{R} . Assim, rapidamente \vec{R} equilibra o peso \vec{P} atingindo a velocidade limite, que se mantém constante na queda.

Para o cálculo da velocidade limite devemos impor $F_R = 0$, isto é, $R = P$.

O paraquedas

Com o paraquedas fechado, a velocidade do paraquedista vai aumentando e, conseqüentemente, aumenta a intensidade da força de resistência do ar, até atingir a velocidade limite. Observe que os paraquedistas se dispõem paralelamente ao solo. Com isso aumentam a área de seus corpos, perpendicularmente à direção do movimento. ▶



O paraquedas é um dispositivo que, aproveitando o efeito da resistência do ar, tem a finalidade de frear em pouco tempo o movimento de um corpo que se desloca nesse meio. Geralmente é utilizado para impedir que um corpo caia muito depressa, mas também é empregado para reduzir a velocidade de veículos que se deslocam horizontalmente, como jatos que pousam em porta-aviões e *dragsters* (veículos de corrida capazes de grandes acelerações em pequenos percursos).

Embora o primeiro salto com paraquedas tenha sido realizado em 1797, por muito tempo o dispositivo se manteve como simples diversão. Apenas na Primeira Guerra Mundial é que ele se tornou um eficiente equipamento de segurança, livrando muitos aviadores alemães e ingleses das conseqüências de acidentes aéreos. Hoje, são usados em salvamentos, no lançamento de tropas, no envio de suprimentos para regiões de difícil acesso etc. Além disso, existe atualmente uma atividade esportiva baseada no seu uso: o paraquedismo.

Os paraquedas mais antigos apresentam um formato que lembra o de um guarda-chuva, feito de gomos de tecido resistente e flexível ligados a um sistema de cordéis e correias de suporte de carga. Com o desenvolvimento da indústria, foram criados novos modelos, com materiais mais resistentes e seguros.

Quando o paraquedista chega ao chão, o impacto equivale a um salto livre de uma altura aproximada de 2,6 m. Sendo assim, é preciso treinamento para que a pessoa saiba como amortecer esse impacto e consiga se livrar rapidamente dos cordéis e das correias para não ser eventualmente arrastada. Os “mergulhadores aéreos”, que fazem dos saltos uma arte, descem em queda livre por centenas de metros, controlando a velocidade e a direção da queda pela contração e distensão do corpo. Entretanto, por razões de segurança, os paraquedistas amadores são obrigados a abrir seus paraquedas quando se encontram a pelo menos 670 metros de altura em relação ao solo.



Ao abrir o paraquedas, os paraquedistas passam a cair em movimento retardado até atingir a nova velocidade limite, bem inferior à primeira. ▶

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 104 Um homem e seu paraquedas têm massa total de 100 kg. A força de resistência do ar tem intensidade:

$$R = kv^2, \text{ sendo } k = 40 \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^2}$$

Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$ e determine a velocidade limite de queda.

Solução:

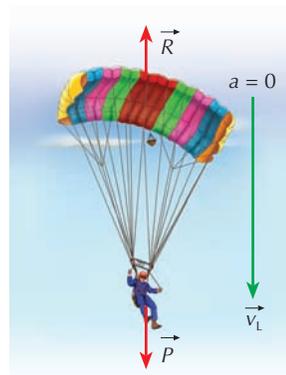
O sistema adquire velocidade limite v_L quando $R = P$. Sendo $R = kv_L^2$ e $P = mg$, vem:

$$kv_L^2 = mg \Rightarrow v_L = \sqrt{\frac{mg}{k}}$$

Para $m = 100 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ e $k = 40 \frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^2}$, temos:

$$v_L = \sqrt{\frac{100 \cdot 10}{40}} \Rightarrow v_L = 5 \text{ m/s}$$

Resposta: 5 m/s



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 273 Um automóvel de massa total 1.000 kg desloca-se num trecho retilíneo. A força máxima que o motor do carro pode exercer é 1.800 N. Admita que as forças de resistência ao movimento do carro se reduzam praticamente à resistência do ar R , dada por $R = 1,5v^2$, sendo v a velocidade do carro medida em metros por segundo e R em newtons. Calcule a velocidade limite do automóvel nessas condições.

P. 274 Uma esfera parte do repouso, em queda vertical no ar. A força resultante que age na esfera durante sua queda tem intensidade F_R , que varia com a velocidade escalar v segundo a relação: $F_R = 50 - 2,0v^2$, para v em metros por segundo e F_R em newtons. Após certo tempo, a esfera passa a realizar movimento de queda uniforme. Calcule a velocidade limite que a esfera atinge.

P. 275 (UnB-DF) No salto de paraquedas, como ilustra o desenho a seguir, o paraquedista é acelerado durante um certo intervalo de tempo, até atingir uma velocidade da ordem de 150 km/h a 200 km/h, dependendo do peso e da área do seu corpo, quando, então, o paraquedas é aberto e o conjunto sofre uma força contrária ao movimento que o faz desacelerar até uma velocidade constante bem menor, da ordem de 5 km/h, que permite uma aterrissagem tranquila. Com o auxílio dessas informações, julgue os itens a seguir, indicando os certos e os errados.

- 1) Em um salto normal, conforme o descrito, a aceleração resultante sobre o paraquedista, imediatamente antes de ele tocar o solo, é igual à aceleração da gravidade.
- 2) No momento em que o paraquedista deixa o avião, sua velocidade inicial vertical de queda é nula e, nesse caso, a única força vertical que age sobre o seu corpo é a gravitacional.
- 3) Considerando a aceleração da gravidade igual a 10 m/s^2 e desprezando a resistência do ar, o paraquedista que salta do avião e mantém o paraquedas fechado por 10 s atinge, ao final desse período, uma velocidade de 36 km/h.
- 4) Do instante em que o paraquedas abre completamente até a chegada ao solo, o conjunto é desacelerado pela resistência do ar; nessa situação, a força contrária ao movimento é sempre maior ou igual à força da gravidade.



EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

Nos exercícios a seguir, quando não forem especificados, os coeficientes de atrito estático e dinâmico deverão ser considerados iguais.

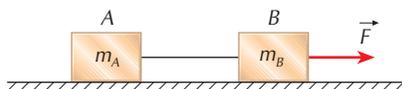
- P. 276** Um caixote de peso 80 N, inicialmente em repouso sobre o solo horizontal, é empurrado por uma força \vec{F} , também horizontal, de intensidade 24 N.



Determine a velocidade que o caixote adquire ao fim de 10 s, sabendo que o coeficiente de atrito entre o caixote e o solo é 0,25 (use: $g = 10 \text{ m/s}^2$).

- P. 277** (EEM-SP) Um garçom faz escorregar sem tombar, pelo balcão, uma garrafa de cerveja até que ela pare em frente a um freguês a 5,0 m de distância. Sabendo-se que o coeficiente de atrito entre o balcão e a garrafa vale 0,16 e que a aceleração local da gravidade deve ser tomada como $10,0 \text{ m/s}^2$, pede-se determinar a velocidade inicial imposta à garrafa pelo garçom.

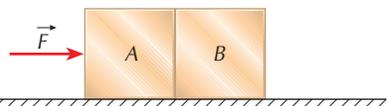
- P. 278** (Vunesp) A figura ilustra um bloco A, de massa $m_A = 2,0 \text{ kg}$, atado a um bloco B, de massa $m_B = 1,0 \text{ kg}$, por um fio inextensível de massa desprezível. O coeficiente de atrito cinético entre cada bloco e a mesa é μ . Uma força $F = 18,0 \text{ N}$ é aplicada ao bloco B, fazendo com que ambos se desloquem com velocidade constante.



Considerando $g = 10,0 \text{ m/s}^2$, calcule:

- o coeficiente de atrito μ ;
- a tração T no fio.

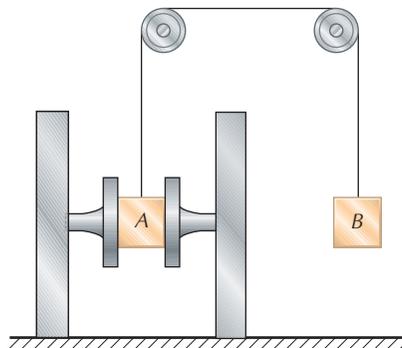
- P. 279** Dois blocos A e B, apoiados sobre uma superfície horizontal, estão inicialmente em repouso e possuem massas iguais a 10 kg. Uma força horizontal \vec{F} de intensidade 60 N é aplicada ao bloco A, conforme a figura. O coeficiente de atrito entre os blocos e a superfície é $\mu = 0,20$. Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Determine:

- a aceleração que os blocos adquirem;
- a intensidade da força que A exerce em B.

- P. 280** (Ufes) Dois corpos de massas m_A e m_B ($m_B > m_A$) estão ligados por um fio inextensível e de massa desprezível conforme a figura abaixo. Dois mancais exercem, cada um, uma força horizontal de intensidade F_N sobre o corpo A. O coeficiente de atrito dinâmico entre os mancais e o corpo A é μ , e a aceleração da gravidade g é conhecida.



Considere que o fio desliza livremente sobre as duas polias e que estas possuem massa desprezível. Estando os corpos em movimento, determine:

- a aceleração com que os corpos A e B se deslocam;
- a intensidade da força F_N que cada um dos mancais deve exercer sobre o corpo A, para que os corpos A e B se desloquem com velocidade constante.

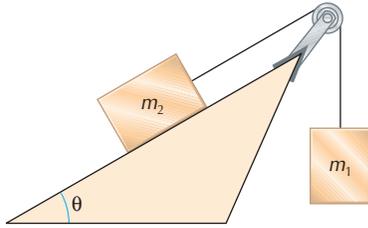
- P. 281** (UFPEL-RS) Uma empresa de transportes faz a entrega de produtos para um supermercado. Um desses produtos é de dimensões consideráveis e peso elevado, o que requer o uso de uma máquina simples (plano inclinado) para facilitar a descarga.



Suponha que a inclinação do plano de apoio, em relação à horizontal, não seja suficiente para provocar o deslizamento da caixa rampa abaixo. Resolva, para a situação proposta, as questões que se seguem.

- Represente graficamente as forças que atuam sobre a caixa.
- Qual é a intensidade da força resultante na direção do plano de apoio? Justifique.
- Qual é o valor do coeficiente de atrito entre a caixa e o plano, considerando, para esse caso, que a inclinação do plano de apoio, igual a 30° , é a máxima, sem que a caixa deslize? (Dados: $\sin 30^\circ = 0,50$; $\cos 30^\circ \approx 0,87$.)

P. 282 (Mackenzie-SP) Um corpo de massa m_2 está num plano inclinado ligado por uma corda fina, flexível, inextensível e sem peso a um corpo de massa m_1 . A corda passa por uma roldana sem peso e sem atrito. O coeficiente de atrito entre m_2 e o plano é 0,2 e a massa m_2 vale 4 vezes a massa m_1 .

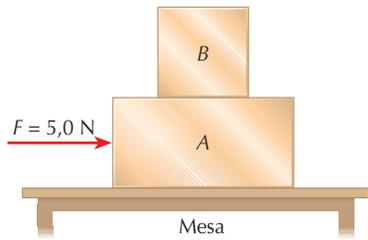


(Dados: $g = 10 \text{ m/s}^2$; $\text{sen } \theta = 0,6$; $\text{cos } \theta = 0,8$; θ é o ângulo de inclinação do plano com a horizontal.)

- O sistema permanecerá em repouso ou entrará em movimento?
- Se houver movimento, que sentido terá a aceleração de m_1 e qual será o seu valor?

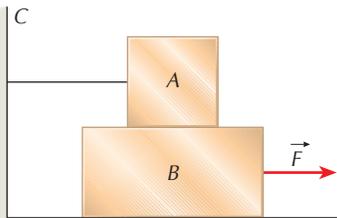
P. 283 (Unicamp-SP) Considere, na figura abaixo, dois blocos A e B, de massas conhecidas, ambos em repouso.

Uma força $F = 5,0 \text{ N}$ é aplicada no bloco A, que permanece em repouso. Há atrito entre o bloco A e a mesa, e entre os blocos A e B.



- O que acontece com o bloco B?
- Reproduza a figura, indicando as forças horizontais (sentido, módulo e onde estão aplicadas) que atuam sobre os blocos A e B.

P. 284 (UFBA) O corpo A pesa 100 N e está em repouso sobre o corpo B, que pesa 200 N. O corpo A está ligado por uma corda ao anteparo C, enquanto o corpo B está sendo solicitado por uma força horizontal F , de 125 N. O coeficiente de atrito de escorregamento entre os corpos A e B é 0,25.

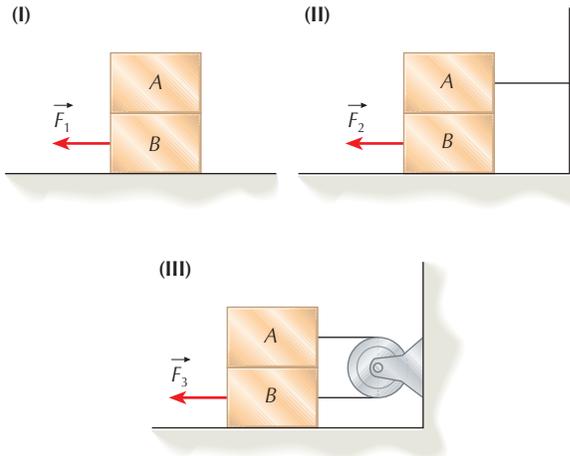


Determine o coeficiente de atrito entre o corpo B e a superfície de apoio e a tração na corda, considerando o corpo B na iminência de movimento.

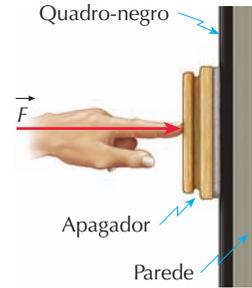
P. 285 (ITA-SP) Os blocos A e B da figura têm massa m . O coeficiente de atrito entre todas as superfícies é μ . A força \vec{F}_1 imprime ao bloco B da figura (I) velocidade

uniforme. Calcule as relações $\frac{F_2}{F_1}$ e $\frac{F_3}{F_1}$, nas quais F_2

é a força indicada na figura (II) e F_3 é indicada na figura (III), para que o bloco B nessas figuras tenha velocidade constante.



P. 286 (UFJF-MG) Um apagador, de massa 0,05 kg, inicialmente em repouso, é pressionado contra um quadro-negro por uma força horizontal constante F , como mostra a figura. O coeficiente de atrito estático entre o apagador e o quadro é 0,4 e o coeficiente de atrito cinético é 0,3.



- Desenhe o diagrama de forças para o apagador, identificando e escrevendo explicitamente os pares ação-reação (isto é, pares da terceira lei de Newton) nos corpos em que eles atuam.
- Calcule f , o valor mínimo da força F que se deve fazer no apagador para que ele não caia.
- Calcule a aceleração do apagador se $F = \frac{f}{2}$.
Qual é a aceleração se $F = 2f$?

P. 287 (Vunesp) Um caixote de massa 20 kg está em repouso sobre a carroceria de um caminhão que percorre uma estrada plana, horizontal, com velocidade constante de 72 km/h. Os coeficientes de atrito estático e dinâmico, entre o caixote e o piso da carroceria, são aproximadamente iguais e valem $\mu = 0,25$. (Use $g = 10 \text{ m/s}^2$.)

- Qual é a intensidade da força de atrito que está atuando no caixote? Justifique.
- Determine o menor tempo possível para que esse caminhão possa frear sem que o caixote escorregue.

P. 288 Um objeto de massa $m = 1,2 \text{ kg}$ parte do repouso em queda vertical, de uma grande altura, numa região onde $g = 10 \text{ m/s}^2$. A força de resistência do ar tem intensidade $R = 3,0 \cdot v^2$, para R em newtons e v em m/s.

- Represente as forças que agem no objeto durante a queda.
- Calcule a velocidade limite que o objeto atinge.

EXERCÍCIOS ESPECIAIS de leis de Newton e forças de atrito

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 105** Um bloco de massa $m = 5,0$ kg desloca-se na horizontal sob ação da força \vec{F} , de intensidade $F = 50$ N, como mostra a figura. O coeficiente de atrito entre o bloco e o solo é $\mu = 0,40$. Considerando $g = 10$ m/s², determine a aceleração do bloco. (Dados: $\sin \theta = 0,60$; $\cos \theta = 0,80$.)

Solução:

As forças que agem no bloco estão representadas na figura ao lado. Vamos, inicialmente, decompor a força \vec{F} nas forças componentes \vec{F}_x (horizontal) e \vec{F}_y (vertical). No triângulo destacado, temos:

$$\cos \theta = \frac{F_x}{F} \Rightarrow F_x = F \cdot \cos \theta \Rightarrow F_x = 50 \cdot 0,80 \Rightarrow F_x = 40 \text{ N}$$

$$\sin \theta = \frac{F_y}{F} \Rightarrow F_y = F \cdot \sin \theta \Rightarrow F_y = 50 \cdot 0,60 \Rightarrow F_y = 30 \text{ N}$$

Como o movimento é horizontal, as forças verticais têm resultante nula. Portanto:

$$F_N + F_y = P \Rightarrow F_N + F_y = mg \Rightarrow F_N + 30 = 5,0 \cdot 10 \Rightarrow F_N = 20 \text{ N}$$

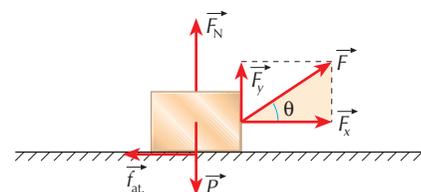
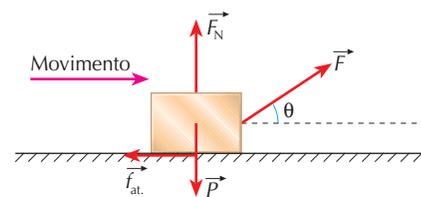
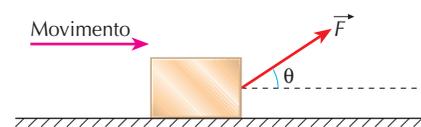
Estando o bloco em movimento, podemos escrever:

$$f_{\text{at.}} = \mu F_N \Rightarrow f_{\text{at.}} = 0,40 \cdot 20 \Rightarrow f_{\text{at.}} = 8,0 \text{ N}$$

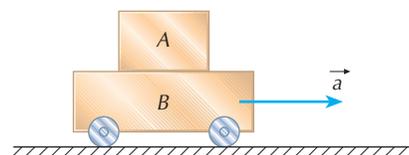
Pela equação fundamental da Dinâmica, temos:

$$F_x - f_{\text{at.}} = ma \Rightarrow 40 - 8,0 = 5,0 \cdot a \Rightarrow a = 6,4 \text{ m/s}^2$$

Resposta: 6,4 m/s²



R. 106 O bloco A está apoiado sobre o carrinho B, que se movimenta com aceleração constante de módulo $a = 2,0 \text{ m/s}^2$. Para que o bloco A não se movimente em relação ao carrinho B, qual deve ser o coeficiente de atrito mínimo entre as superfícies de A e B? Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Solução:

O bloco A não se movimenta em relação ao carrinho B e, portanto, sua aceleração, em relação ao solo, é também $a = 2,0 \text{ m/s}^2$. As forças que agem em A estão mostradas ao lado. Observe que é a força de atrito que acelera o bloco A. O mínimo coeficiente de atrito corresponde ao bloco A na iminência de escorregar, isto é:

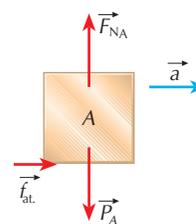
$$f_{\text{at.}} = \mu F_{N_A}$$

Mas: $f_{\text{at.}} = m_A a$ e $F_{N_A} = P_A = m_A g$

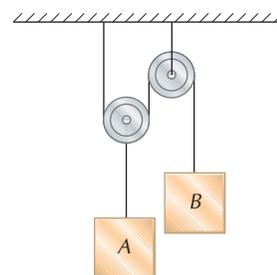
Substituindo na primeira equação, vem:

$$m_A a = \mu \cdot m_A g \Rightarrow \Rightarrow \mu = \frac{a}{g} \Rightarrow \mu = \frac{2,0}{10} \Rightarrow \mu = 0,20$$

Resposta: 0,20



R. 107 Na figura, os fios e as polias são ideais e os corpos A e B, de massas $m_A = 1,0 \text{ kg}$ e $m_B = 6,0 \text{ kg}$, respectivamente, são abandonados do repouso. Determine o módulo da aceleração \vec{a}_A do bloco A e o módulo da aceleração \vec{a}_B do bloco B. (Use $g = 10 \text{ m/s}^2$.)



Solução:

Analisemos separadamente os corpos A e B e a polia móvel. Da polia móvel ideal concluímos que:

$$2T' = T \text{ ou } T' = \frac{T}{2}$$

Vamos adotar para as acelerações \vec{a}_A e \vec{a}_B os sentidos indicados na figura. Se os módulos das acelerações resultarem positivos, significa que os sentidos adotados são os corretos. A equação fundamental da Dinâmica aplicada aos corpos A e B fornece:

Corpo A:

$$T - P_A = m_A a_A$$

$$T - m_A g = m_A a_A$$

$$T - 1,0 \cdot 10 = 1,0 \cdot a_A$$

$$T - 10 = a_A \quad \textcircled{1}$$

Corpo B:

$$P_B - T' = m_B a_B$$

$$m_B g - \frac{T}{2} = m_B a_B$$

$$6,0 \cdot 10 - \frac{T}{2} = 6,0 \cdot a_B$$

$$120 - T = 12a_B \quad \textcircled{2}$$

Somando membro a membro $\textcircled{1}$ e $\textcircled{2}$, vem:

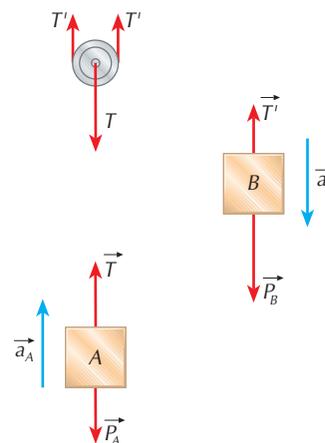
$$110 = a_A + 12a_B$$

Mas sendo $a_B = 2a_A$ (veja quadro a seguir), vem:

$$110 = a_A + 12 \cdot 2a_A \Rightarrow 25a_A = 110 \Rightarrow$$

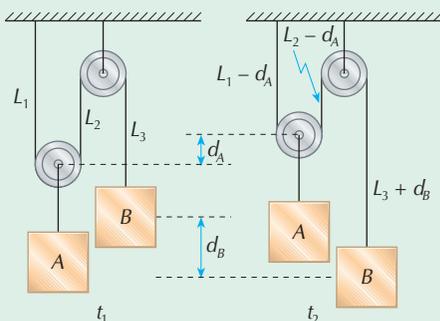
$$\Rightarrow a_A = 4,4 \text{ m/s}^2 \text{ e } a_B = 8,8 \text{ m/s}^2$$

Resposta: $a_A = 4,4 \text{ m/s}^2$; $a_B = 8,8 \text{ m/s}^2$



Relação entre os módulos das acelerações \vec{a}_A e \vec{a}_B

Considere o sistema em dois instantes t_1 e t_2 :



Sejam d_A e d_B os módulos dos deslocamentos de A e B entre os instantes considerados.

Como o fio é inextensível, podemos escrever:

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_1 - d_A + L_2 - d_A + L_3 + d_B \Rightarrow d_B = 2d_A$$

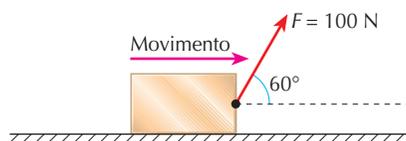
Portanto o bloco B sofre um deslocamento de módulo igual ao dobro do módulo do deslocamento de A no mesmo intervalo de tempo. Isso significa que, em cada instante, o módulo da velocidade de B é o dobro do módulo da velocidade de A, o mesmo acontecendo com as acelerações:

$$v_B = 2v_A \quad \text{e} \quad a_B = 2a_A$$

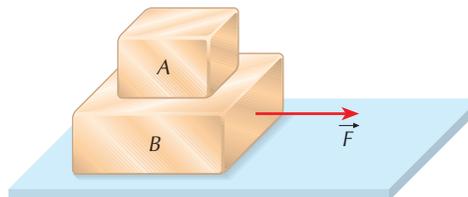
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 289 O bloco da figura, de peso 187 N, move-se com velocidade constante no sentido indicado. Sendo $\sin 60^\circ = 0,87$ e $\cos 60^\circ = 0,50$, determine:

- a intensidade da força de atrito que o solo exerce no bloco;
- o coeficiente de atrito dinâmico entre o bloco e o solo.



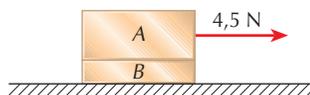
P. 290 Um bloco A de massa 2,0 kg repousa sobre um segundo bloco B de massa 4,0 kg. O coeficiente de atrito entre os blocos é igual a 0,40. Entre o bloco B e o solo não existe atrito. Qual a máxima intensidade da força horizontal \vec{F} que podemos aplicar em B, de modo que os blocos A e B se movimentem sem escorregar um em relação ao outro? (Use $g = 10 \text{ m/s}^2$.)



P. 291 (Vunesp) Dois blocos, A e B, com A colocado sobre B, estão em movimento sob ação de uma força horizontal de 4,5 N aplicada sobre A, como ilustrado na figura.

Considere que não há atrito entre o bloco B e o solo e que as massas são respectivamente $m_A = 1,8 \text{ kg}$ e $m_B = 1,2 \text{ kg}$. Tomando $g = 10 \text{ m/s}^2$, calcule:

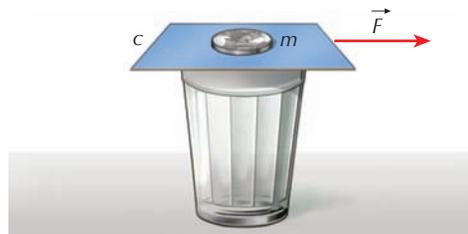
- a aceleração dos blocos, se eles se locomovem juntos.
- o valor mínimo do coeficiente de atrito estático para que o bloco A não deslize sobre B.



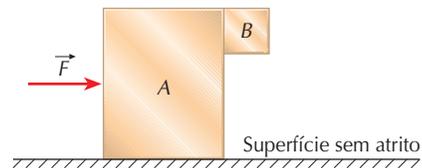
P. 292 (Unifesp) A figura representa uma demonstração simples que costuma ser usada para ilustrar a primeira lei de Newton.

O copo, sobre uma mesa, está com a boca tampada pelo cartão c e, sobre este, está a moeda m. A massa da moeda é 0,010 kg e o coeficiente de atrito estático entre a moeda e o cartão é 0,15. O experimentador puxa o cartão com a força \vec{F} , horizontal, e a moeda escorrega do cartão e cai dentro do copo.

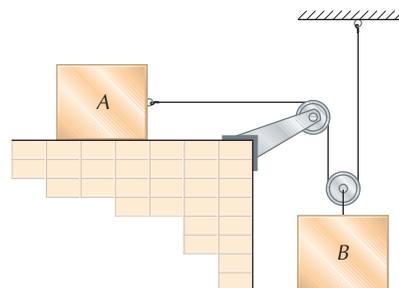
- Represente todas as forças que atuam sobre a moeda quando ela está escorregando sobre o cartão puxado pela força \vec{F} . Nomeie cada uma das forças representadas.
- Costuma-se explicar o que ocorre com a afirmação de que, devido à sua inércia, a moeda escorrega e cai dentro do copo. Isso é sempre verdade ou é necessário que o módulo de \vec{F} tenha uma intensidade mínima para que a moeda escorregue sobre o cartão? Se for necessária essa força mínima, qual é, nesse caso, o seu valor? (Despreze a massa do cartão, o atrito entre o cartão e o copo e admita $g = 10 \text{ m/s}^2$.)



P. 293 (UnB-DF) O coeficiente de atrito estático entre os blocos A e B, montados como mostra a figura abaixo, é de 0,9. Considerando que as massas dos blocos A e B sejam, respectivamente, iguais a 5,0 kg e 0,4 kg e que $g = 10 \text{ m/s}^2$, calcule, em newtons, o menor valor do módulo da força \vec{F} para que o bloco B não caia. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.



P. 294 Na figura, os fios e as polias são ideais e não há atrito entre o corpo A e o plano horizontal. Os corpos A e B, de massas $m_A = 0,50 \text{ kg}$ e $m_B = 2,0 \text{ kg}$, respectivamente, são abandonados do repouso. Determine os módulos das acelerações de A e de B. (Use $g = 10 \text{ m/s}^2$.)



P. 295 (UFPE) Uma vassoura, de massa 0,4 kg, está posicionada sobre um piso horizontal como indicado na figura. Uma força de módulo F é aplicada para baixo ao longo do cabo da vassoura. Sabendo-se que o coeficiente de atrito estático entre o piso e a base da vassoura é $\mu_e = \frac{1}{8}$, calcule F , em newtons, para que a vassoura fique na iminência de se deslocar. Considere desprezível a massa do cabo, quando comparada com a base da vassoura. (Use $g = 10 \text{ m/s}^2$.)

