CET164

Física I

Prof. Rogério Monteiro

Leis de Newton e suas aplicações

Aula A05

Tópicos da aula

- Forças em equilíbrio.
- As leis do movimento de Newton.
- Aplicações das leis de Newton.

Referências

- Curso de Física Básica. Volume 1: Mecânica. H. Moysés Nussenzveig. Editora Edgard Blucher. 2002.

- Fundamentos de Física. Volume 1: Mecânica. Halliday, Resnick & Walker. 8a edição. Editora LTC. 2009.

- Física para cientista e engenheiros. Volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. Paul A. Tipler & Gene Mosca. 6a edição. Editora LTC. 2009.

Objetivos

Ao final da aula, você deverá ser capaz de:

- Entender o conceito de força e sua relação com o movimento dos corpos.
- Compreender o significado das três leis de Newton.
- Construir um diagrama de corpo livre.
- Aplicar as leis de Newton na resolução de problemas de movimento.

Forças em equilíbrio

Forças em equilíbrio

- Até este momento, discutimos somente a descrição dos movimentos, sem nos preocuparmos com as suas causas.

- Este é o problema fundamental da **Dinâmica**.

Forças em equilíbrio

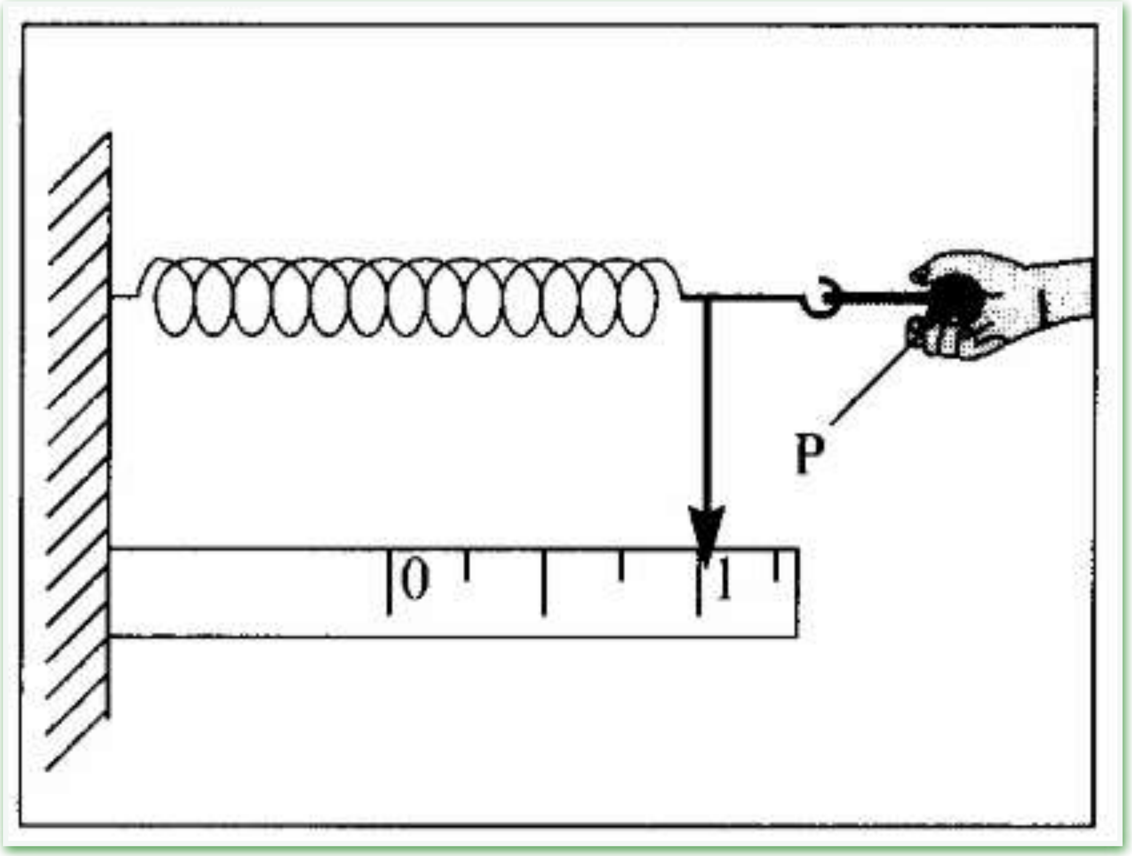
- Os princípios básicos da Dinâmica foram formulados por Galileu e por Newton.
- Historicamente, as forças e seus efeitos foram analisadas em situações estáticas, ou seja, de equilíbrio.
- Por enquanto, vamos nos limitar ao estudo de forças aplicadas a uma partícula, ou seja, um corpo de dimensões desprezíveis.

Forças em equilíbrio

- Uma partícula que permanece em repouso em relação a um dado referencial está em **equilíbrio** neste referencial.

Forças em equilíbrio

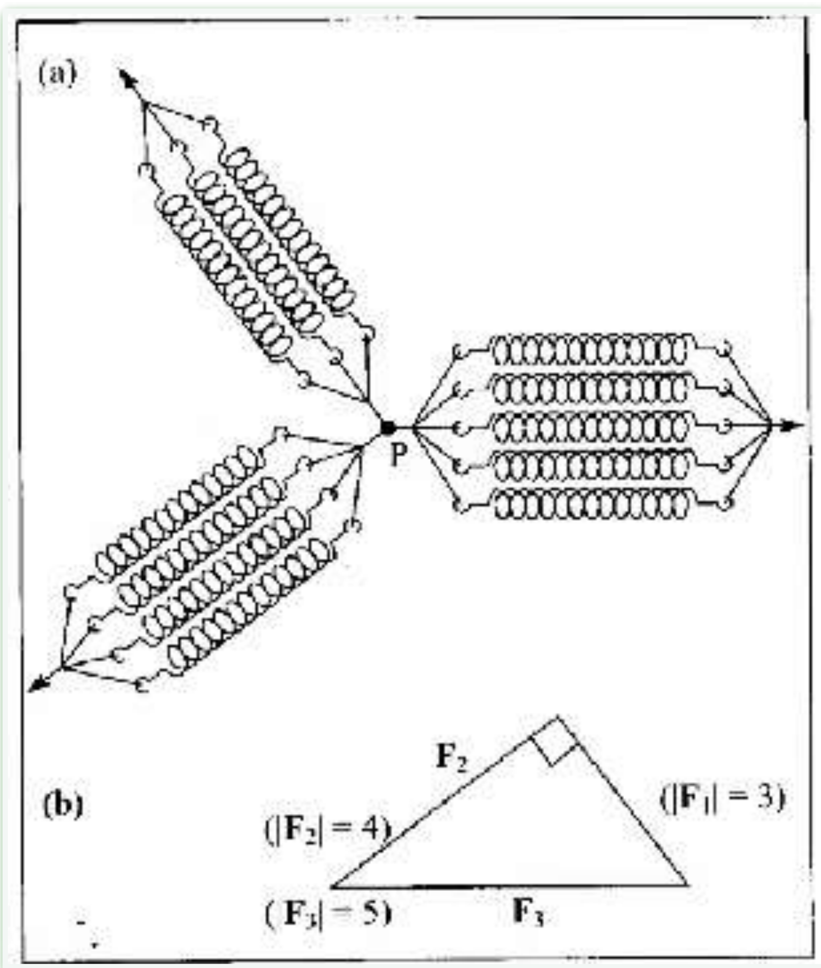
- Como medir o efeito de uma força aplicada à uma partícula P?



distensão de uma mola

Forças em equilíbrio

- Uma força produz efeitos distintos conforme a **direção** e **sentido** em que ela é aplicada.



- A partícula P permanecerá em equilíbrio se:

$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 = 0$$

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{cases}$$

Forças em equilíbrio

- A força peso é um exemplo de força que atua sobre uma partícula sem que haja contato direto com o agente responsável pela força (no caso a Terra).

- O mesmo vale para forças elétricas e magnéticas sobre partículas carregadas.

As leis do movimento de Newton

As leis do movimento de Newton

- Segundo Aristóteles, tanto para colocar um corpo em movimento como para mantê-lo em movimento, é necessária a ação de uma força.

- Galileu contesta esta afirmação em seu livro “Diálogos sobre os dois principais sistemas do mundo”.

- Em seu tratado “Os princípios matemáticos da filosofia natural”, publicado em 1687, Newton formulou **três axiomas ou leis de movimento**.

Primeira lei - Lei da inércia

- Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças impressas sobre ele.

Primeira lei - Lei da inércia

- A lei da inércia não pode ser válida em qualquer referencial.
- Os referenciais em que ela é válida são chamados de **referenciais inerciais**.
- A Terra não é um referencial inercial. Entretanto, o movimento de rotação da Terra em torno do eixo afeta muito pouco os movimentos usuais, na escala de laboratório, e na prática empregamos o laboratório como referencial inercial.
- Por outro lado, um referencial ligado às estrelas fixas é, com excelente aproximação, um referencial inercial

Segunda lei

- Uma das implicações da Primeira lei é que qualquer variação da velocidade *v* de um corpo (em módulo ou direção) em relação a um referencial inercial, ou seja, qualquer **aceleração**, deve estar associada à ação de forças.

- Isso sugere que haja uma relação mais fundamental entre forças e aceleração.

Segunda lei

massa inercial
(escalar)

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

força
(vetor)

aceleração
(vetor)

$$1\ \mathrm{N} = \mathrm{kg}\ \frac{m}{s^2}$$

Segunda lei

- A Segunda lei é o princípio fundamental da Dinâmica e nos permite determinar a evolução de um sistema na Mecânica clássica.

- A Primeira lei pode ser considerada como um caso particular da Segunda se a força resultante ***F*** que atua sobre uma partícula é nula.

- Assim como a Primeira, a Segunda lei só é válida num referencial inercial.

Segunda lei

- A expressão $F = ma$ **não** corresponde à formulação original de Newton.

- Ele começou definindo o que chamou de "quantidade de movimento", também conhecido como momento linear.

- Segundo Newton: "A quantidade de movimento é a medida do mesmo, que se origina conjuntamente da velocidade e da massa".

Segunda lei

- Noutras palavras, o momento (linear) de uma partícula é o produto de sua massa por sua velocidade:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

- Se *m* não varia com o tempo, a derivada em relação ao tempo nos dá:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a}$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$$

Segunda lei

- A formulação de Newton para a Segunda lei foi: “A variação do momento é proporcional à força impressa, e tem a direção da força”.

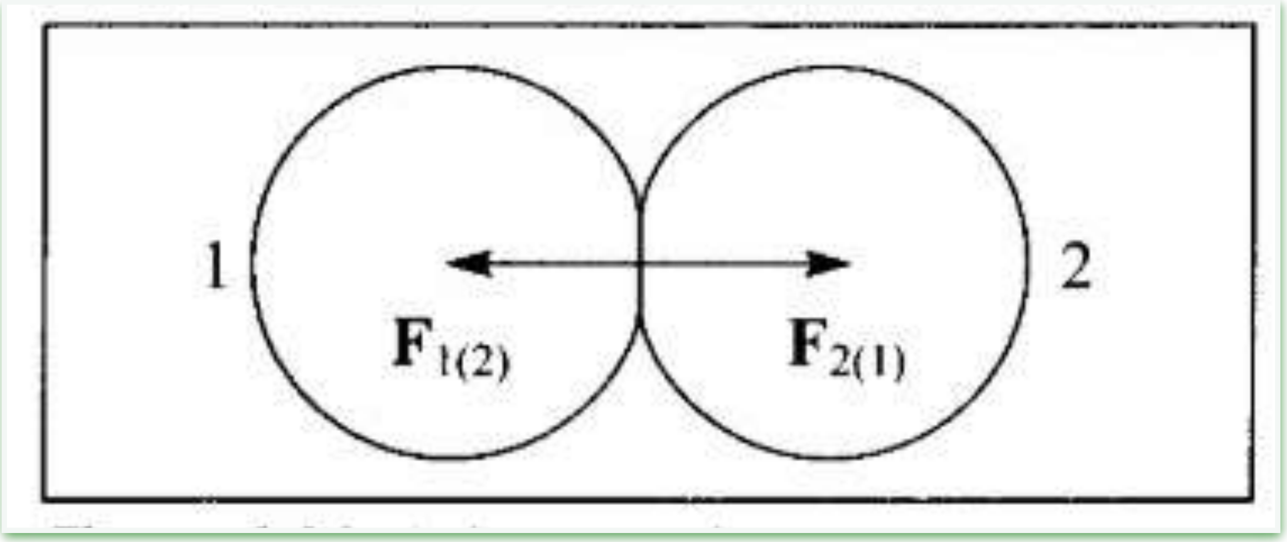
- Noutras palavras, a força é a taxa da variação temporal do momento.

- Ao contrário da formulação anterior, esta ainda permanece válida na Mecânica relativística.

Terceira lei

- Até aqui consideramos apenas as forças exercidas sobre uma única partícula.

- Vamos considerar duas partículas em interação, a qual chamaremos de (1) e (2).

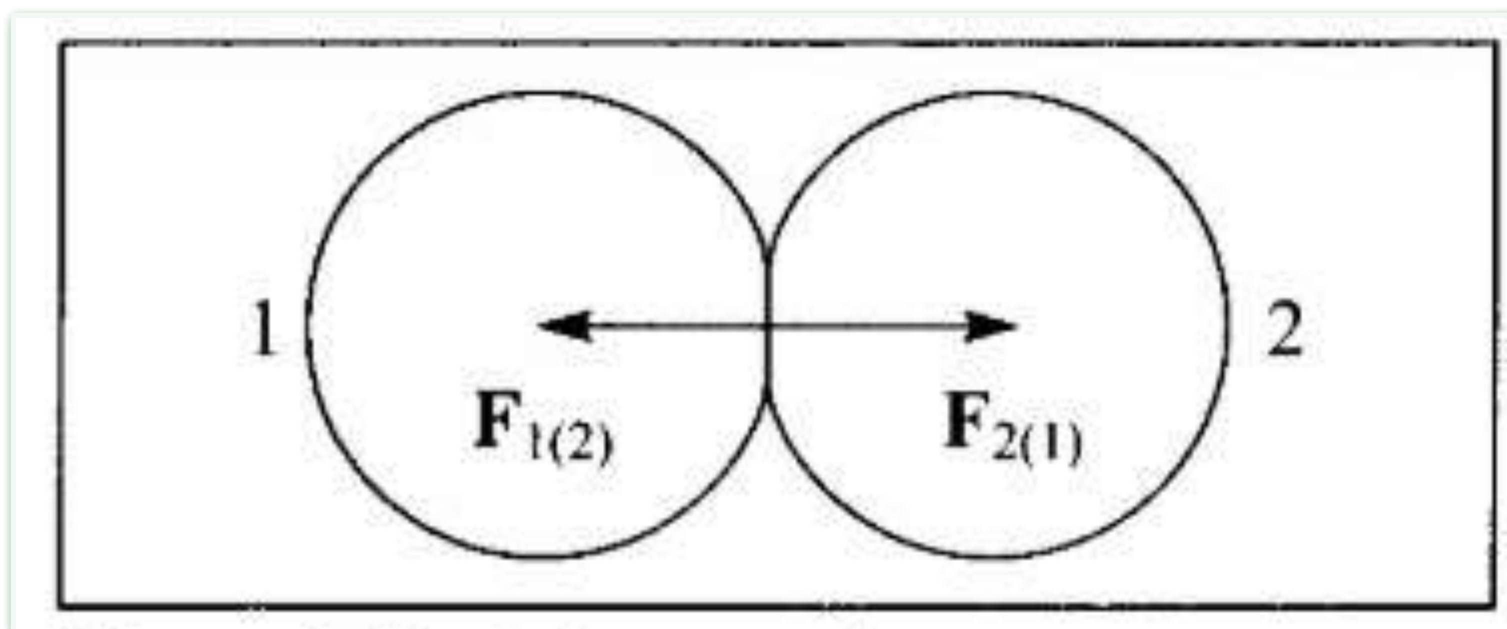


Terceira lei

- A terceira lei de Newton diz que **a força exercida por 1 sobre 2 é contrária àquela exercida por 2 sobre 1**.

- Trata-se de um par **ação-reação**.

$$\boxed{\mathbf{F}_{1(2)} = -\mathbf{F}_{2(1)}}$$



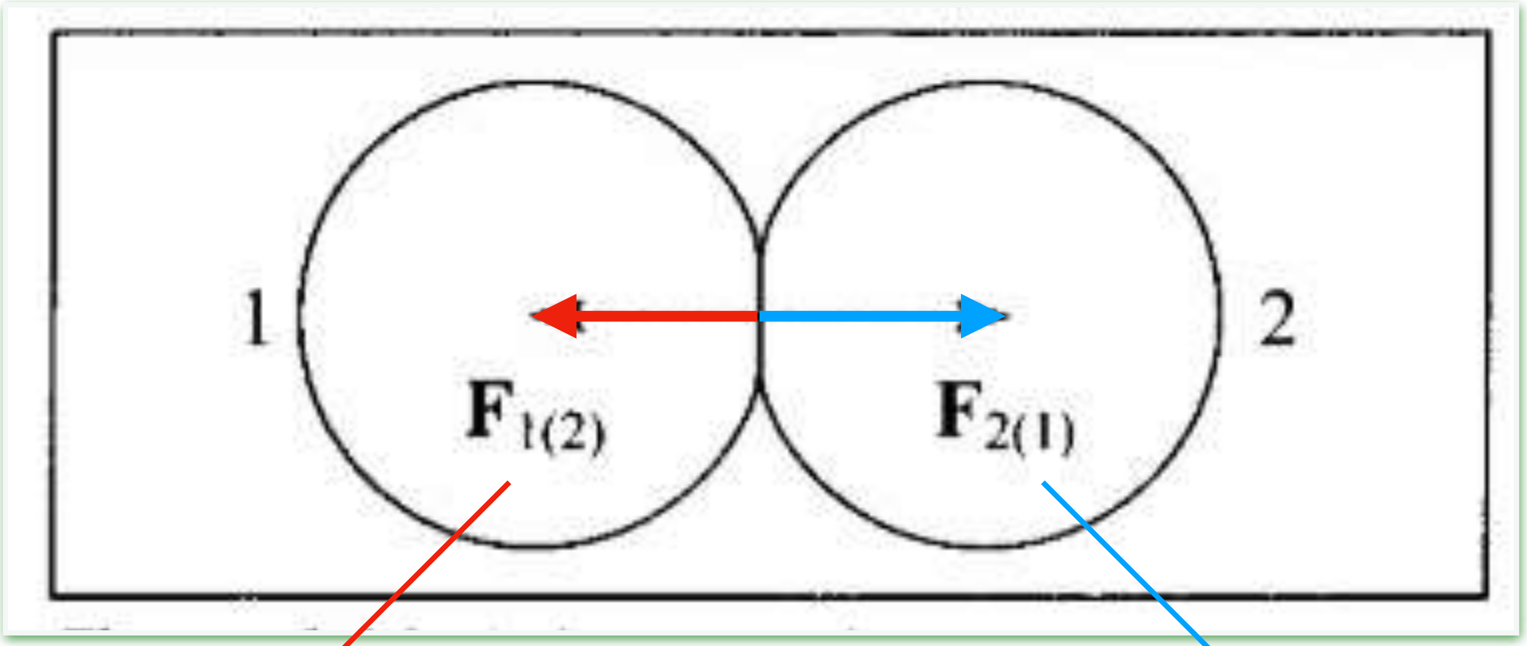
Terceira lei

- Nas palavras do próprio Newton: a toda ação corresponde uma reação igual e contrária, ou seja, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.

- Também e conhecida como princípio da ação e reação.

Terceira lei

- É importante notas que a **ação** e a **reação** estão sempre aplicadas a **corpos diferentes**.

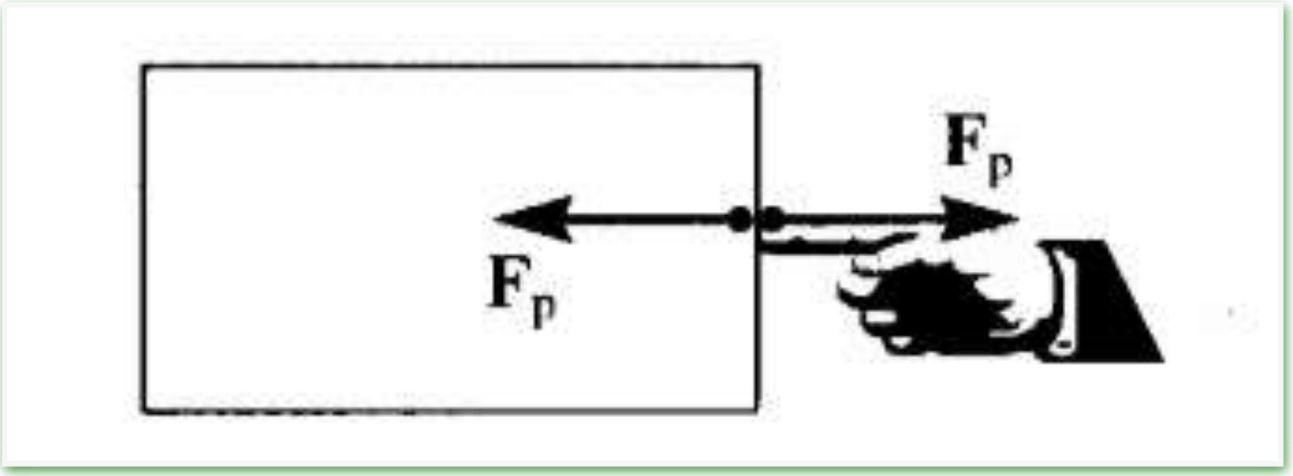


força aplicada à partícula 1

força aplicada à partícula 2

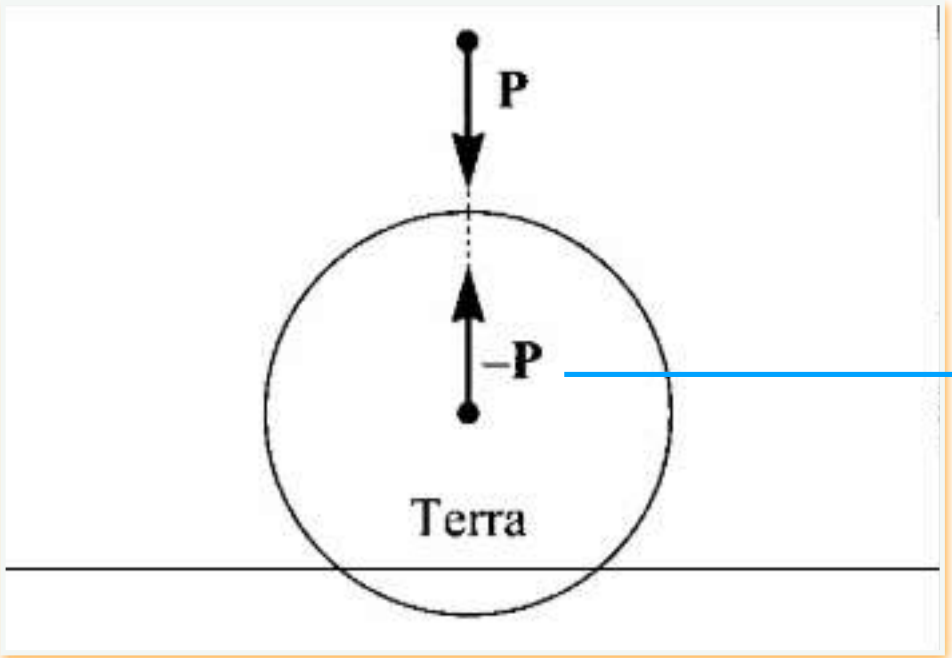
Terceira lei

- Exemplo: pressão sobre uma pedra com o dedo.



Terceira lei

- Exemplo: Qual é a reação à força peso **P**?



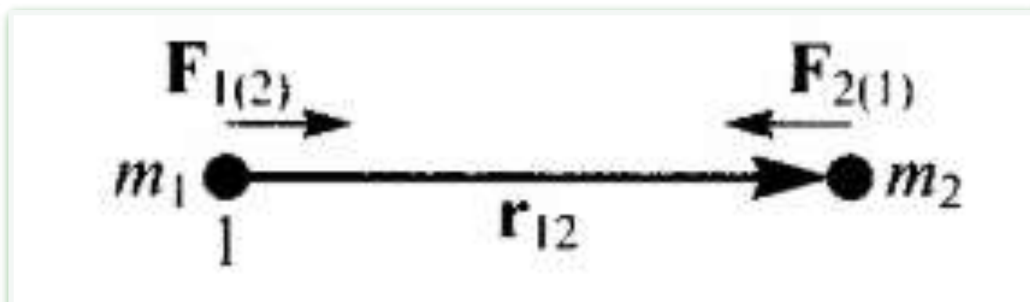
atração gravitacional exercida pela partícula sobre a terra

A força normal não é a reação da força peso!

Aplicações das leis de Newton

As forças básicas da natureza

- (1) Força gravitacional.



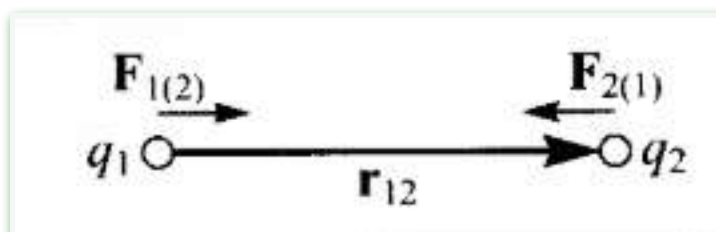
$$\mathbf{F}_{2(1)} = -G\frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\mathbf{F}_{1(2)}$$

lei de Newton da gravitação universal

$$G \approx 6{,}67 \times 10^{-11}\,\mathrm{N \cdot m^2 / kg^2}$$

As forças básicas da natureza

- (2) Força eletromagnética.



$$\boxed{\mathbf{F}_{2(1)} = k\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\mathbf{F}_{1(2)}}$$

$$k = 9\times 10^9\ \mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2/\mathrm{C}^2$$

As forças básicas da natureza

- (3) Força nuclear forte.
- (4) Força nuclear fraca.

forças de alcance muito pequeno (escalas de núcleo atômico).
são abordadas apenas em cursos avançados.

Forças derivadas

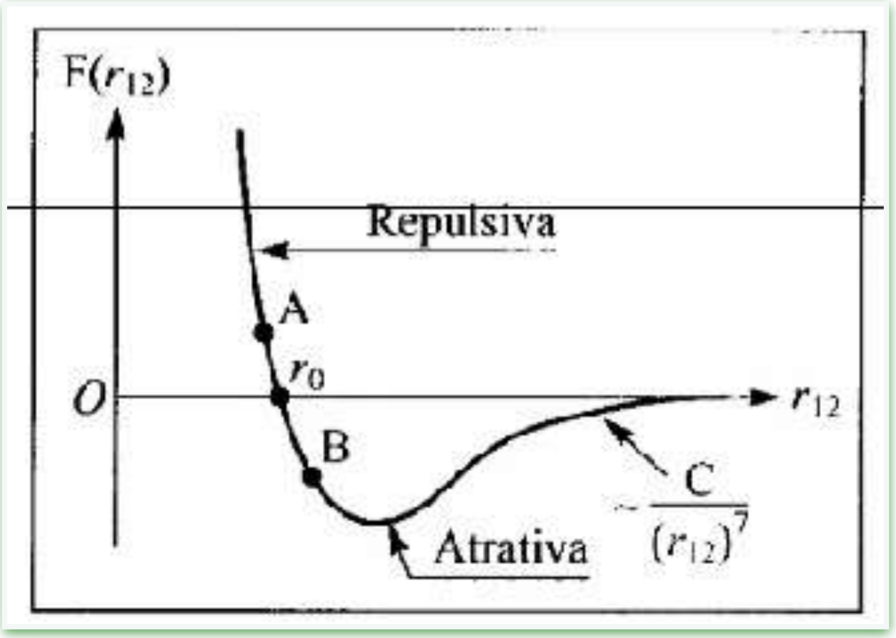
- Todas as demais forças que aparecem na natureza podem ser reduzidas, em princípio, às que quatro interações básicas da natureza.

- Destas, as forças forte e fraca, devido ao seu curto alcance, só desempenham um papel importante na escala nuclear.

- Logo, do ponto de vista macroscópico, as únicas interações fundamentais relevantes são a eletromagnética e a gravitacional.

Forças derivadas

- Vejamos o caso das forças interatômicas.

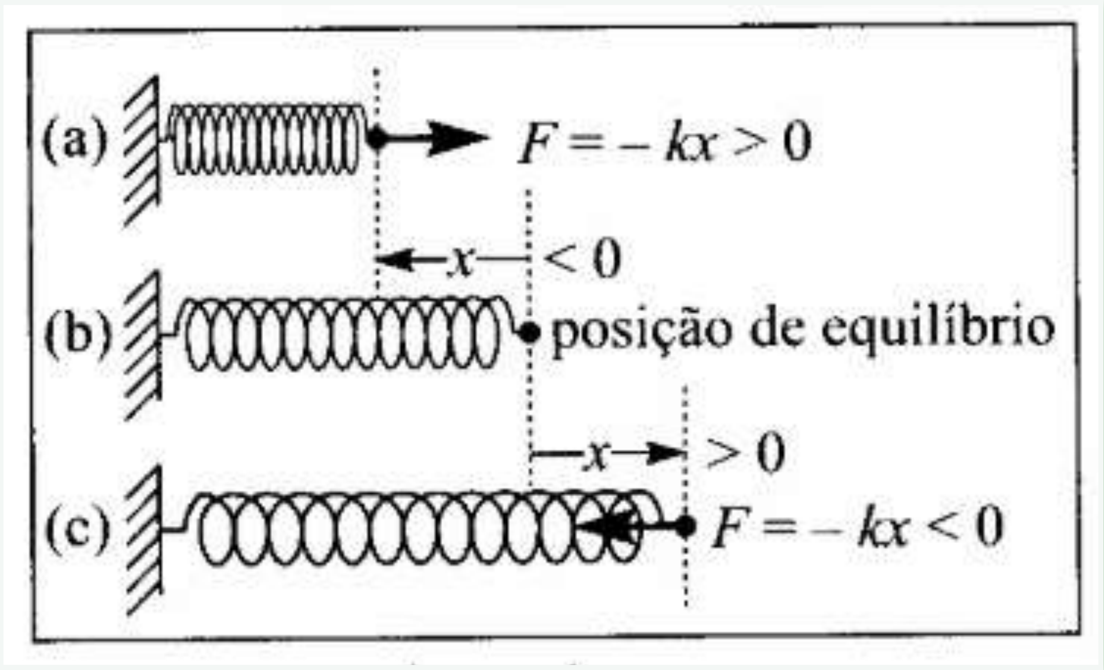


força entre dois átomos em função da distância entre eles.

- São forças desta natureza que dão origem à "reação normal de contato", quando um corpo sólido é colocado sobre outro (ex: um livro sobre a mesa)

Forças derivadas

- Este comportamento é observado macroscopicamente numa mola.



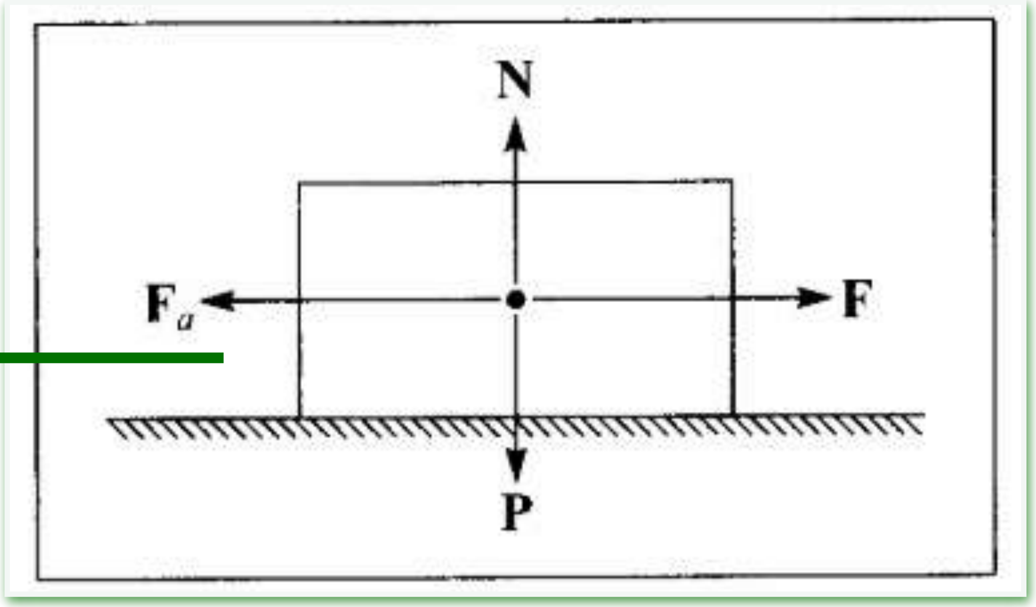
$$\boxed{\mathbf{F} = -kx\,\hat{\mathbf{x}}}$$

lei de Hooke

Forças derivadas

- Sabemos que, no contrato entre dois corpos sólidos, o atrito é tangencial à superfície de contato

força de atrito



Forças derivadas

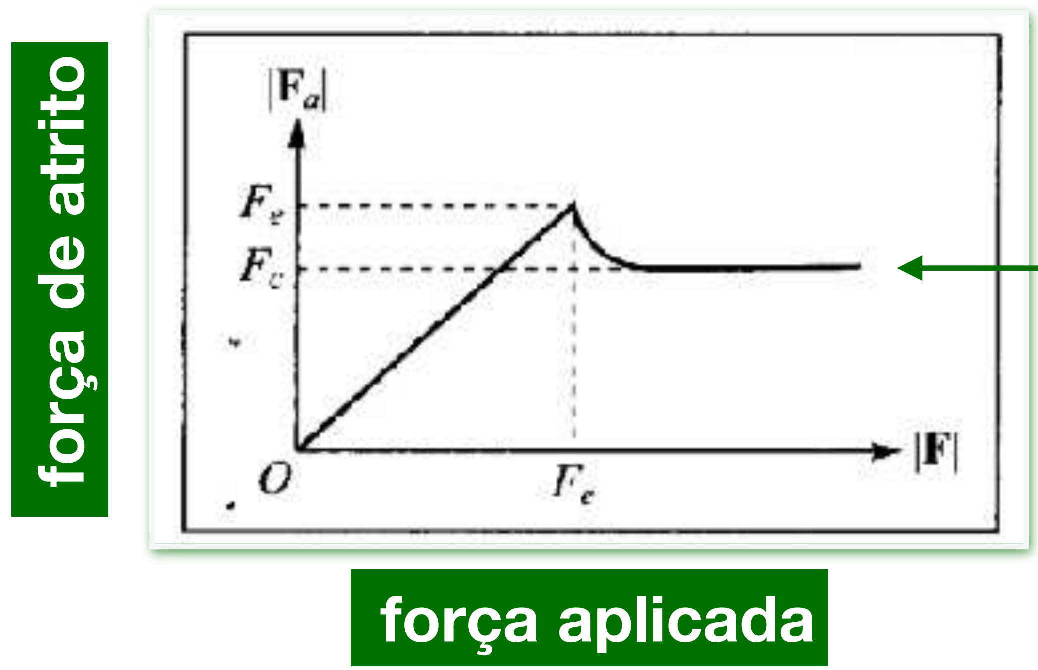
- As forças de atrito são outro exemplo de forças de contato.
- O fenômeno é extremamente complicado e depende muito do estado das superfícies em contato: grau de polimento, oxidação, presença ou ausência de camadas fluídas.
- As “leis do atrito” são **empíricas**.

Forças derivadas

- Podemos enunciar as seguintes “leis" do atrito:
  - A força de atrito máxima para qual o bloco começa a se mover é proporcional ao módulo da força normal de contato entre as superfícies.

$$\boxed{\left|\mathbf{F}_a\right|_{\text{máx}} = F_e = \mu_e\left|\mathbf{N}\right|}$$

  - O coeficiente de proporcionalidade se chama coeficiente de atrito estático
  - A força F_e é independente da área de contato entre os dois corpos



$$\boxed{\left|\mathbf{F}\right| = F_c = \mu_c\left|\mathbf{N}\right|, \qquad \mu_c < \mu_e}$$

Forças derivadas

- Até aqui discutimos o atrito entre duas superfícies secas.
- Se houver, por exemplo, uma camada de fluído temos que considerar o problema do atrito entre um sólido e um fluído.
- O exemplo mais importante é a resistência do ar.

Forças derivadas

- A resistência oposta por um fluído ao deslocamento de um corpo através dele é também um fenômeno muito complicado.

- No caso de **baixas velocidades**, a resistência depende da viscosidade do fluído, e é geralmente proporcional à velocidade.

- Para **altas velocidades**, em geral se produz turbulência no fluído e o termo dominante da força de resistência é proporcional ao quadrado da velocidade.

$$\boxed{|\mathbf{R}| = a|\mathbf{v}| + b|\mathbf{v}|^2}$$

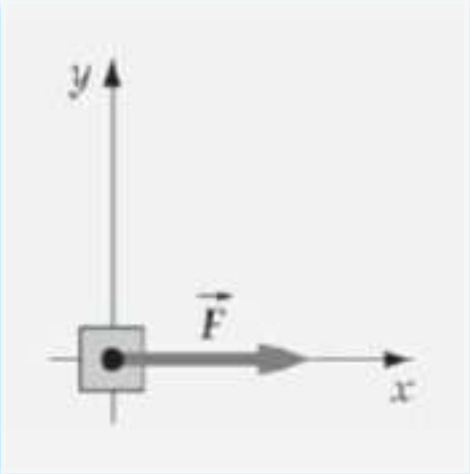
Alguns exemplos

Geral

- Você está à deriva no espaço, afastado de sua nave espacial. Por sorte, você tem uma unidade de propulsão que fornece uma força resultante constante $\overrightarrow{F}$ por 3.0 segundos. Após 3.0 s, você se moveu 2.25 m. Se sua massa é 68 kg, encontre $\overrightarrow{F}$.

Geral

- Resolução:



- Você está à deriva no espaço, afastado de sua nave espacial. Por sorte, você tem uma unidade de propulsão que fornece uma força resultante constante $\vec{F}$ por 3.0 segundos. Após 3.0 s, você se moveu 2.25 m. Se sua massa é 68 kg, encontre $\vec{F}$.

$$\Delta x = v_0 t + \tfrac{1}{2}a_x t^2 = 0 + \tfrac{1}{2}a_x t^2$$

$$a_x = \frac{2\Delta x}{t^2} = \frac{2(2{,}25\text{ m})}{(3{,}0\text{ s})^2} = 0{,}50\text{ m/s}^2$$

$$\vec{a} = a_x\hat{i} = 0{,}50\text{ m/s}^2\hat{i}$$

$$\vec{F} = ma_x\hat{i} = (68\text{ kg})(0{,}50\text{ m/s}^2)\hat{i}$$

$$= \boxed{34\text{ N}\hat{i}}$$

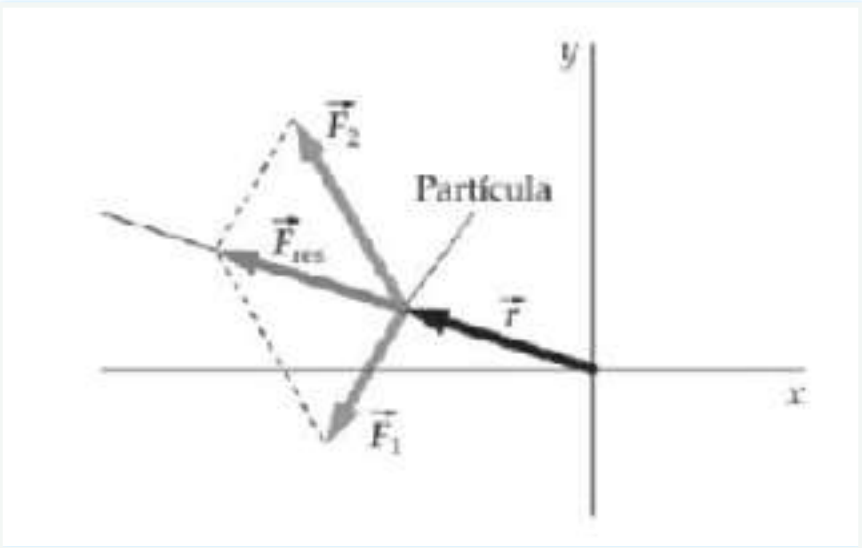
Geral

- Uma partícula de 0.400 kg de massa está submetida simultaneamente a duas forças,
$\overrightarrow{F}_1 = -2.00\ \mathrm{N}\hat{i} - 4.00\ \mathrm{N}\hat{j}$ e
$\overrightarrow{F}_2 = -2.60\ \mathrm{N}\hat{i} + 5.00\ \mathrm{N}\hat{j}$.
Se a partícula está na origem e parte do repouso em $t = 0$, encontre
  - (*a*) sua posição $\vec{r}$
  - (*b*) sua velocidade $\overrightarrow{v}$ em $t = 1.60$ s.

Geral

- Uma partícula de 0.400 kg de massa está submetida simultaneamente a duas forças,
  $\vec{F}_1 = -2.00\ \mathrm{N}\hat{i} - 4.00\ \mathrm{N}\hat{j}$ e
  $\vec{F}_2 = -2.60\ \mathrm{N}\hat{i} + 5.00\ \mathrm{N}\hat{j}$.
  Se a partícula está na origem e parte do repouso em $t = 0$, encontre
    - (*a*) sua posição $\vec{r}$
    - (*b*) sua velocidade $\vec{v}$ em $t = 1.60$ s.

- Resolução:



$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \tfrac{1}{2}\vec{a}t^2 = 0 + 0 + \tfrac{1}{2}\vec{a}t^2$$
$$= \tfrac{1}{2}\vec{a}t^2$$

$$\vec{a} = \frac{\Sigma\vec{F}}{m}$$

$$\Sigma\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$
$$= (-2{,}00\ \mathrm{N}\ \hat{i} - 4{,}00\ \mathrm{N}\ \hat{j}) + (-2{,}60\ \mathrm{N}\ \hat{i} + 5{,}00\ \mathrm{N}\ \hat{j})$$
$$= -4{,}60\ \mathrm{N}\ \hat{i} + 1{,}00\ \mathrm{N}\ \hat{j}$$

$$\vec{a} = \frac{\Sigma\vec{F}}{m} = -11{,}5\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{i} + 2{,}50\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{j}$$

$$\vec{r} = \tfrac{1}{2}\vec{a}t^2 = \tfrac{1}{2}a_x t^2\hat{i} + \tfrac{1}{2}a_y t^2\hat{j} = (-5{,}75\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{i} + 1{,}25\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{j})t^2$$

$$\vec{r} = \boxed{-14{,}7\ \mathrm{m}\ \hat{i} + 3{,}20\ \mathrm{m}\ \hat{j}}$$

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt} = 2(-5{,}75\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{i} + 1{,}25\ \mathrm{m/s^2}\ \hat{j})t$$
$$\vec{v}(1{,}6\ \mathrm{s}) = \boxed{-18{,}4\ \mathrm{m/s}\ \hat{i} + 4{,}00\ \mathrm{m/s}\ \hat{j}}$$

Diagrama de corpo livre

- Um quadro pesando 8.0 N é suspenso por dois fios com tensões T_1 e T_2, como mostra a figura. Encontre cada tensão

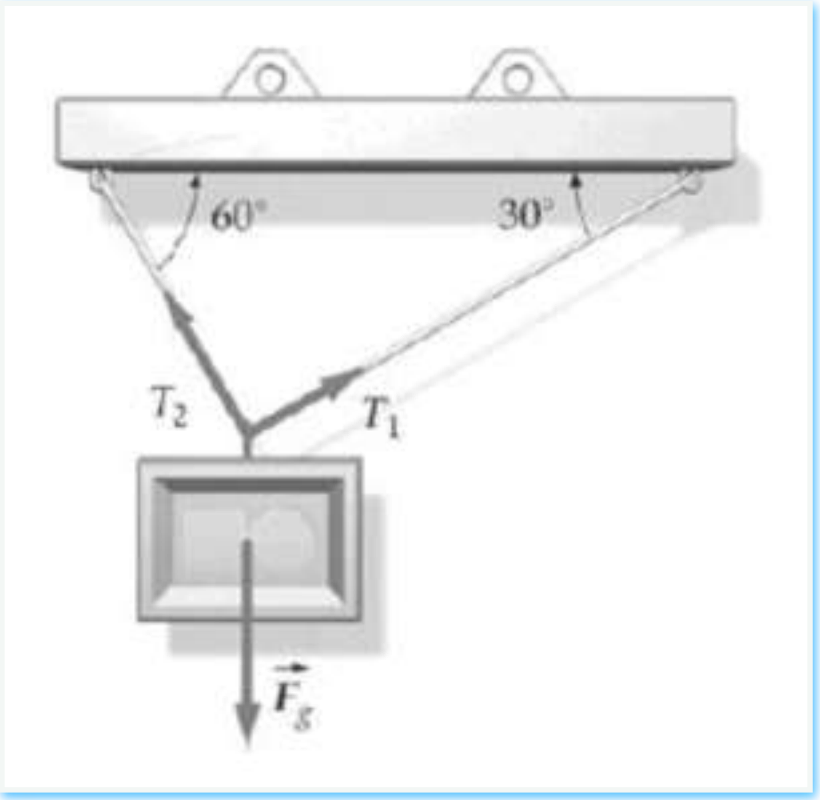
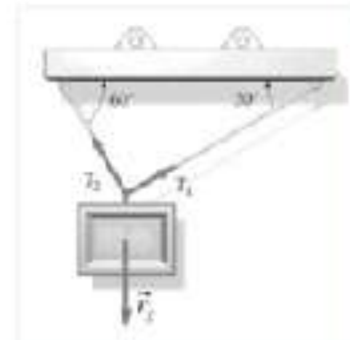


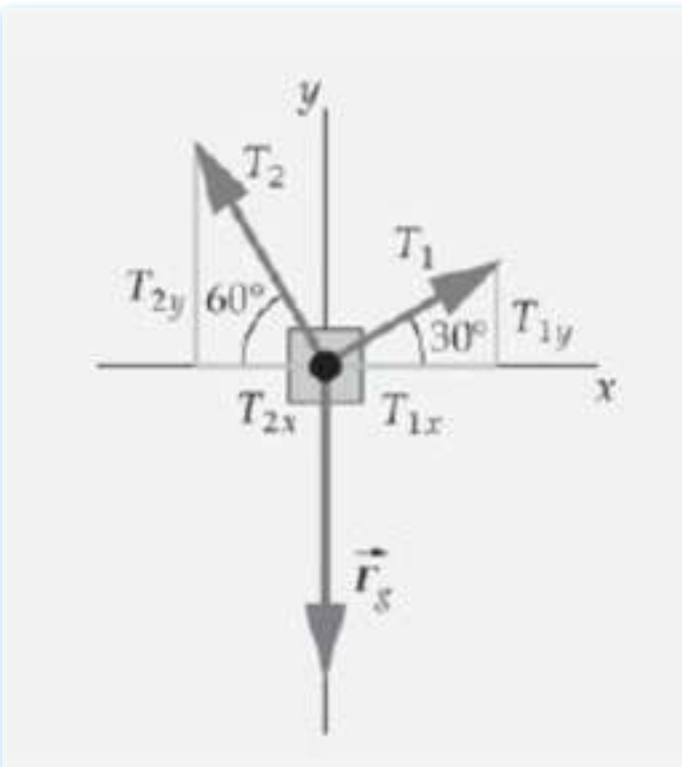
Diagrama de corpo livre

- Um quadro pesando 8.0 N é suspenso por dois fios com tensões T_1 e T_2, como mostra a figura. Encontre cada tensão



- Resolução:

diagrama de corpo livre do problema



$$\vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{F}_g = m\vec{a}$$

$$T_{1x} + T_{2x} + F_{gx} = 0$$
$$T_1 \cos 30° - T_2 \cos 60° + 0 = 0 \quad \text{e}$$
$$T_{1y} + T_{2y} + F_{gy} = 0$$
$$T_1 \operatorname{sen} 30° + T_2 \operatorname{sen} 60° - F_g = 0$$

$$T_2 = T_1 \frac{\cos 30°}{\cos 60°}$$

$$T_1 \operatorname{sen} 30° + \left(T_1 \frac{\cos 30°}{\cos 60°}\right) \operatorname{sen} 60° - F_g = 0$$

$$T_1 = 0{,}50 F_g = \boxed{4{,}0\ \text{N}}$$

$$T_2 = T_1 \frac{\cos 30°}{\cos 60°} = \boxed{6{,}9\ \text{N}}$$

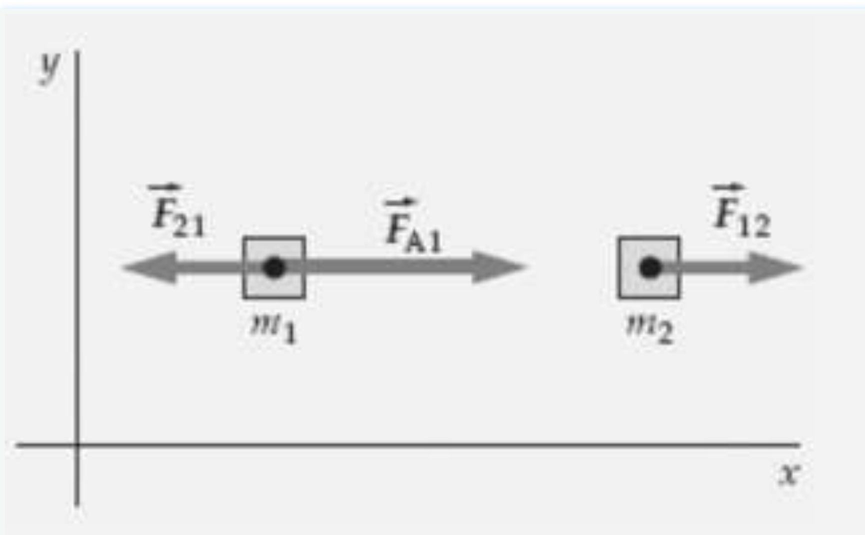
Terceira lei de Newton

- Você é um astronauta que está construindo uma estação espacial e empurra uma caixa de massa m_1 com uma força $\vec{F}_{A1}$. A caixa está em contato direto com uma segunda caixa de massa m_2.
    - (*a*) Qual é a aceleração das caixas?
    - (*b*) Qual é a magnitude da força que cada caixa exerce sobre a outra?

Terceira lei de Newton

- Resolução:

diagrama de corpo livre do problema



- A Você é um astronauta que está construindo uma estação espacial e empurra uma caixa de massa m_1 com uma força $\vec{F}_{A1}$. A caixa está em contato direto com uma segunda caixa de massa m_2.
  - (a) Qual é a aceleração das caixas?
  - (b) Qual é a magnitude da força que cada caixa exerce sobre a outra?

$$F_{A1} - F_{21} = m_1 a_{1x}$$

$$F_{12} = m_2 a_{2x}$$

$$a_{2x} = a_{1x} = a_x$$

$$F_{21} = F_{12} = F$$

$$a_x = \boxed{\frac{F_{A1}}{m_1 + m_2}}$$

$$F = \boxed{\frac{m_2}{m_1 + m_2} F_{A1}}$$

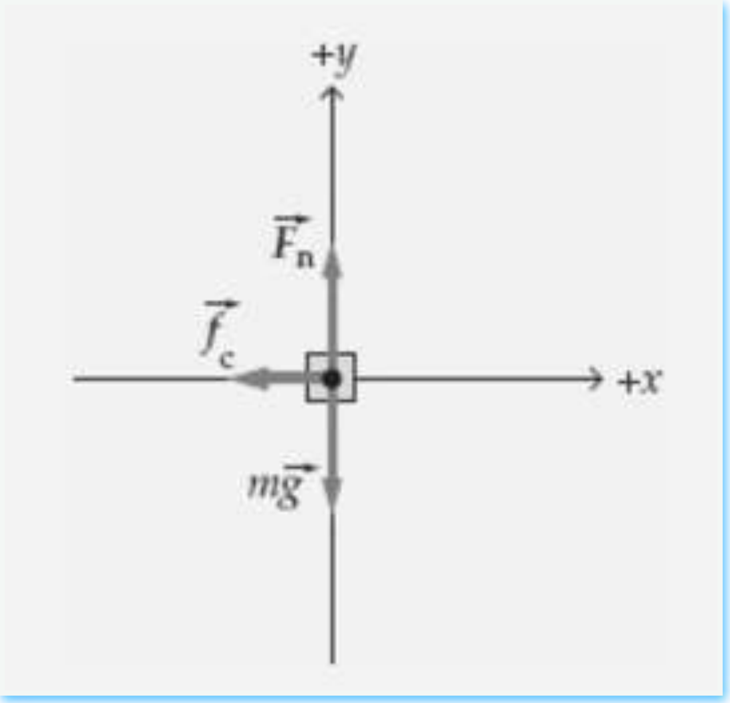
Força de atrito

- Em um jogo de taco, o jogador dá uma tacada no disco que se encontra inicialmente em repouso sobre o chão, e que tem uma massa de 0.40 kg. O disco parte horizontalmente com uma velocidade de 8.5 m/s e desliza por uma distância de 8.0 m antes de parar. Encontre o coeficiente de atrito cinético entre o disco e o chão

Força de atrito

- Resolução:

diagrama de corpo livre do problema



$$f_c = \mu_c F_n$$

- Em um jogo de taco, o jogador dá uma tacada no disco que se encontra inicialmente em repouso sobre o chão, e que tem uma massa de 0.40 kg. O disco parte horizontalmente com uma velocidade de 8.5 m/s e desliza por uma distância de 8.0 m antes de parar. Encontre o coeficiente de atrito cinético entre o disco e o chão

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$F_n - mg = 0 \Rightarrow F_n = mg$$

$$\text{logo} \quad f_c = \mu_c mg$$

$$\Sigma F_x = ma_x$$

$$-f_c = ma_x$$

$$\text{logo} \quad -\mu_c mg = ma_x \quad \text{logo} \quad a_x = -\mu_c g$$

$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x \Delta x \Rightarrow 0 = v_{0x}^2 - 2\mu_c g \,\Delta x$$

$$\text{logo} \quad \mu_c = \frac{v_{0x}^2}{2g\,\Delta x} = \frac{(8{,}5\ \text{m/s})^2}{2(9{,}81\ \text{m/s}^2)(8{,}0\ \text{m})} = \boxed{0{,}46}$$

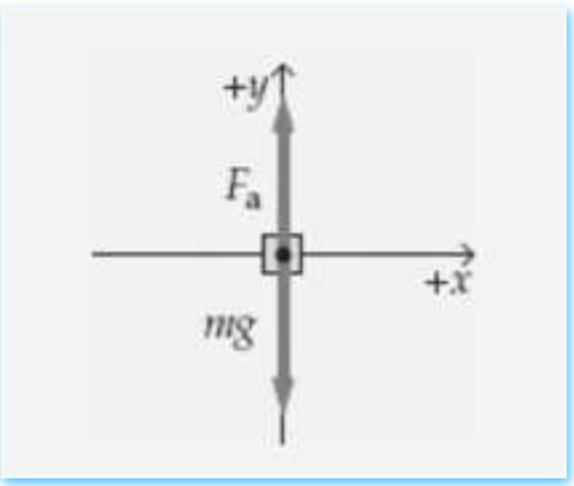
Força de arraste

- Uma pára-quedista de 64 kg cai com uma velocidade terminal de 180 km/h, com seus braços e pernas estendidos.
    - (*a*) Qual é a magnitude da força de arraste F_a, para cima, sobre a pára-quedista?
    - (*b*) Se a força de arraste é igual a bv^2, qual é o valor de b?

Força de arraste

- Resolução:

diagrama de corpo livre do problema



- Uma pára-quedista de 64 kg cai com uma velocidade terminal de 180 km/h, com seus braços e pernas estendidos.
  - (*a*) Qual é a magnitude da força de arraste F_a, para cima, sobre a pára-quedista?
  - (*b*) Se a força de arraste é igual a bv^2, qual é o valor de b?

$$\Sigma F_y = ma_y \quad \Rightarrow \quad F_a - mg = 0$$

$$\text{logo} \quad F_a = mg = (64{,}0\ \text{kg})(9{,}81\ \text{N/kg}) = \boxed{628\ \text{N}}$$

$$F_a = mg = bv^2$$

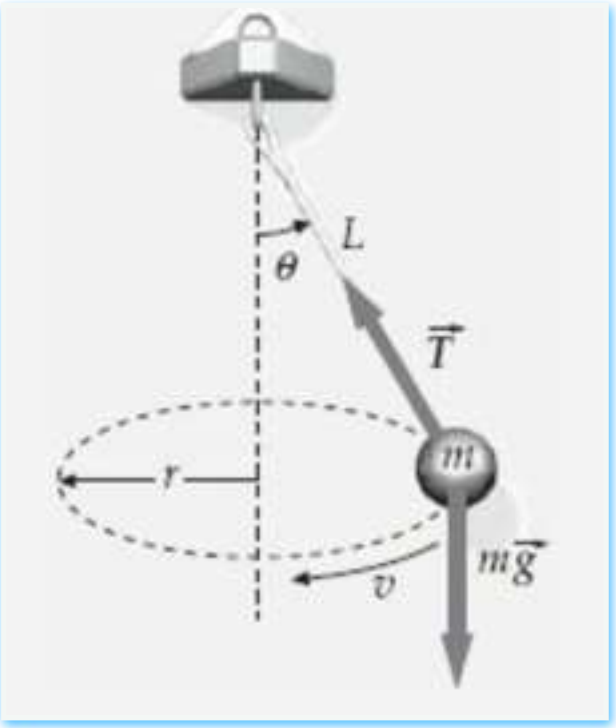
$$\text{logo} \quad b = \frac{mg}{v^2}$$

$$180\ \text{km/h} = \frac{180\ \text{km}}{1\ \text{h}} \times \frac{1\ \text{h}}{3{,}6\ \text{ks}} = 50{,}0\ \text{m/s}$$

$$b = \frac{(64{,}0\ \text{kg})(9{,}81\ \text{m/s}^2)}{(50{,}0\ \text{m/s})^2} = \boxed{0{,}251\ \text{kg/m}}$$

Movimento circular

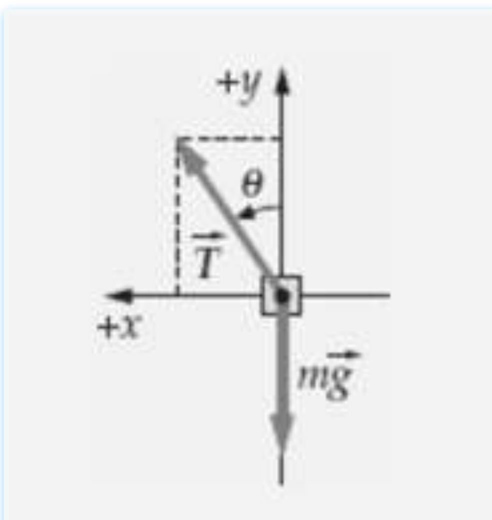
- Uma esfera de massa *m* está suspensa por uma corda e descreve com rapidez constante um círculo horizontal de raio *r*, como mostra a figura. A corda forma um ângulo θ com a vertical.
  - (*a*) a orientação da aceleração
  - (*b*) a tensão da corda
  - (*c*) a rapidez da esfera.



Movimento circular

- Resolução:

diagrama de corpo livre do problema



- Uma esfera de massa m está suspensa por uma corda e descreve com rapidez constante um círculo horizontal de raio r, como mostra a figura. A corda forma um ângulo θ com a vertical.
  - (a) a orientação da aceleração
  - (b) a tensão da corda
  - (c) a rapidez da esfera.

$$\Sigma F_y = ma_y \Rightarrow T\cos\theta - mg = 0$$

logo $\boxed{T = \dfrac{mg}{\cos\theta}}$

$$\Sigma F_x = ma_x \Rightarrow T\,\mathrm{sen}\,\theta = m\frac{v^2}{r}$$

$$\frac{mg}{\cos\theta}\,\mathrm{sen}\,\theta = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow g\tan\theta = \frac{v^2}{r}$$

logo $v = \boxed{\sqrt{rg\tan\theta}}$

Sumário

- Forças em equilíbrio.
- As leis do movimento de Newton.
- Aplicações das leis de Newton.