Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)
Universidade Federal do ABC (UFABC)

# Fenômenos Mecânicos

## Aula 11


Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira
(leigui@ufabc.edu.br)


19/04/2023

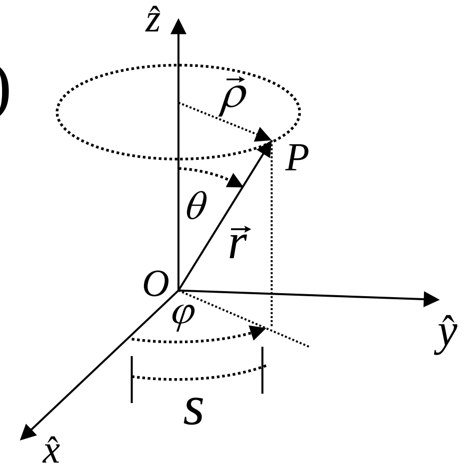
Universidade Federal do ABC

# O que veremos hoje...

- Revisão do movimento rotacional
- Trabalho e energia cinética rotacional
- Potência
- Equilíbrio (caso rotacional)
- Exemplos

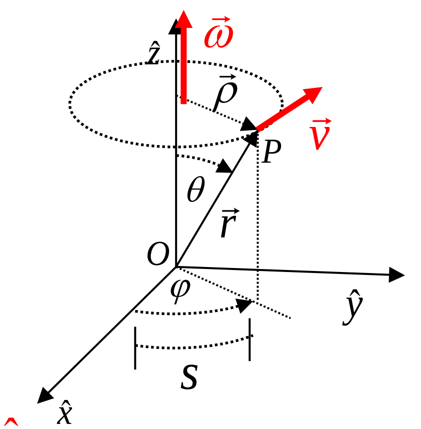
# Variáveis rotacionais (angulares)

Deslocamento angular $\Rightarrow$ $\Delta\varphi(t)=\varphi(t+\Delta t)-\varphi(t)$




$s=\rho\,\varphi \;(\varphi\ em\ radianos)$

Velocidade angular média (escalar) $\Rightarrow$ $\bar{\omega}=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$




Velocidade angular instantânea (vetor) $\Rightarrow$ $\vec{\omega}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\hat{n}=\frac{d\varphi}{dt}\hat{n}$

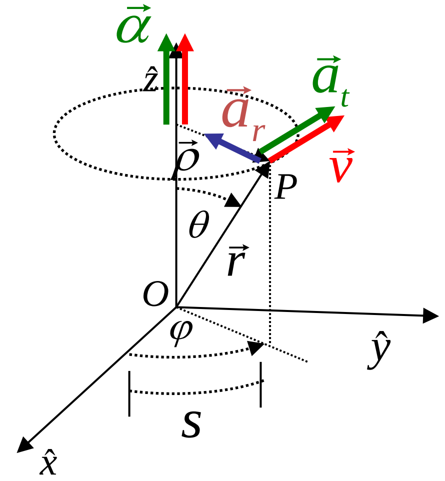
$$\boxed{\vec{v}=\vec{\omega}\times\vec{r}}$$

# Variáveis rotacionais (angulares)

Variação da velocidade angular $\Rightarrow$ $\Delta\vec{\omega} = \vec{\omega}(t+\Delta t) - \vec{\omega}(t)$

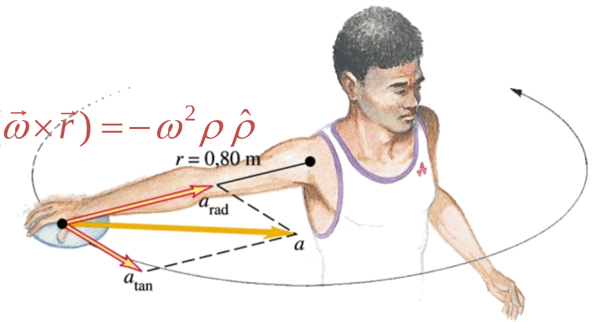
Aceleração angular média (escalar) $\Rightarrow$ $\bar{\alpha} = \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}$

Aceleração angular instantânea (vetor) $\Rightarrow$ $\vec{\alpha} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt}$




$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\omega}\times\vec{r}) = \underbrace{\frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}}_{\vec{a}_t} + \underbrace{\vec{\omega}\times\frac{d\vec{r}}{dt}}_{\vec{a}_r}$$

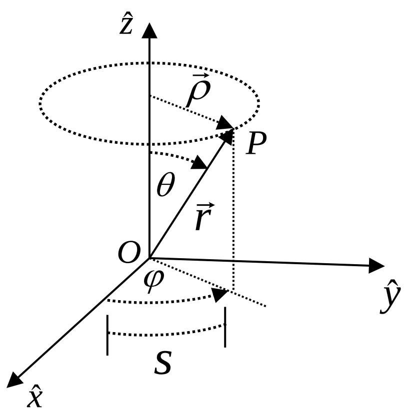
$\vec{a}_r = \vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}) = -\omega^2\rho\,\hat{\rho}$

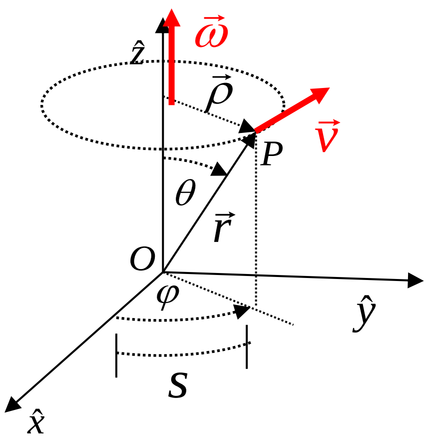


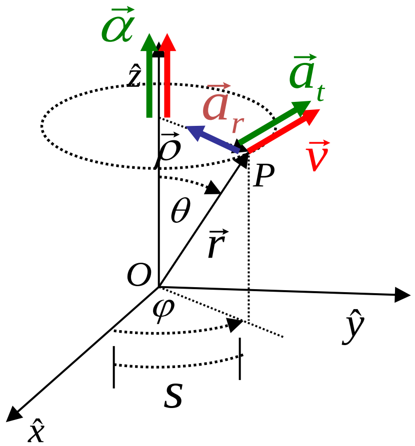

$\vec{a}_t = \alpha r\,\mathrm{sen}\,\theta\,\hat{v} = \vec{\alpha}\times\vec{r} = \alpha\rho\,\hat{v}$

# Variáveis rotacionais (angulares)

## Cinemática angular




Deslocamento linear $= x \leftrightarrow \varphi =$ Ângulo de rotação

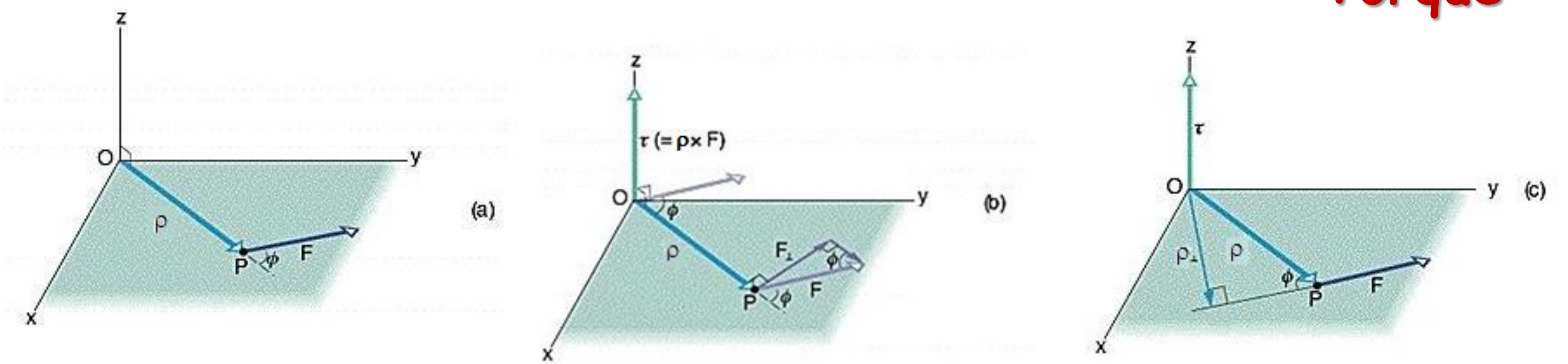
Velocidade linear $= v = \dfrac{dx}{dt} \leftrightarrow \omega = \dfrac{d\varphi}{dt} =$ Velocidade angular

Aceleração linear $= a = \dfrac{dv}{dt} \leftrightarrow \alpha = \dfrac{d\omega}{dt} =$ Aceleração angular

# Comparação entre o movimento retilíneo e o movimento de rotação

| Movimento retilíneo | | Movimento de rotação | |
|---|---|---|---|
| Deslocamento linear | $\Delta x$ | Deslocamento angular | $\Delta\varphi$ |
| Velocidade escalar | $v = \frac{dx}{dt}$ | Velocidade angular | $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| Aceleração | $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ | Aceleração angular | $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ |
| Equações da aceleração constante | $v = v_0 + at$<br>$\Delta x = \overline{v}\Delta t$<br>$\overline{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$<br>$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$<br>$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$ | Equações da aceleração angular constante | $\omega = \omega_0 + \alpha t$<br>$\Delta\varphi = \overline{\omega}\Delta t$<br>$\overline{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_0 + \omega)$<br>$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$<br>$\omega^2 = {\omega_0}^2 + 2\alpha\Delta\varphi$ |

# Torque




Definimos o ***torque***: $\tau = \rho F sen\phi = \rho F_{\perp} = \rho_{\perp} F$

com a convenção: $\tau > 0$ no sentido anti-horário : $\vec{\tau} = \tau\,\hat{z}$

$\tau < 0$ no sentido horário : $\vec{\tau} = -\tau\,\hat{z}$

assim: $$\boxed{\vec{\tau} = \vec{\rho} \times \vec{F}}$$

$$[\tau] = N \cdot m$$

2ª Lei de Newton (caso rotacional): $$\boxed{\tau = I\alpha}$$

$$F_{\perp} = m\,a_{\perp}$$

$$\tau = \rho\,F_{\perp} = \rho\,m\,a_{\perp} = \rho\,m(\alpha\,\rho) = \left(m\,\rho^2\right)\alpha$$

$$\boxed{\vec{\tau} \leftrightarrow \vec{F}\,;\ \vec{\alpha} \leftrightarrow \vec{a}\ \ e\ \ I \leftrightarrow M}$$

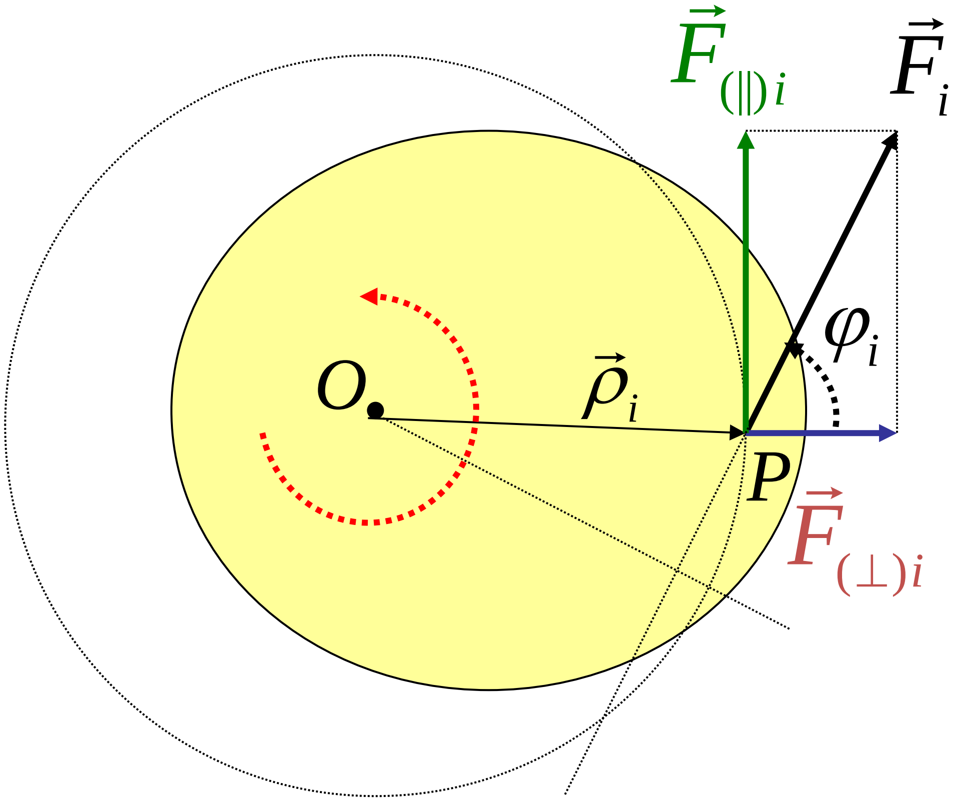
# Leis de Newton, torque e momento de inércia

Torque total:

$$\vec{\tau} = \sum_i \vec{\tau}_i$$

$$\vec{\tau} = (\sum_i m_i \rho_i^2)\vec{\alpha} \equiv I\,\vec{\alpha}$$

$$\boxed{I \equiv \sum_i m_i \rho_i^2}$$




É o chamado momento de inércia do corpo com relação ao eixo de rotação.

Analogia com as variáveis lineares:

$$\vec{\tau} \leftrightarrow \vec{F}\,;\ \vec{\alpha} \leftrightarrow \vec{a}\ \ e\ \ I \leftrightarrow M$$

# Cálculo do momento de inércia

No caso de partículas pontuais:

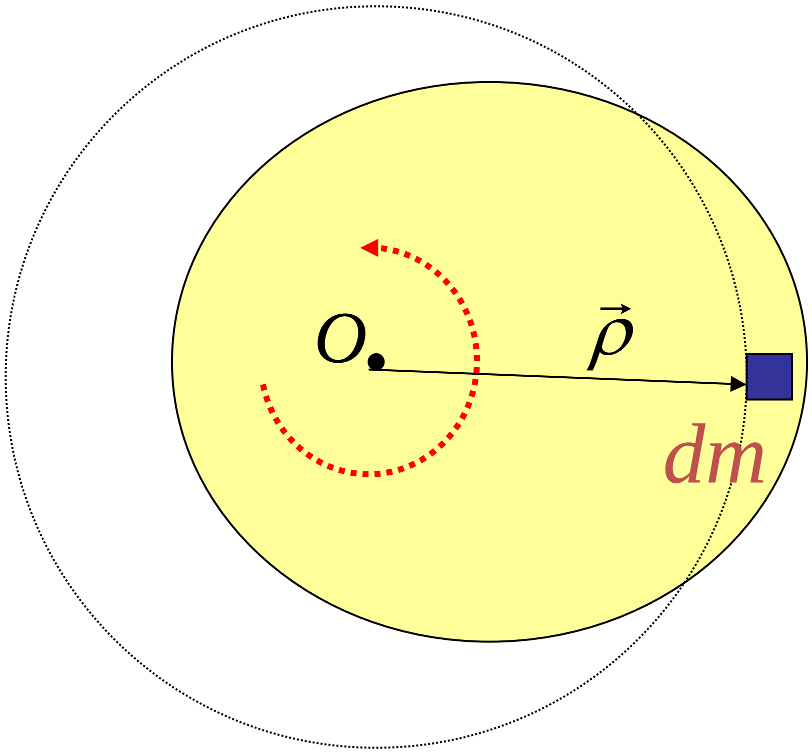
$$I \equiv \sum_i m_i \rho_i^{\,2}$$

No caso de uma distribuição contínua de massa:

$$I \equiv \int \rho^2 \, dm$$

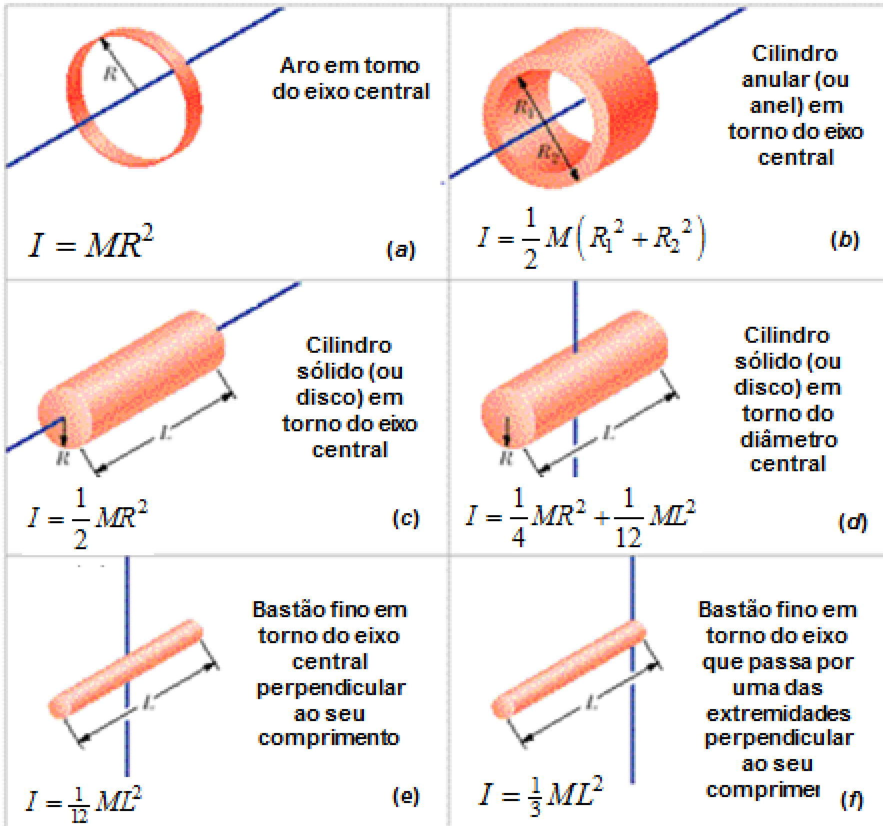
$dm$ é uma massa infinitesimal

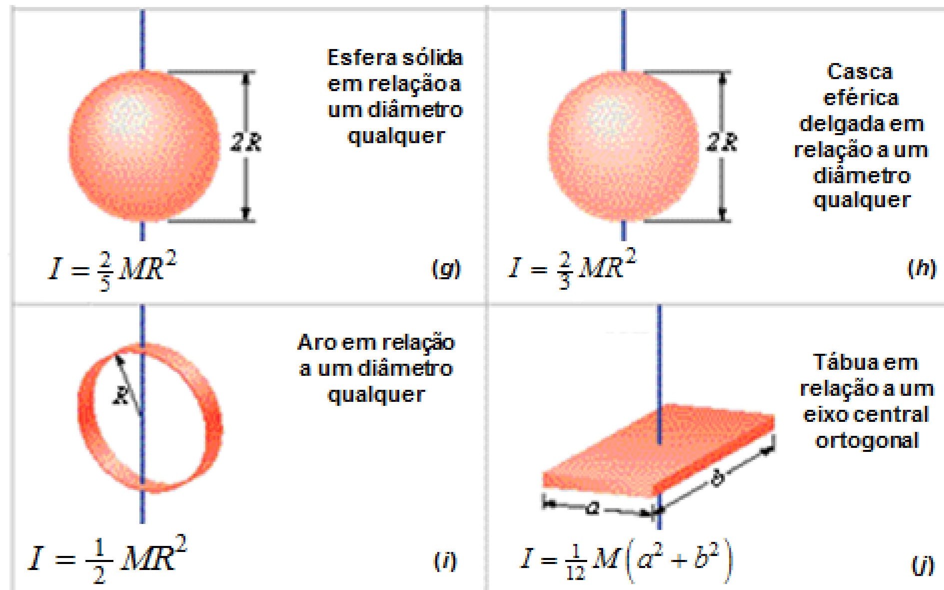
$$dm = \begin{cases} \lambda\, dl \;\; em\; 1\mathrm{dim} \\ \sigma\, ds \;\; em\; 2\,\mathrm{dim} \\ \rho_d\, dV \; em\; 3\,\mathrm{dim} \end{cases}$$




$$\rho_d = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho_d V \Rightarrow dm = \rho_d\, dV$$

# Momento de Inércia



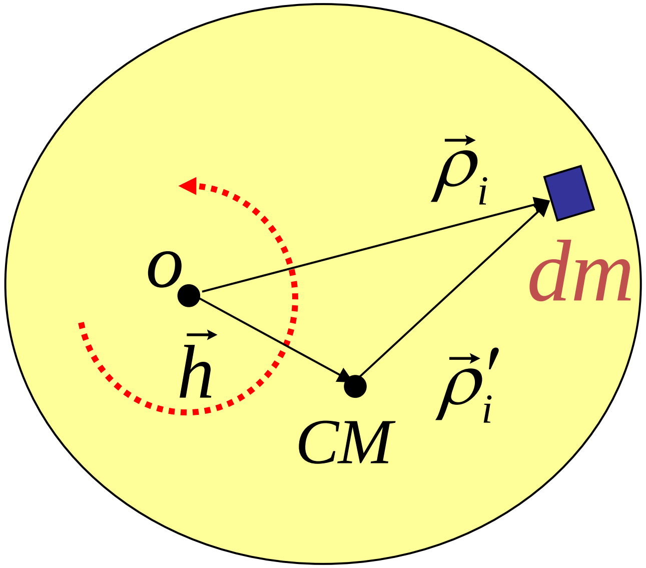



# O Teorema dos Eixos Paralelos

$$\vec{\rho}_i = \vec{h} + \vec{\rho}_i'$$

$$\Downarrow$$

$$\sum_i m_i \rho_i^{\,2} = \sum_i m_i h^2 + \sum_i m_i \rho_i'^2 + 2\vec{h} \cdot \sum_i m_i \vec{\rho}_i'$$




**Mas:**

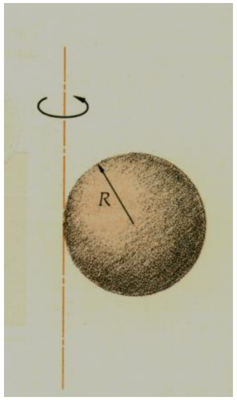
$$\vec{h} = \frac{\sum_i m_i \vec{\rho}_i}{M} \Rightarrow \sum_i m_i (\vec{\rho}_i - \vec{h}) = 0 \Rightarrow \sum_i m_i \vec{\rho}_i' = 0$$

**Então:**

$$\boxed{I = \sum_i m_i \rho_i^{\,2} = I_{CM} + Mh^2}$$

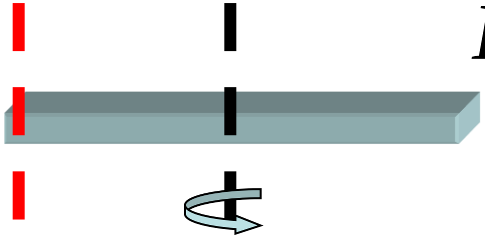
# Exemplo

Momento de Inércia de uma esfera maciça e homogênea em relação a um eixo tangente a sua superfície




$$I = I_{CM} + Mh^2 = \frac{2}{5}MR^2 + MR^2 = \frac{7}{5}MR^2$$

Para uma barra homogênea de massa M e comprimento L, o momento de inércia em relação a um eixo perpendicular ao plano da barra e que passa por uma extremidade é $I = 1/3\ M\ L^2$. Calcular o momento de inércia em relação ao eixo que passa pela metade da barra.

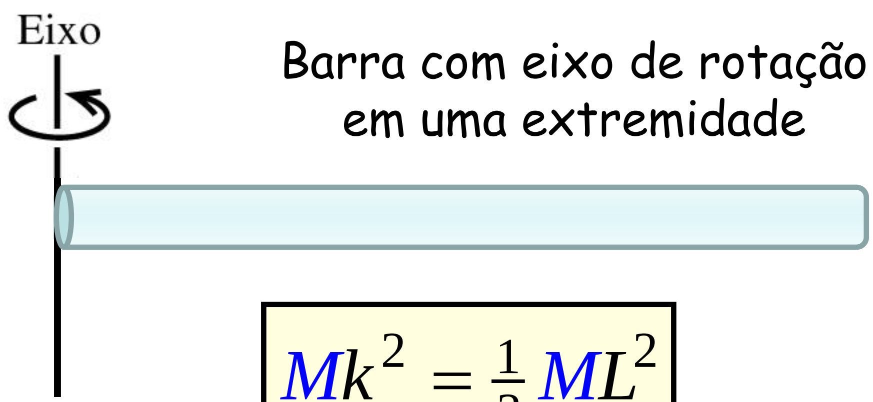


$$I_{CM} = I - Mh^2 = \frac{1}{3}ML^2 - M\left(\frac{L}{2}\right)^2 = \frac{1}{12}ML^2$$

# Raio de giração

$$k^2 = \frac{I}{M}$$

Raio de giração é a distância ao eixo em que deveria estar um ponto material de massa $M$ para ter o mesmo momento de inércia, $I$, que o corpo, em relação ao mesmo eixo.




Barra com eixo de rotação em uma extremidade

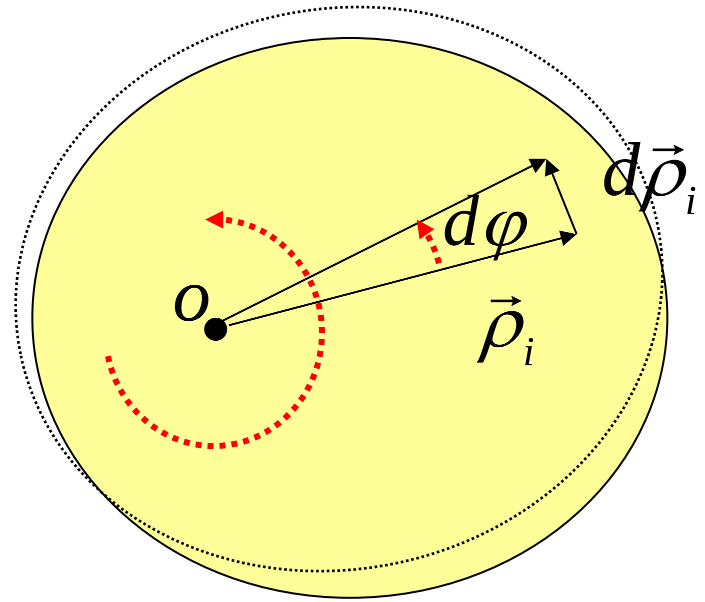
$$Mk^2 = \frac{1}{3} ML^2$$

$$\Rightarrow k = \frac{L\sqrt{3}}{3}$$

# Comparação entre o movimento retilíneo e o movimento de rotação

| Movimento retilíneo | | Movimento de rotação | |
|---|---|---|---|
| Deslocamento linear | $\Delta x$ | Deslocamento angular | $\Delta\varphi$ |
| Velocidade escalar | $v = \frac{dx}{dt}$ | Velocidade angular | $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| Aceleração | $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ | Aceleração angular | $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ |
| Equações da aceleração constante | $v = v_0 + at$<br>$\Delta x = \bar{v}\Delta t$<br>$\bar{v} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$<br>$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$<br>$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$ | Equações da aceleração angular constante | $\omega = \omega_0 + \alpha t$<br>$\Delta\varphi = \bar{\omega}\Delta t$<br>$\bar{\omega} = \frac{1}{2}(\omega_0 + \omega)$<br>$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$<br>$\omega^2 = {\omega_0}^2 + 2\alpha\Delta\varphi$ |
| Massa | $m$ | Momento de inércia | $I$ |
| Força | $\vec{F}$ | Torque | $\vec{\tau}$ |
| 2ª Lei de Newton | $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$ | 2ª Lei de Newton | $\sum \vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = I\vec{\alpha}$ |

# O Trabalho no deslocamento angular




$$dW_i = \vec{F}_i \cdot d\vec{\rho}_i$$

$$\vec{F}_i = (F_i)_\perp \hat{v}_i + (F_i)_{//} \hat{\rho}_i \quad \text{e} \quad d\vec{\rho}_i = \rho_i d\varphi \hat{v}_i$$

## O trabalho infinitesimal é dado por:

$$dW_i = (F_i)_\perp \rho_i d\varphi = \left|\vec{\rho}_i \times \vec{F}_i\right| d\varphi = \tau_i d\varphi$$

$$\boxed{dW_i = \tau_i d\varphi}$$

[W] = Joule (J)
se:
$[\tau]$ = N·m
$[\Delta\varphi]$ = rad

## Integrando:

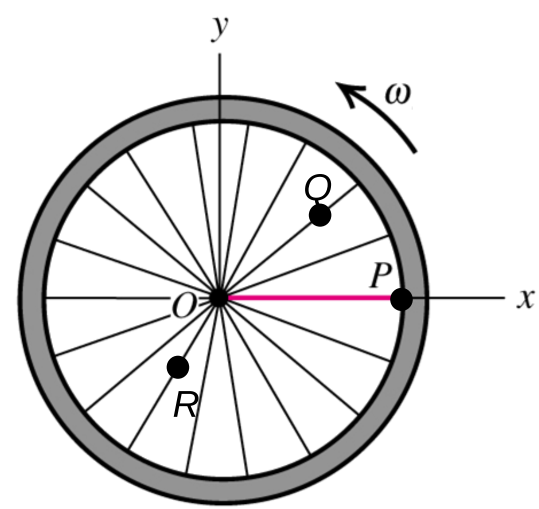
$$\boxed{W = \int_{\varphi_i}^{\varphi_f} \tau_i d\varphi}$$

Torque constante

$$\boxed{W = \tau \Delta\varphi}$$

# Energia cinética de rotação

Consideremos a roda ao lado, girando com velocidade angular $\omega$. A mesma é composta por um conjunto de partículas (*P*, *Q*, *R*, etc.)




## A energia cinética total de corpo é:

$$K = \tfrac{1}{2} m_P {v_P}^2 + \tfrac{1}{2} m_Q {v_Q}^2 + \tfrac{1}{2} m_R {v_R}^2 + \cdots$$

$$= \sum \tfrac{1}{2} m_i {v_i}^2$$

$m_i \equiv$ massa da *iésima* partícula

$v_i \equiv$ velocidade da *iésima* partícula

Como $v_i$ não é a mesma para cada partícula ($v_i = \omega r_i$), segue que:

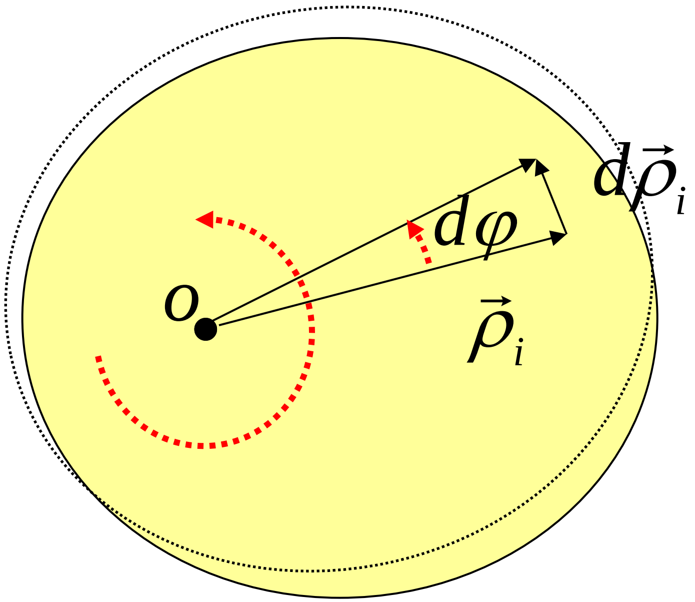
$$\boxed{\Rightarrow K = \sum \tfrac{1}{2} m_i \left(\omega r_i\right)^2 = \tfrac{1}{2}\left(\sum m_i {r_i}^2\right)\omega^2 = \tfrac{1}{2} I \omega^2}$$

$$[I] = \left(kg \cdot m^2\right)$$

# O Teorema da Energia Cinética

Da definição de trabalho:

$$\Rightarrow W = \int \tau_i d\varphi = \int I\,\alpha\,d\varphi = \int I\left(\frac{d\omega}{dt}\right)(\omega dt)$$




$$\Rightarrow \boxed{W = \int_{\omega_i}^{\omega_f} I\omega\, d\omega = \tfrac{1}{2}I\omega_f^2 - \tfrac{1}{2}I\omega_i^2 = K_f - K_i = \Delta K}$$

$$\Rightarrow \boxed{K = \frac{1}{2}I\omega^2}$$

# Potência

Potência

$$P = \frac{\Delta K}{\Delta t} = \tau \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \Rightarrow \frac{dW}{dt} = \tau\,\omega$$

$$\boxed{P = \sum_i \vec{\tau}_i \cdot \vec{\omega}_i}$$

# Comparação entre o movimento retilíneo e o movimento de rotação

| Movimento retilíneo | | Movimento de rotação | |
|---|---|---|---|
| Deslocamento linear | $\Delta x$ | Deslocamento angular | $\Delta\varphi$ |
| Velocidade escalar | $v = \frac{dx}{dt}$ | Velocidade angular | $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| Aceleração | $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ | Aceleração angular | $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ |
| Massa | $m$ | Momento de inércia | $I$ |
| Força | $\vec{F}$ | Torque | $\vec{\tau}$ |
| 2ª Lei de Newton | $\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$ | 2ª Lei de Newton | $\sum \vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = I\vec{\alpha}$ |
| Trabalho | $W = \int F dx$ | Trabalho | $W = \int \tau d\varphi$ |
| Potência | $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$ | Potência | $P = \vec{\tau} \cdot \vec{\omega}$ |
| Energia cinética | $K = \frac{1}{2} m v^2$ | Energia cinética | $K = \frac{1}{2} I \omega^2$ |
| T.E.C. | $W = \Delta K$ | T.E.C. | $W = \Delta K$ |

# Exemplo 1

Um anúncio fazendo propaganda da potência desenvolvida pelo motor de um automóvel afirma que o motor desenvolve $1{,}49 \cdot 10^5$ W para uma rotação de 6000 rpm. Qual é o torque desenvolvido pelo motor?

$$\omega = 6000\ \text{rpm} = 6000\,\frac{2\pi}{60} = 200\pi\ \text{rad/s}$$

$$P = \tau\omega \Rightarrow \tau = \frac{P}{\omega} = 237\ \text{N}\cdot\text{m}$$

# Exemplo 2

Um motor elétrico exerce um torque constante de 10 N·m sobre um esmeril montado em seu eixo motor. O momento de inércia I é = 2,0 kg·m². Sabendo que o sistema começa a se mover a partir do repouso, calcule o trabalho realizado pelo motor em 8,0 s e a energia cinética no instante final. Qual é a potência média desenvolvida pelo motor?

$$W = \int \tau \, d\varphi = \tau \Delta\varphi \quad \text{, para } \tau = \text{const.}$$

$$\tau = I\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{\tau}{I} = 5 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t = 40 \text{ rad/s}$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\Delta\varphi \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{\omega^2}{2\alpha} = 160 \text{ rad}$$

$$\Rightarrow W = \tau\Delta\varphi = 1600 \text{ J}$$

$$\Rightarrow K_f = \tfrac{1}{2} I\omega^2 = 1600 \text{ J}$$

$$\Rightarrow P = \frac{W}{\Delta t} = 200 \text{ W}$$

# Exemplo 3 – a molécula de oxigênio

Considere a molécula diatômica de oxigênio $O_2$, que está girando no plano *xy* ao redor do eixo *z* passando por seu centro, perpendicular ao seu comprimento. A massa de cada átomo de oxigênio é de $2{,}66 \times 10^{-26}$ kg, e na temperatura ambiente, a separação média entre os dois átomos de oxigênio é de $d = 1{,}21 \times 10^{-10}$ m.

(a) Calcule o momento de inércia da molécula ao redor do eixo *z*.

(b) Uma velocidade angular típica de uma molécula é $4{,}60 \times 10^{12}$ rad/s. Se a molécula de oxigênio está girando com essa velocidade angular ao redor do eixo *z*, qual é a sua energia cinética rotacional?

$(a)$

A molécula é modelada como um corpo rígido, considerando as duas partículas em rotação.

Como a distância de cada partícula ao eixo $z$ é $d/2$, o momento de inércia do redor do eixo é:

$$I = \sum_i m_i r_i^2 = m\left(\frac{d}{2}\right)^2 + m\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{md^2}{2}$$

$$= \frac{\left(2{,}66 \times 10^{-26}\ \text{kg}\right)\left(1{,}21 \times 10^{-21}\ \text{m}\right)^2}{2} = 1{,}95 \times 10^{-46}\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$(b)$

$$K_R = \frac{1}{2} I w^2$$

$$= \frac{1}{2}\left(1{,}95 \times 10^{-46}\ \text{kg} \cdot \text{m}^2\right)\left(4{,}60 \times 10^{12}\ \text{rad/s}\right)^2 = 2{,}06 \times 10^{-21}\ \text{J}$$

# Condições para equilíbrio

Primeira condição de equilíbrio (para um corpo com *massa distribuída*)

Centro de massa tem aceleração nula

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$\sum F_x = 0 \qquad \sum F_y = 0 \qquad \sum F_z = 0$$

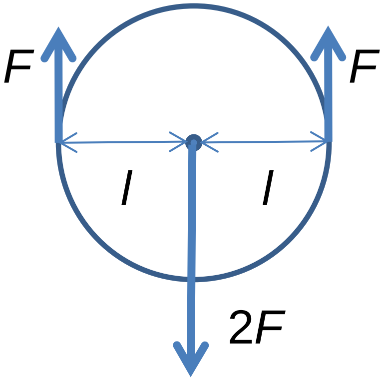
Inclui somente forças *externas*

Segunda condição de equilíbrio (em torno de nenhum ponto)

$$\sum \vec{\tau} = 0$$

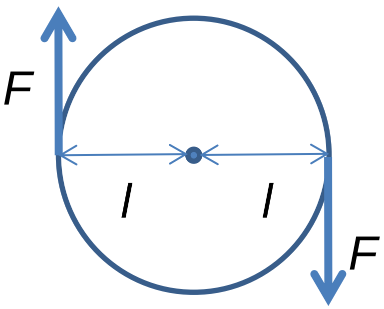
$$\sum \tau_x = 0 \qquad \sum \tau_y = 0 \qquad \sum \tau_z = 0$$

# Condições para equilíbrio



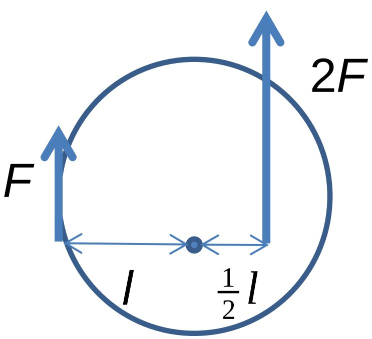

Primeira condição ***atendida***: $\Sigma F_{res} = 0$

Segunda condição ***atendida***: $\Sigma \tau_{res} = 0$ (em torno do eixo)




Primeira condição ***atendida:*** $\Sigma F_{res} = 0$

Segunda condição ***não atendida***: $\tau_{res} \neq 0$

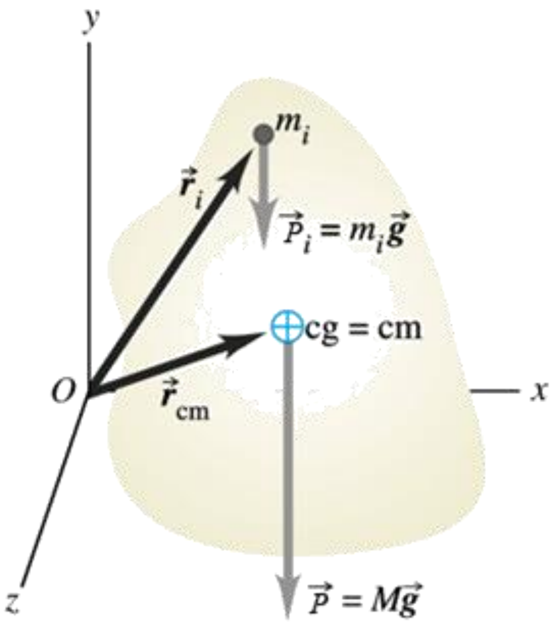



Primeira condição ***não atendida***: $F_{res}$ de baixo para cima

Segunda condição ***atendida***: $\tau_{res} = 0$ (em torno do eixo)

# Centro de massa

## Coordenadas $x_{cm}$, $y_{cm}$ e $z_{cm}$ do centro de massa




$$x_{cm} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \cdots}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots} = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i}$$

$$y_{cm} = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3 + \cdots}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots} = \frac{\sum_i m_i y_i}{\sum_i m_i}$$

$$z_{cm} = \frac{m_1z_1 + m_2z_2 + m_3z_3 + \cdots}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots} = \frac{\sum_i m_i z_i}{\sum_i m_i}$$

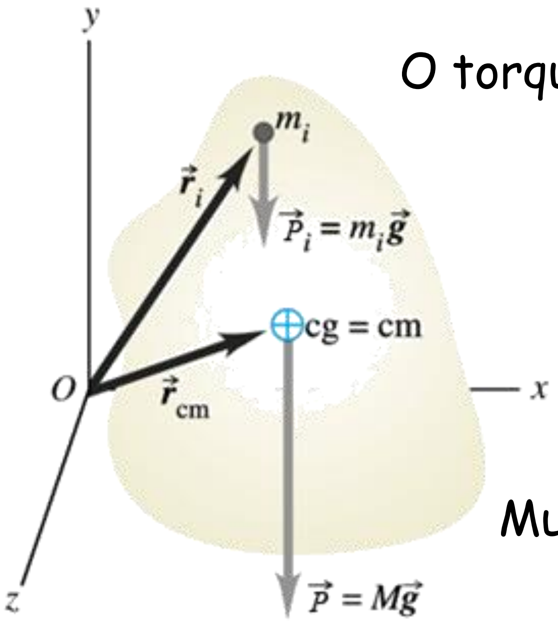
## Coordenadas do vetor posição do cm

$$\vec{r}_{cm} = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + m_3\vec{r}_3 + \cdots}{m_1 + m_2 + m_3 + \cdots} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$

# Centro de gravidade e centro de massa

O <u>vetor torque</u> do <u>peso</u>, em relação a O, da *i*-ésima partícula é:

$$\vec{\tau}_i = \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \vec{r}_i \times m_i \vec{g}$$




O torque *total* produzido por todas as forças gravitacionais

$$\vec{\tau} = \sum_i \vec{\tau}_i = \vec{r}_1 \times m_1 \vec{g} + \vec{r}_2 \times m_2 \vec{g} + \cdots$$

$$= \left( m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \cdots \right) \times \vec{g}$$

$$= \left( \sum_i m_i \vec{r}_i \right) \times \vec{g}$$

Multiplicando e dividindo pela massa total do corpo

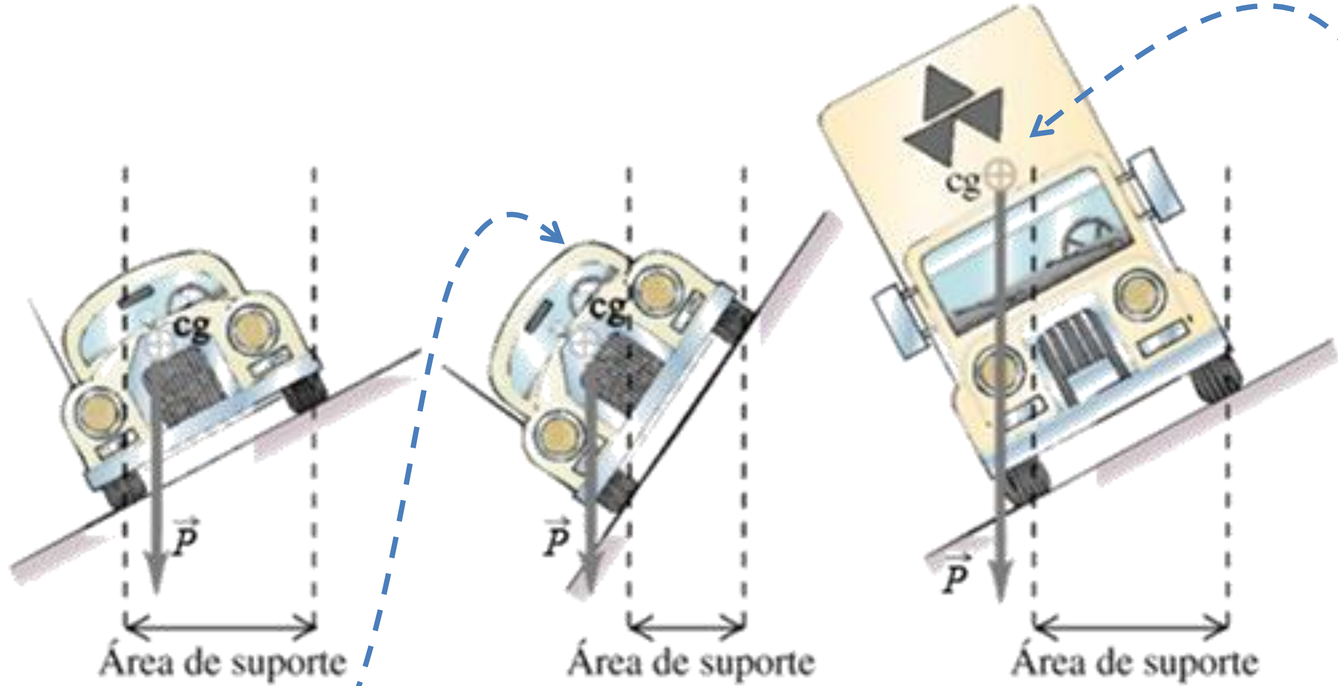
$$M = m_1 + m_2 + \cdots = \sum_i m_i$$

Temos:

$$\vec{\tau} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \cdots}{m_1 + m_2 + \cdots} \times M\vec{g} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i} \times M\vec{g}$$

$$\boxed{\vec{\tau} = \vec{r}_{cm} \times M\vec{g} = \vec{r}_{cm} \times \vec{P}}$$

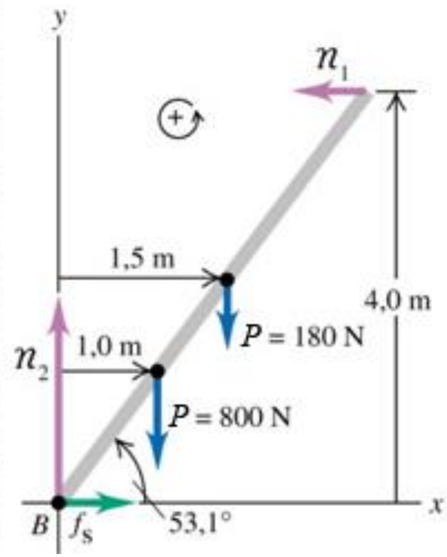
# Determinação e uso do centro de gravidade

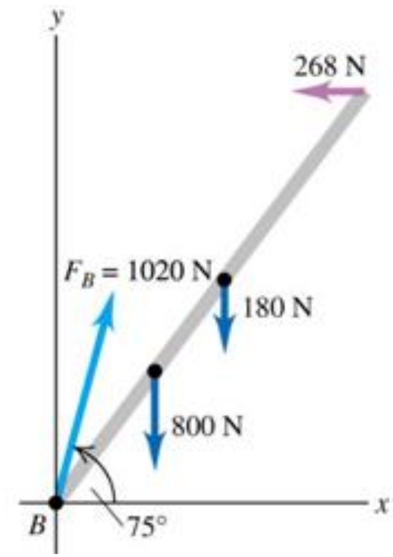



O centro de gravidade está fora da área de suporte: o veículo tomba

Quanto mais alto o centro de gravidade, menor a inclinação necessária para fazer o veículo tombar.

# Exemplo: Sir Lancelot se equilibrando

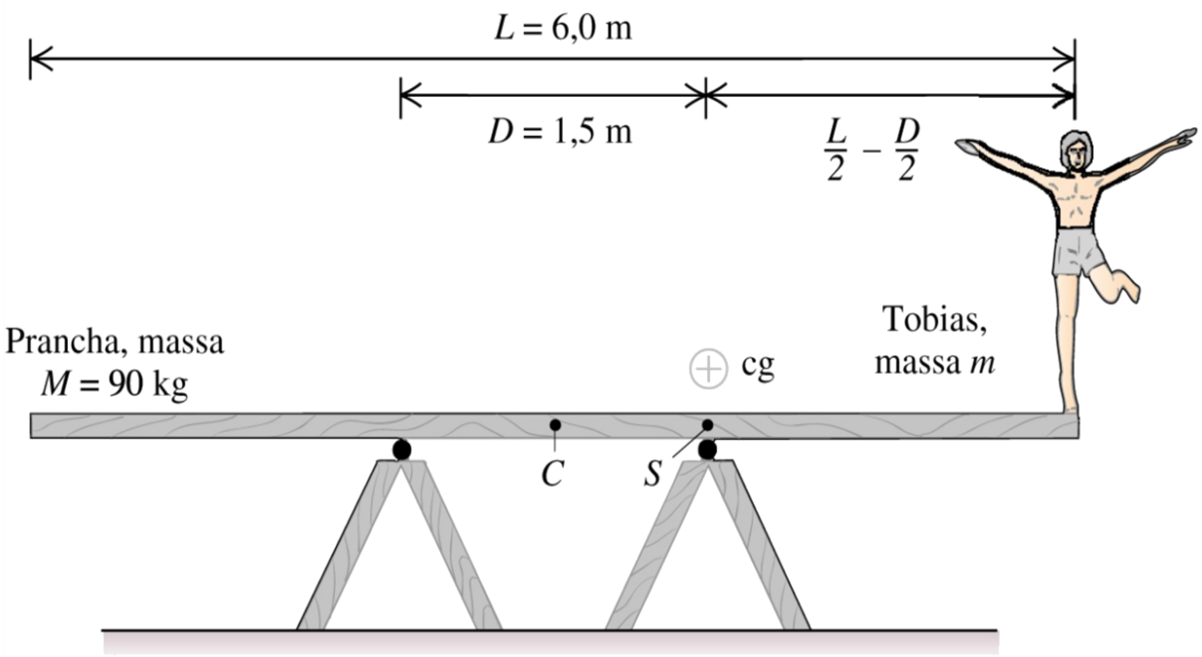




a) Calcule a força normal e a força de atrito sobre a escada em sua base.

b) Ache o coeficiente de atrito estático mínimo para impedir que a base da escada escorregue.

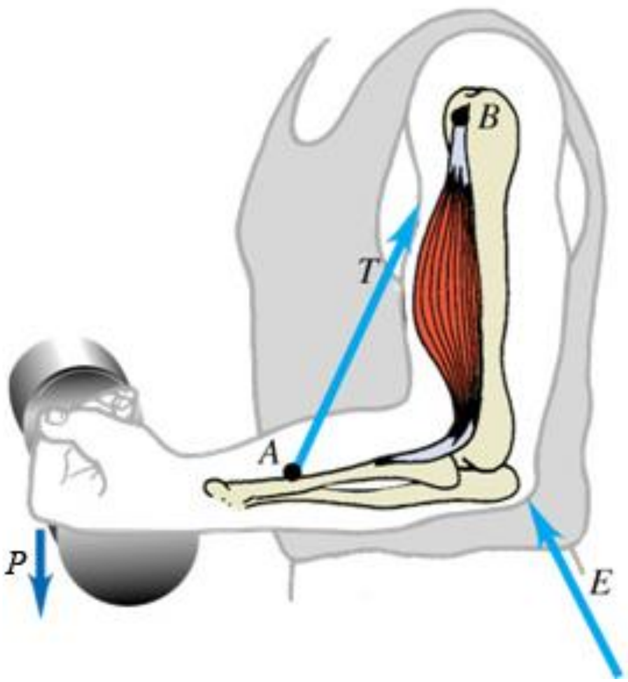
c) Determine o módulo, a direção e o sentido da força de contato com a base da escada.

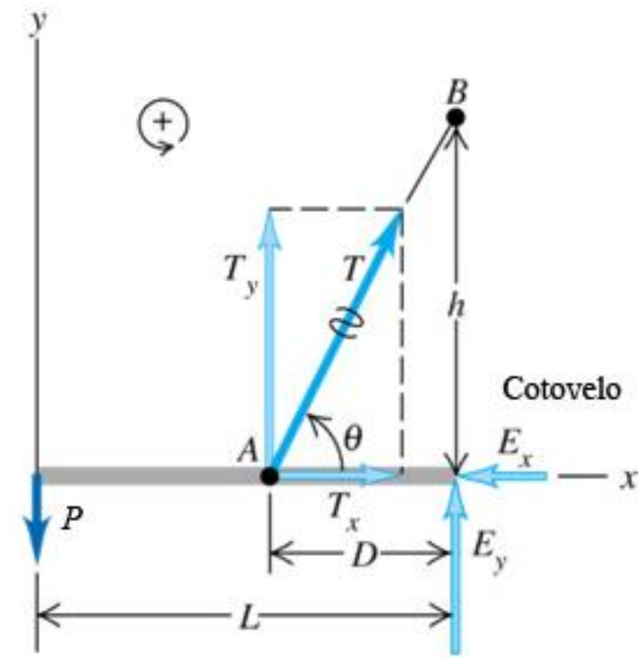
# Exemplo: Tobias engordou!




Tobias agora tem massa $m$ = 60 kg. Ele conseguiria manter o equilíbrio ficando em pé a uma distância maior do que a extremidade direita da prancha e o cavalete do lado direito?

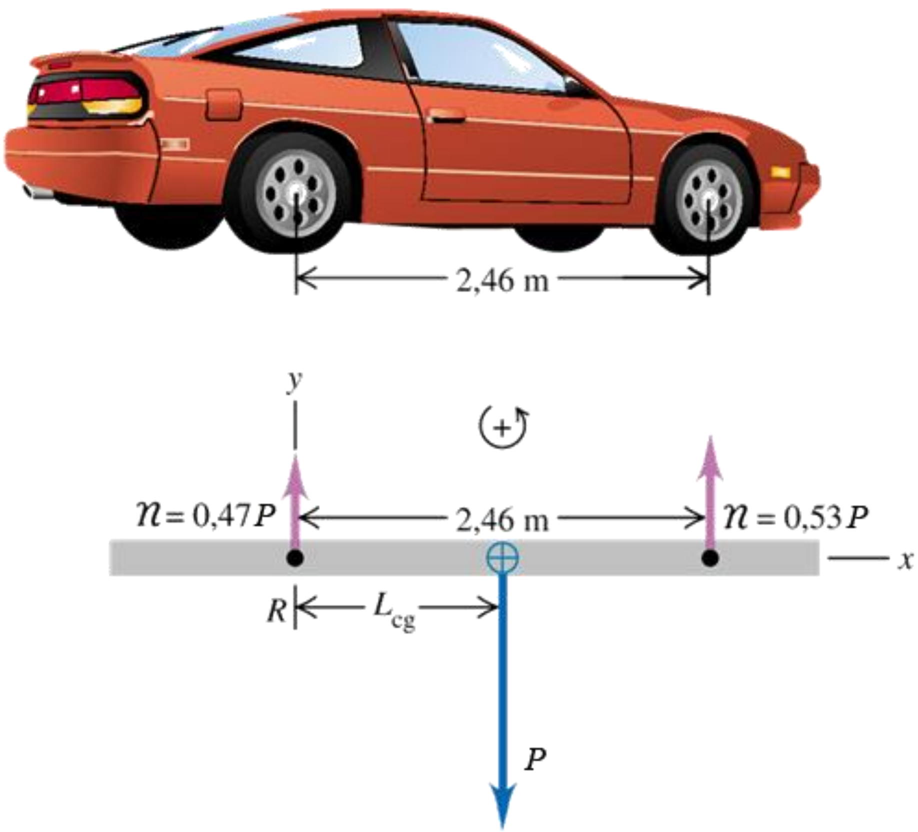
# Exemplo: equilíbrio e ação de bombear



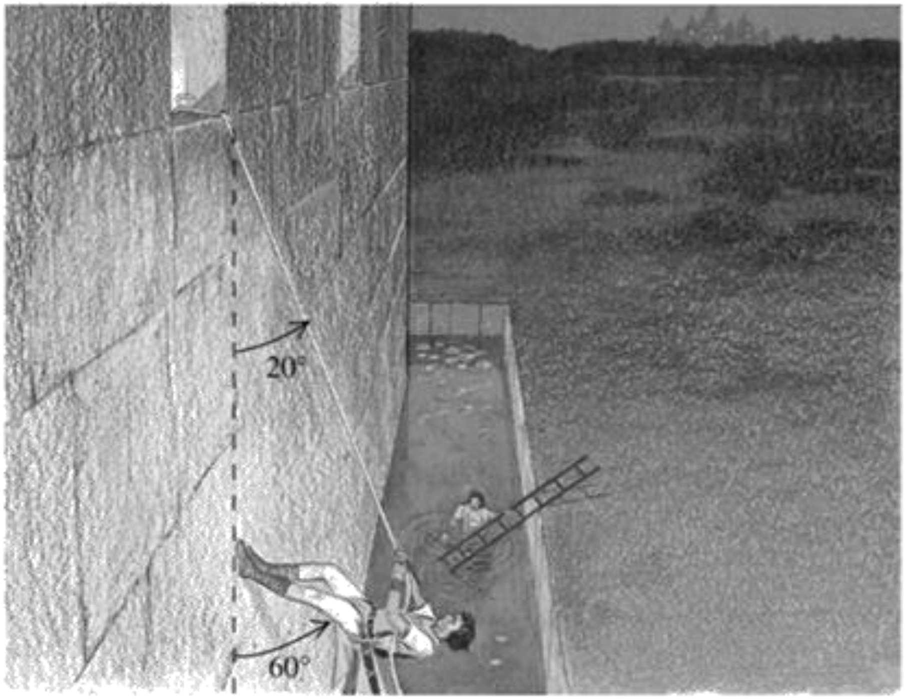

Qual a tensão no tendão e os dois componentes da força no cotovelo (um total de três incógnitas escalares). Desprezar o peso do antebraço em si.

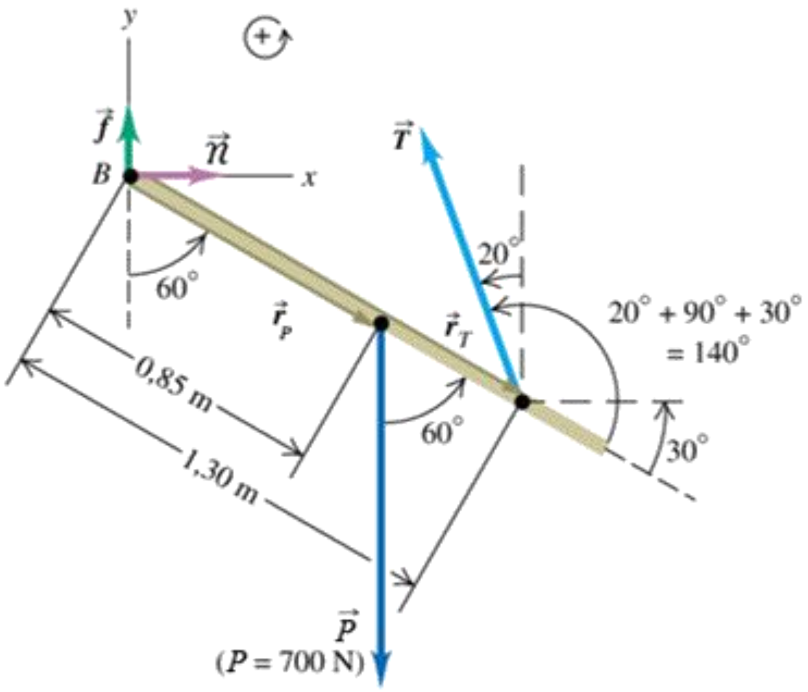
# Exemplo: distribuição do peso de um carro




Qual é a distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade do carro?

# Exemplo: outra tentativa de resgate



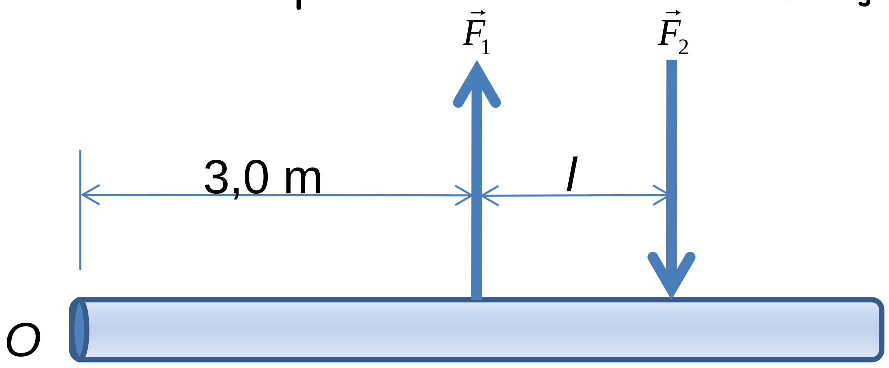

Encontre a tensão na corda e as forças exercidas em seus pés pela região da parede livre de lodo.

# Exemplo: Cachorro

Um cachorro tem 0,74 m de comprimento (do nariz até as patas traseiras). Suas patas dianteiras estão a 0,15 m de seu nariz, seu centro de gravidade está a 0,20 m horizontalmente a suas patas traseiras e ele pesa 140 N. (a) Quanta força o solo exerce em cada uma das patas dianteiras e traseiras do cachorro? (b) Se o cachorro pega um osso de 25 N e o segura em sua boca (diretamente abaixo de seu nariz), qual é a força exercida pelo chão em cada uma de suas patas dianteiras e traseiras?

# Exemplo: Um *binário*

Denomina-se conjugado ou *binário* duas forças de mesmo módulo, mesma direção e sentidos contrários aplicadas a dois pontos diferentes de um corpo. Duas forças antiparalelas de mesmo módulo $F_1 = F_2 = 8{,}0$ N são aplicadas sobre um eixo conforme a figura abaixo. (a) Qual deve ser a distância $l$ entre as forças sabendo-se que elas devem produzir um torque efetivo de 6,40 N·m em torno da extremidade esquerda do eixo? (b) O sentido do torque é igual ou contrário ao sentido de rotação dos ponteiros do relógio? (c) Repita os itens (a) e (b) considerando um pivô situado no ponto do eixo onde a força $\vec{F}_2$ é aplicada.



# Bibliografia

Serway, R. A.; Jewett Jr., J. W. *Princípios de Física - Mecânica Clássica*, Vol. 1, cap. 10, Cengage Learning, 2004.

Young, H. D.; Freedman, R. A. *Sears & Zemansky, Física I - Mecânica*, vol. 1, cap. 8, Pearson Education do Brasil, 2008.