Versão preliminar
7 de setembro de 2002

Notas de Aula de Física

05. Leis de Newton

No nosso dia a dia encontramos objetos que se movem e outros que permanecem em repouso. À primeira vista, parece que um corpo está em repouso quando não existem forças atuando nele, e inicia o movimento quando uma força começa a atuar sobre si.

No desenrolar deste capítulo vamos ver o quanto essas aparências se aproximam ou se afastam da realidade.

Onde estão as forças?

Gravidade

As coisas caem porque são atraídas pela Terra. Há uma força que puxa cada objeto para baixo e que também é responsável por manter a atmosfera sobre a Terra e também por deixar a Lua e os satélites artificiais em órbita. É a chamada força gravitacional. Essa força representa uma interação existente entre a Terra e os objetos que estão sobre ela.

Sustentação

Para que as coisas não caiam é preciso segurá-las. Para levar a prancha o garotão faz força para cima. Da mesma forma, a cadeira sustenta a moça, enquanto ela toma sol. Em cada um desses casos, há duas forças opostas: a força da gravidade, que puxa a moça e a prancha para baixo, e uma força para cima, de sustentação, que a mão do surfista faz na prancha e a cadeira faz na moça. Em geral, ela é conhecida como força normal.

Na água

A água também pode sustentar coisas, impedindo que elas afundem. Essa interação da água com os objetos se dá no sentido oposto ao da gravidade e é medida através de uma força que chamamos de empuxo hidrostático. É por isso que nos sentimos mais leves quando estamos dentro da água. O que sustenta balões no ar também é uma força de empuxo, igual à que observamos na água.

No ar

Para se segurar no ar o pássaro bate asas e consegue com que o ar exerça uma força para cima, suficientemente grande para vencer a força da gravidade. Da mesma forma, o movimento dos aviões e o formato especial de suas asas acaba por criar uma força de sustentação. Essas forças também podem ser chamadas de empuxo. Porém, trata-se de um empuxo dinâmico, ou seja, que depende de um movimento para existir. As forças de empuxo estático que observamos na água ou no caso de balões, não dependem de um movimento para surgir.

As formas pelas quais os objetos interagem uns com os outros são muito variadas. A interação das asas de um pássaro com o ar, que permite o vôo, por exemplo, é diferente da interação entre uma raquete e uma bolinha de pingue-pongue, da interação entre uma lixa e uma parede ou entre um ímã e um alfinete.

Isaac Newton, o famoso físico inglês do século XVIII, conseguiu elaborar leis que permitem lidar com toda essa variedade, descrevendo essas interações como forças que agem entre os objetos. Cada interação representa uma força diferente, que depende das *diferentes condições em que os objetos interagem. Mas todas obedecem aos mesmos princípios elaborados por Newton, e que ficaram conhecidos como Leis de Newton.*

Leituras de Física - MECÂNICA - Capítulo 12
GREF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física
Instituto de Física da USP - junho de 1998

Primeira Lei de Newton

Antes da época de Galileu a maioria dos filósofos pensava que fosse necessária alguma influência ou força para manter um corpo em movimento. Supunham que um corpo em repouso estivesse em seu estado natural. Acreditavam que para um corpo mover-se em linha reta com velocidade constante fosse necessário algum agente externo empurrando-o continuamente, caso contrário ele iria parar.

Foi difícil provar o contrário dada a necessidade de livrar o corpo de certas influências, como o atrito. Estudando o movimento de corpos em superfícies cada vez mais planas e lisas, Galileu afirmou ser necessária uma força para modificar a velocidade de um corpo mas nenhuma força é exigida para manter essa velocidade constante.

Newton enunciou que: *"Um corpo tende a permanecer em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme, quando a resultante das forças que atuam sobre si for nula".*

Sejam $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ as forças que atuam num corpo. A resultante das forças $\vec{F}$ será a soma vetorial das forças que atuam nesse corpo:

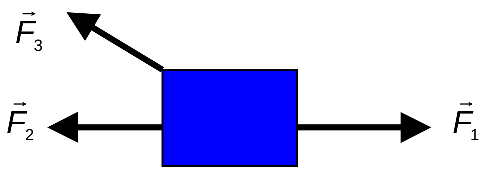
$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F} = 0$$

Quando a resultante for nula o corpo permanecerá em repouso ou se deslocará com movimento retilíneo e uniforme.

Segunda Lei de Newton

Newton enunciou que: *"A resultante das forças que atuam sobre um corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração com a qual ele irá se movimentar".*

Sejam $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_3$ as forças que atuam sobre um corpo de massa m . A resultante das forças $\vec{F}$ será a soma vetorial das forças que atuam nesse corpo, logo:



$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = \vec{F} = m\vec{a}$$

Terceira Lei de Newton

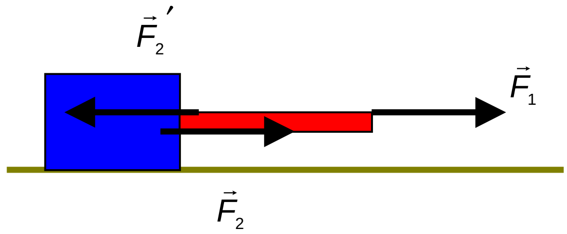
Uma força é apenas um aspecto da interação mútua entre dois corpos. Verifica-se experimentalmente que quando um corpo exerce uma força sobre outro, o segundo sempre exerce uma força no primeiro.

Newton enunciou que: *"Quando um corpo exerce uma força num segundo corpo, este último reagirá sobre o primeiro com uma força de mesma intensidade e sentido contrário".*

Vamos considerar um corpo sobre uma superfície horizontal plana e lisa, e preso a esse corpo está uma vareta rígida.

Uma força $\vec{F}_1$ é aplicada na vareta, essa força se transmite até o corpo de modo que a vareta exerce uma força $\vec{F}_2$ sobre o corpo e esse corpo reage à ação da vareta exercendo sobre ela uma força $\vec{F}_2'$ com mesmo módulo que $\vec{F}_2$ mas com sentido contrário.

$\vec{F}_2$ e $\vec{F}_2'$ são forças de ação e reação.



Aplicações das Leis de Newton

Exemplo 5-6 Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição

A figura ao lado mostra um bloco (o bloco deslizante) de massa $M = 3,3kg$. Ele se move livremente sem atrito, sobre uma fina camada de ar na superfície horizontal de uma mesa.

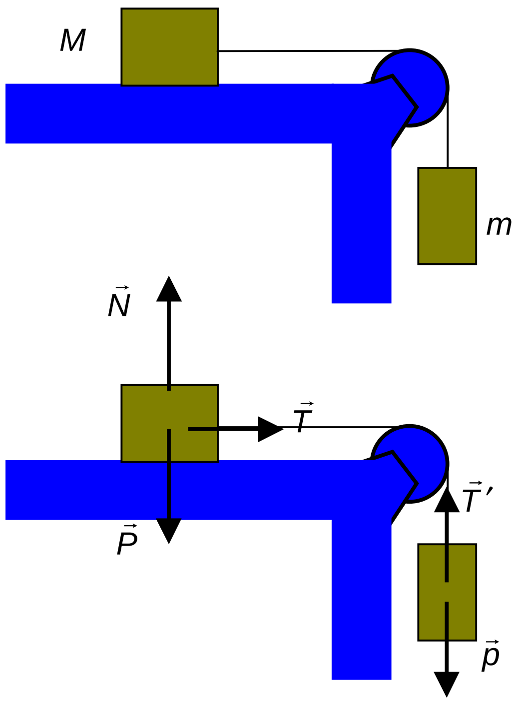
O bloco deslizante está preso a uma corda que passa em volta de uma polia de massa e atritos desprezíveis e tem, na outra extremidade, um segundo bloco (o bloco suspenso) de massa $m = 2,1kg.$

O bloco suspenso, ao cair, acelera o bloco deslizante para a direita.

Determine:

a) A aceleração do bloco deslizante.

Usando a segunda Lei de Newton, para cada um dos corpos, teremos



para o corpo deslizante:

$$\vec{N} + \vec{T} + \vec{P} = M\vec{A}$$

e para o corpo suspenso:

$$\vec{T}' + \vec{p} = m\vec{a}$$

Como os dois blocos estão presos por uma corda suposta inextensível e de massa desprezível, eles terão (em módulo) as mesmas velocidades e acelerações.

$$A = a$$

Além disso, a tensão se transmitirá integralmente através da corda:

$$T = T'$$

Para o corpo deslizante a Lei de Newton toma a forma escalar:

$$N - P = 0$$

$$T = Ma$$

e para o segundo corpo:

$$p - T = ma$$

Somando as duas últimas equações, encontramos:

$$p = mg = (M + m)\, a$$

ou seja:

$$a = \left(\frac{m}{m + M}\right) g = 3{,}81 m/s^2$$

b) A aceleração do bloco suspenso

Como já foi mencionado, os dois bloco têm a mesma aceleração, em módulo:

$$a = \left(\frac{m}{m + M}\right) g = 3{,}81 m/s^2$$

c) A tensão na corda

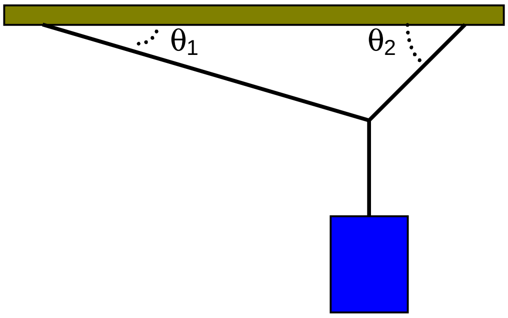
Foi mostrado que:

$$T = Ma$$

logo:

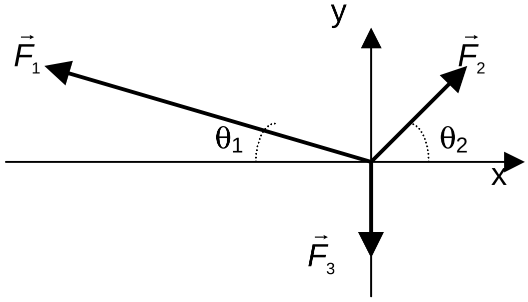
$$T = \left(\frac{mM}{m + M}\right) g = 12{,}57 N$$

Exemplo 5-8 Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição



A figura ao lado mostra um bloco de massa m = 15kg suspenso por três cordas. Quais as tensões nas cordas?

$\theta_1 = 28^0$
$\theta_2 = 47^0$



O peso P do bloco é transmitido pela corda para o nó, de modo que $F_3 = P$.

Como o nó está em repouso, a resultante das forças que atuam nele é nula.
Como a resultante é nula, obviamente a soma das componentes vertical e horizontal das forças também será nula.

$$F_1 \operatorname{sen}\theta_1 + F_2 \operatorname{sen}\theta_2 - F_3 = 0$$

$$- F_1 \cos\theta_1 + F_2 \cos\theta_2 = 0$$

Da última equação temos:

$$F_2 = F_1 \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}$$

e usando este resultado na primeira, temos:

$$F_3 = F_1\left[\operatorname{sen}\theta_1 + \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2}\operatorname{sen}\theta_2\right] = F_1\left[\frac{\operatorname{sen}\theta_1\cos\theta_2 + \cos\theta_1\operatorname{sen}\theta_2}{\cos\theta_2}\right] = F_1\frac{\operatorname{sen}(\theta_1+\theta_2)}{\cos\theta_2}$$

ou seja:

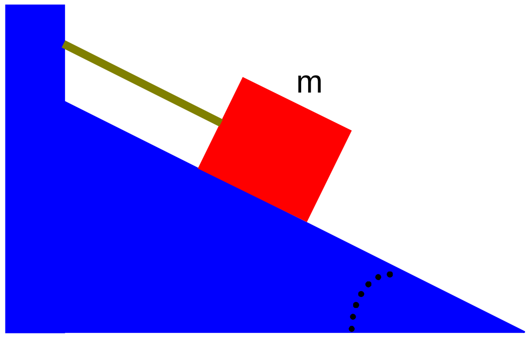
$$F_1 = F_3\frac{\cos\theta_2}{\operatorname{sen}(\theta_1+\theta_2)} = 103{,}79N$$

e

$$F_2 = F_3\frac{\cos\theta_1}{\operatorname{sen}(\theta_1+\theta_2)} = 134{,}37N$$

Exemplo 5-9 Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4^a. edição

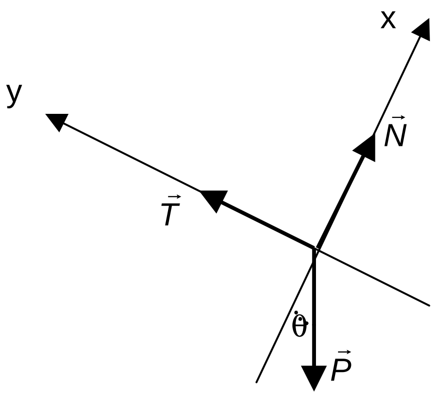
A figura ao lado mostra um bloco de massa $m = 15kg$ seguro por uma corda, sobre um plano inclinado sem atrito.



Se $\theta = 27^0$, qual a tensão na corda?

Qual força é exercida pelo plano sobre o bloco?

$$\vec{N} + \vec{P} + \vec{T} = 0$$



$$N - P\cos\theta = 0$$
$$T - P\,sen\theta = 0$$

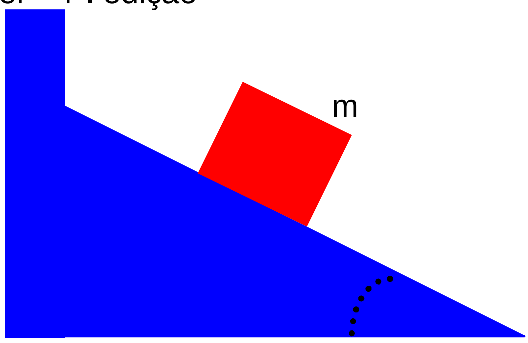
A força exercida pelo plano sobre o bloco é a força normal N :

$$T = P\,sen\theta = 9{,}8\ .\ 15\ .\ sen27^0$$
$$T = 66{,}73Newtons$$

$$N = P\cos\theta = 9{,}8\ .\ 15\ .\ \cos27^0$$
$$N = 130{,}97Newtons$$

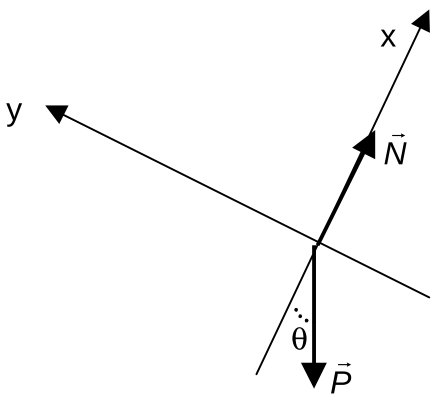
Exemplo 5-10 Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4^a. edição

A figura ao lado mostra um bloco de massa $m = 15kg$, sobre um plano inclinado sem atrito.



Se $\theta = 27^0$, qual a aceleração do bloco?

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}$$



$$P\,sen\theta = ma$$
$$N - P\cos\theta = 0$$

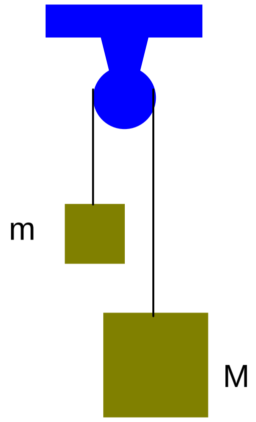
logo:

$$a = g\,sen\theta$$

$$a = 9{,}8\ .\ sen27^0$$

$$a = 4{,}45m/s^2$$

Exemplo 5-11 Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição



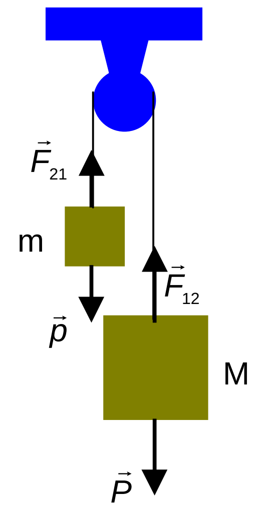
A figura ao lado mostra dois blocos ligados por uma corda, que passa por uma polia de massa e atritos desprezíveis. Fazendo $m = 1,3kg$ e $M = 2,8kg$, determine a tensão na corda e o módulo da aceleração (simultânea) dos dois blocos.

Para o corpo da esquerda, temos a equação:

$$\vec{F}_{21} + \vec{p} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad F_{21} - p = m\,a$$

e para o corpo da direita:

$$\vec{F}_{12} + \vec{P} = M\vec{A} \quad \Rightarrow \quad P - F_{12} = MA$$



A corda é considerada inextensível portanto os corpos terão a mesma aceleração (em módulo).

$$a = A$$

A corda também é considerada de massa desprezível, logo:

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

As equações terão a forma:

$$F - p = ma$$

$$P - F = Ma$$

Somando as equações:

$$P - p = (M + m)\ a$$

Como $p = mg$ e $P = Mg$

$$a = \left(\frac{M - m}{M + m}\right)g = 3,41 m/s^2$$

De uma equação anterior, temos:

$$F = p + ma \quad logo \quad F = mg + m\left(\frac{M - m}{M + m}\right)g = mg\left[\frac{(M + m) + (M - m)}{M + m}\right]$$

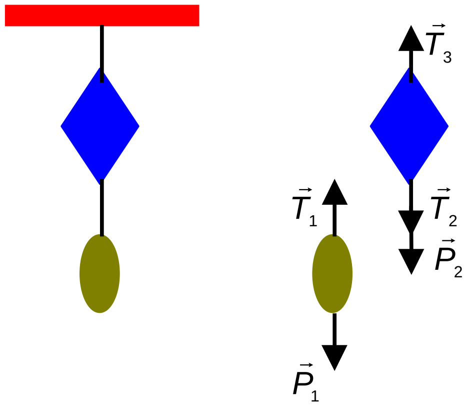
$$F = \left(\frac{2mM}{M + m}\right)g = 16,59N$$

Solução de alguns problemas

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
16	Um móbile grosseiro pende de um teto com duas peças metálicas presas por uma corda de massa desprezível, conforme a figura. São dada as massas das peças.

a) Qual a tensão na corda inferior?

$m_1 = 3,5kg$
$m_2 = 4,5kg$



Como o móbile está em repouso, é nula a resultante das forças que atuam em cada parte dele. Considerando a parte inferior do móbile, teremos:

$$\vec{T}_1 + \vec{P}_1 = 0$$

ou seja:

$$T_1 - P_1 = 0 \quad \therefore \quad T_1 = P_1 = m_1\, g$$

$$T_1 = 34,3N$$

b) Qual a tensão na corda superior?

Considerando a parte superior do móbile:

$$\vec{T}_3 + \vec{P}_2 + \vec{T}_2 = 0$$

ou seja:

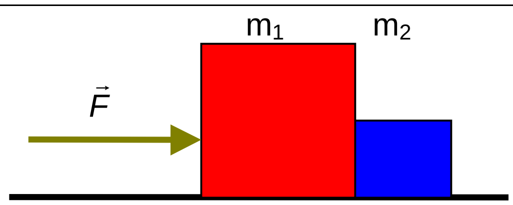
$$T_3 - P_2 - T_2 = 0 \quad \therefore \quad T_3 = P_2 + T_2$$

mas $T_2 = T_1 = P_1$

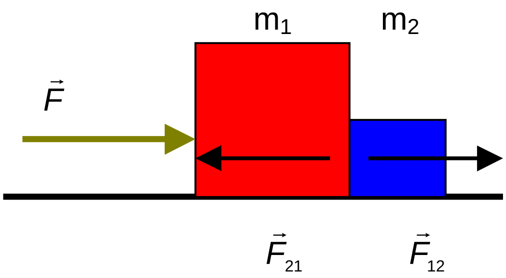
$$T_3 = P_1 + P_2 = (m_1 + m_2)g$$

$$T_3 = 78,4N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
40	Dois blocos estão em contato sobre uma mesa sem atrito. Uma força horizontal é aplicada a um dos blocos como mostrado na figura ao lado.



a) Se $m_1 = 2,3kg$, $m_2 = 1,2kg$ e $F = 3,2N$, determine a força de contato entre os dois blocos.



Os blocos 1 e 2 movem-se como um conjunto com aceleração a e a resultante das forças que atuam nesse conjunto é a força externa F, que obedece à equação:

$$\vec{F} = (m_1 + m_2)\vec{a}$$

No entanto, podemos analisar os corpos como se cada fosse uma entidade independente. Ambos estão se movendo com aceleração a, logo:

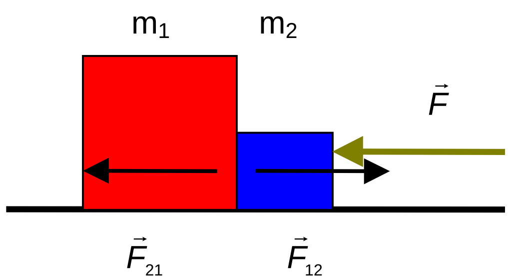
$$\begin{cases} \vec{F}_{12} = m_2\vec{a} & \Rightarrow \quad F_{12} = m_2 a \\ \vec{F} + \vec{F}_{21} = m_1\vec{a} & \Rightarrow \quad F - F_{21} = m_1 a \end{cases}$$

As forças $\vec{F}_{21}$ e $\vec{F}_{12}$ são ação e reação, logo $\vec{F}_{21}$ = - $\vec{F}_{12}$, ou ainda: $F_{12} = F_{21}$. Temos então que:

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2} = 0{,}91m/s^2 \text{ , logo } \quad F_{12} = m_2\left(\frac{F}{m_1 + m_2}\right) = 1{,}09N$$

b) Mostre que se a mesma força F for aplicada em m_2 ao invés de m_1, a força de contato é 2,1N, que não é o mesmo valor obtido em (a). Explique a diferença.

Neste caso temos:



$$\begin{cases} \vec{F}_{21} = m_1\vec{a} & \Rightarrow \quad F_{21} = m_1 a \\ \vec{F} + \vec{F}_{12} = m_2\vec{a} & \Rightarrow \quad F - F_{12} = m_2 a \end{cases}$$

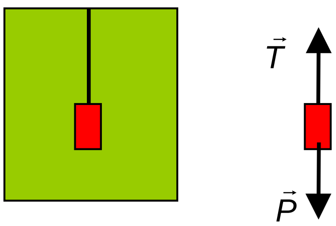
Encontramos que:

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2} = 0{,}91m/s^2 \text{ , logo } \quad F_{21} = m_1\left(\frac{F}{m_1 + m_2}\right) = 2{,}10N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
45	Um objeto está pendurado numa balança de mola presa a um teto de um elevador. A balança marca $65N$, quando o elevador ainda está parado.

a) Qual a indicação na balança, quando o elevador estiver subindo com uma velocidade constante de $7{,}6m/s$?

Vamos considerar T a indicação da balança, e esse é o valor da força vertical que suspende o objeto. Temos então duas forças atuando no objeto: o seu peso e a tensão T. Quando o elevador estiver em repouso ou com velocidade constante, a resultante das forças será nula.



Nessa situação, a balança apresentará uma leitura T_1 , que é a mesma de quando o elevador estava parado, e as forças que atuam no objeto devem satisfazer à equação:

$$\vec{T}_1 + \vec{P} = 0 \quad \therefore \quad T_1 - P = 0 \quad \Rightarrow \quad P = T_1 = 65N$$

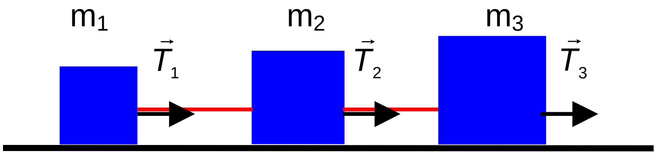
b) Qual a indicação na balança quando o elevador, subindo com uma velocidade de 7,6m/s , for desacelerado à razão de $2,4m/s^2$?

Neste caso, o objeto está acelerado, e portanto a equação tem a forma:

$$\vec{T}_2 + \vec{P} = m\vec{a} \quad \therefore \quad P - T_2 = ma \quad \Rightarrow \quad T_2 = P - ma$$

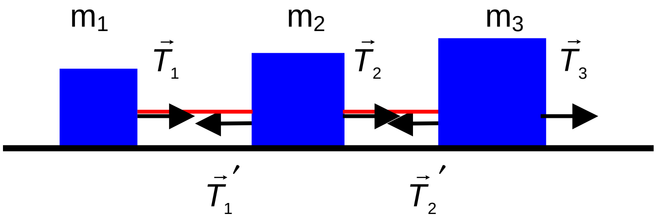
$$T_2 = P\left(1 - \frac{a}{g}\right) = 49N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
49	Três blocos estão conectados, como na figura ao lado, sobre uma mesa horizontal sem atrito, e puxados para a direita com uma força $T_3=65N$. Se $m_1=12kg$, $m_2=24kg$ e $m_3=31kg$, calcule:



a) A aceleração do sistema.

As forças horizontais que atuam nos corpos estão mostradas no desenho ao lado.
Como as cordas de conexão entre os blocos têm massas desprezíveis $T_1 = T_1'$ e $T_2 = T_2'$.



A resultante de forças que atua neste conjunto é T_3 , logo:

$$\vec{T}_3 = (m_1 + m_2 + m_3)\vec{a} \quad \text{ou seja} \quad a = \frac{T_3}{m_1 + m_2 + m_3} = 0,97m/s^2$$

b) As tensões T_2 e T_3 .

Para o corpo de massa m_1 temos:

$$T_1 = m_1 a = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3}\right) T_3 = 11,64N$$

Para o corpo de massa m_2 temos:

$$\vec{T}_2 + \vec{T}_1' = m_2\vec{a} \quad \Rightarrow \quad T_2 - T_1 = m_2\, a \quad \therefore \quad T_2 = T_1 + m_2\, a$$

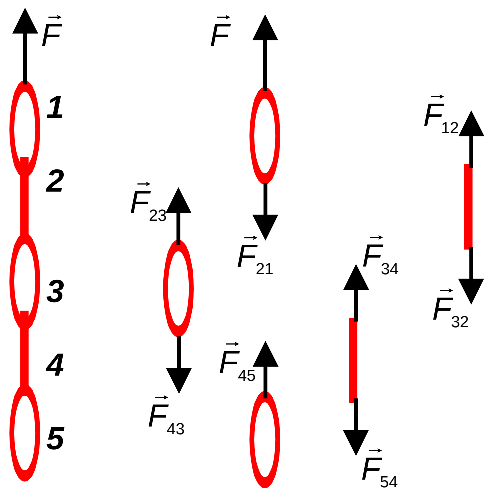
$$T_2 = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \right) T_3 + m_2 \left(\frac{T_3}{m_1 + m_2 + m_3} \right)$$

$$T_2 = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + m_3} \right) T_3 = 34,92N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
57	Uma corrente formada por cinco elos, com massa de *0,100kg* cada um, é levantada verticalmente com aceleração constante de $2,5m/s^2$, conforme a figura. Determine:

a) As forças que atuam entre os elos adjacentes.

No diagrama das forças que atuam na corrente não colocamos os pesos de cada elo.
Vamos analisar a equação que relaciona as forças atuantes em cada elo:



Elo 5:

$F_{45} - p = ma \quad \therefore \quad F_{45} = m(g+a) = 1,23N$

Elo 4:

$F_{34} - F_{54} - p = ma$,

mas $F_{54} = F_{45}$, logo:

$F_{34} = F_{45} + m(g+a) = 2m(g+a) = 2,46N$

Elo 3:

$F_{23} - F_{43} - p = ma$, *mas* $F_{43} = F_{34}$, logo:

$F_{23} = F_{34} + m(g+a) = 3m(g+a) = 3,69N$

Elo 2:

$F_{12} - F_{32} - p = ma$, *mas* $F_{32} = F_{23}$, logo:

$F_{12} = F_{23} + m(g+a) = 4m(g+a) = 4,92N$

b) A força $\vec{F}$ exercida sobre o elo superior pela pessoa que levanta a corrente.
Elo 1:

$F - F_{21} - p = ma$, *mas* $F_{21} = F_{12}$, *logo:*

$F = F_{12} + m(g+a) = 5m(g+a) = 6,15N$

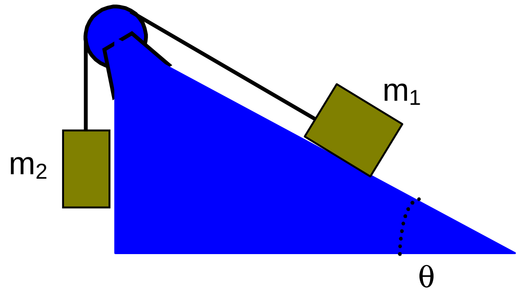
c) A força resultante que acelera cada elo.

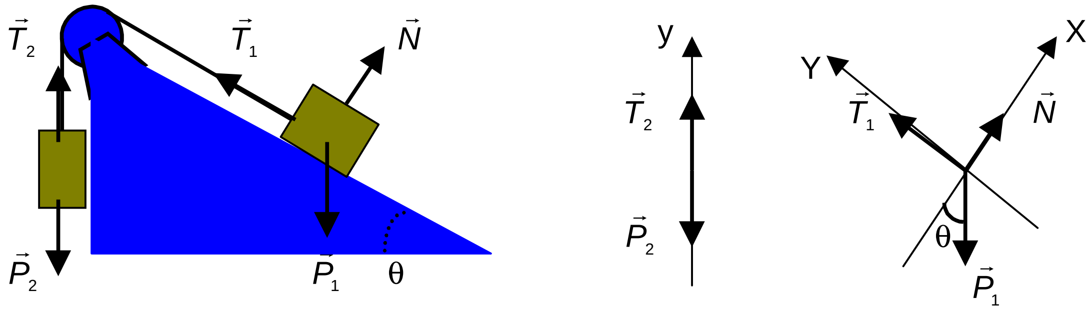
A força resultante sobre cada elo é igual a *ma = 0,25N*

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição

58 Um bloco de massa $m_1 = 3,70kg$ está sobre um plano com 30^0 de inclinação, sem atrito, preso por uma corda que passa por uma polia, de massa e atrito desprezíveis, e tem na outra extremidade um outro bloco de massa $m_2 = 2,30kg$, pendurado verticalmente, como mostra a figura. Quais são:

a) Os módulos das acelerações de cada bloco?





Aplicando a segunda Lei de Newton para os dois corpos, teremos:

$$\begin{cases} \vec{T}_1 + \vec{P}_1 + \vec{N} = m_1 \vec{a}_1 \\ \vec{T}_2 + \vec{P}_2 = m_2 \vec{a}_2 \end{cases}$$

Como os dois blocos estão conectados por uma corda inextensível, quando um deles se deslocar de uma distância Δs num intervalo de tempo Δt o outro se deslocará da mesma distância no mesmo intervalo de tempo, logo as suas acelerações serão as mesmas, em módulo. Ou seja:

$$a_1 = a_2 = a$$

Como a corda tem massa desprezível, podemos mostrar que as tensões são iguais, ou seja:

$$T_1 = T_2 = T$$

Vamos supor que o bloco de massa m_2 irá descer. Caso essa suposição não seja verdadeira a aceleração terá o sinal negativo. Para o primeiro bloco, temos as seguintes equações:

$$N - P_1 \cos\theta = 0$$

$$T - P_1 \,sen\theta = m_1 a$$

e para o segundo:

$$P_2 - T = m_2\, a$$

Somando as duas últimas equações, encontramos:

$$P_2 - P_1\, sen\theta = (m_1 + m_2)\, a$$

ou seja:

$$a = \left(\frac{m_2 - m_1 \,\mathrm{sen}\,\theta}{m_2 + m_1}\right) g = 0{,}735 m/s^2$$

b) O sentido da aceleração de m_2 ?

Enquanto $m_2 - m_1\, sen\theta > 0$ nós teremos o corpo de massa m_2 descendo, e quando a desigualdade for contrária ele subirá. Se tivermos uma igualdade, os dois corpos estarão em equilíbrio.

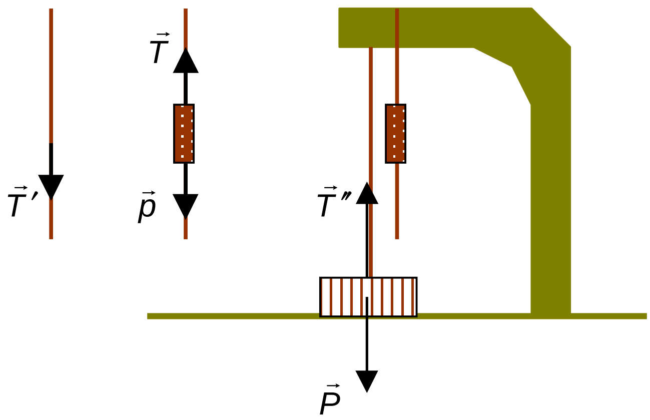
c) Qual a tensão na corda?

$$T = P_2 - m_2 a = m_2 g - m_2\left(\frac{m_2 - m_1 \,\mathrm{sen}\,\theta}{m_2 + m_1}\right) g$$

$$T = \left[\frac{m_1 m_2 (1 + \mathrm{sen}\,\theta)}{m_1 + m_2}\right] g = 20{,}84 N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
63	Um macaco de $10kg$ sobe por uma corda de massa desprezível, que passa sobre o galho de uma árvore, sem atrito, e tem presa na outra extremidade uma caixa de $15kg$ que está no solo.

a) Qual o módulo da aceleração mínima que o macaco deve ter para levantar a caixa do solo?



$\vec{T}'$ é a força que o macaco faz na corda.

$\vec{T}$ e $\vec{T}'$ são ação e reação.

Aplicando a segunda Lei de Newton para o macaco:

$$\vec{T} + \vec{p} = m\vec{a} \quad \therefore \quad T - p = ma \quad \therefore \quad T = mg + ma$$

A aceleração mínima a_M que o macaco deverá subir pela corda será aquela tal que T'' é apenas igual ao peso do corpo P que está no chão, deixando-o com resultante nula. Desse modo:

$$T = P = mg + ma_M \quad \therefore \quad ma_M = Mg - mg$$

$$a_M = \left(\frac{M-m}{m}\right)g = 4{,}9m/s^2$$

b) Se, após levantar a caixa, o macaco parar de subir e ficar agarrado à corda, qual será a sua aceleração?

Neste caso teremos uma máquina de Atwood, como já foi mostrado anteriormente, e o macaco subirá acelerado enquanto o corpo descerá. A aceleração de cada um será:

$$a = \left(\frac{M-m}{M+m}\right)g = 1{,}96m/s^2 \quad ; \quad a < a_M$$

c) Qual será a tensão na corda?

$$\vec{T} + \vec{p} = m\vec{a} \quad \therefore \quad T - mg = ma$$

$$T = mg + m\left(\frac{M-m}{M+m}\right)g = mg\left(1 + \frac{M-m}{M+m}\right)$$

$$T = \left(\frac{2mM}{m+M}\right)g = 117{,}6N$$

Capítulo 5 - Halliday, Resnick e Walker - 4ª. edição	
70	Um balão de massa M, com ar quente, está descendo verticalmente com uma aceleração a para baixo. Que quantidade de massa deve ser atirada para fora do balão, para que ele suba com uma aceleração a (mesmo módulo e sentido oposto) ? Suponha que a força de subida devido ao ar (empuxo) não varie em função da massa (carga de estabilização) que ele perdeu.

A equação de movimento do balão **antes** que ele atire fora uma massa m , será:

$$\vec{E} + M\vec{g} = m\vec{a}$$

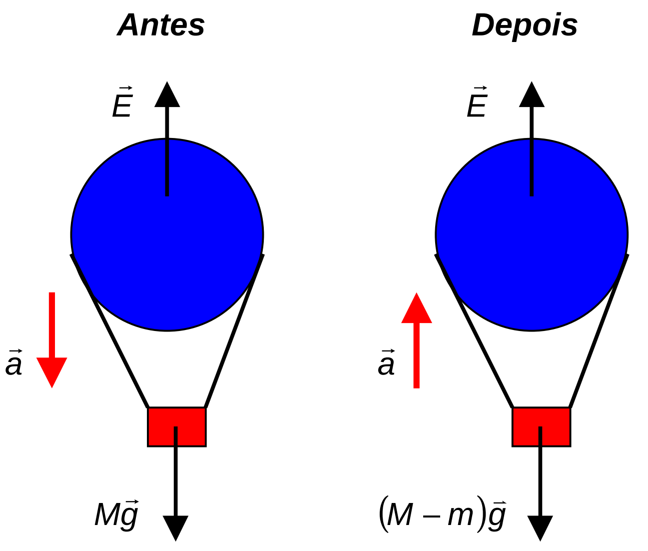
ou seja:

$$M\,g - E = M\,a$$

$$E = M\,(\,g - a\,)$$

A equação depois de atirar, será:

$$\vec{E} + (M-m)\vec{g} = (M-m)\vec{a}$$



ou seja:

$$E - (M - m) g = (M - m) a$$

$$E = (M - m) (g + a)$$

Temos então que:

$$E = M (g - a) = (M - m) (g + a)$$

De onde encontramos que:

$$m = \left(\frac{2a}{g + a} \right) M$$