



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Instituto de Física

Departamento de Física da Terra e do Meio Ambiente

DFTMA/IF/UFBA



Física Geral Teórica I - FISD36

NOTAS DE AULAS: MÓDULO III

ALANNA DUTRA, EDVALDO SUZARTHE

E REYNAM PESTANA

02 DE OUTUBRO DE 2020

SALVADOR, BAHIA, BRASIL

Índice

Índice	3
Índice de Tabelas	5
Índice de Figuras	7
1 Dinâmica de uma partícula	9
1.1 Leis de Newton	10
1.1.1 Primeira lei de Newton	10
1.1.2 Segunda lei de Newton	11
1.1.3 Terceira lei de Newton	12
1.2 Leis de força	14
1.2.1 Força gravitacional	14
1.2.2 Força normal	14
1.2.3 Força de tração	15
1.2.4 Força elástica	15
1.2.5 Forças de atrito	17
1.3 Leis de Newton e movimento circular uniforme	21
1.4 Exercícios Resolvidos	23
1.5 Resumo	31
Referências Bibliográficas	33

Índice de Tabelas

1.1	Unidades da Segunda Lei de Newton	12
1.2	Coefficientes de Atrito	19

Índice de Figuras

1.1	Um rebocador deslocando um navio cargueiro (Serway, 2018).	9
1.2	Alguns exemplos de forças aplicadas: (a)-(c) forças de contato, (d) força gravitacional, (e) força elétrica e (f) força magnética (Serway,2018).	10
1.3	Um corredor experimenta a terceira lei de Newton. (a) Uma força é exercida pelo corredor sobre o solo. (b) A força de reação do solo sobre o corredor o empurra para frente (Ling, 2018).	13
1.4	Exemplos da terceira lei de Newton. (a) A balança e o pacote exercem forças de contato ação-reação sobre o outro. (b) O pacote e a Terra exercem forças gravitacionais um sobre o outro (Ling, 2018).	13
1.5	Um livro em repouso sobre uma mesa e diagrama de corpo.	14
1.6	(a) Uma corda esticada está sob tensão. Se sua massa é desprezível a corda puxa o corpo e sua mão com uma força \vec{T} , mesmo que a corda passe por uma polia sem massa e sem atrito, como em (b) e (c) (Halliday, 2009).	15
1.7	Sistema de amortecimento de um carro.	15
1.8	A força exercida por uma mola sobre um bloco varia com a posição x do bloco em relação à posição de equilíbrio $x = 0$. (a) x é positivo. (b) x é zero e (c) x é negativo. (d) Gráfico de F_M por x para o sistema bloco-mola (Figura modificada (Serway, 2018)).	16
1.9	As forças que agem sobre um bloco: (a) um bloco estacionário.; (b-d) Uma força externa \vec{F} , aplicada ao bloco, é equilibrada por uma força de atrito estático \vec{f}_s . Quando aumenta, \vec{f}_s também aumenta, até atingir um valor máximo (Halliday, 2010).	17
1.10	As forças que agem sobre um bloco: (a) Quando \vec{f}_s atinge o valor máximo, o bloco movimenta-se e acelera bruscamente na direção de \vec{F} . (b) Para que o bloco se mova com velocidade constante, é preciso reduzir o valor de \vec{F} . (c) Alguns resultados experimentais para a e b (Halliday, 2010).	18
1.11	Mecanismo responsável pela força de atrito cinético. (a) A placa de cima está deslizando para a direita em relação à placa de baixo. (b) Nesta vista ampliada são mostrados dois pontos onde ocorreu soldagem a frio. É necessária uma força para romper as soldas e manter o movimento (Halliday, 2010).	20
1.12	Pêndulo cônico	21
1.13	Pista curvilínea	22

1

Dinâmica de uma partícula

No módulo 2, descrevemos o movimento de uma partícula usando os vetores posição, velocidade e aceleração, mas uma discussão sobre o que causa o movimento de uma partícula não foi realizada. Neste módulo, vamos apresentar de forma objetiva as razões pelas quais as partícula se movem segundo determinadas maneiras. Iremos entender, como um rebocador consegue mover um navio tão grande (navio cargueiro), como ilustrado na Figura 1.1.



Figura 1.1: Um rebocador deslocando um navio cargueiro (Serway, 2018).

Iniciamos o nosso estudo descrevendo brevemente o conceito de *força*. Em nosso cotidiano lembramos muito da palavra *força*, na hora que temos que carregar, empurrar ou transportar algum objeto que possui grande valor de massa. Contudo, no mundo em que vivemos não existe apenas forças de contato, como mencionado. Existem *forças* que atuam à distância, ou seja não existe a necessidade do contato físico para atuarem e como exemplo temos as forças gravitacional e a eletromagnética (ver Figura 1.2). Em poucas palavras podemos dizer que termo *força* em Física se refere a interação de um corpo com sua vizinhança.

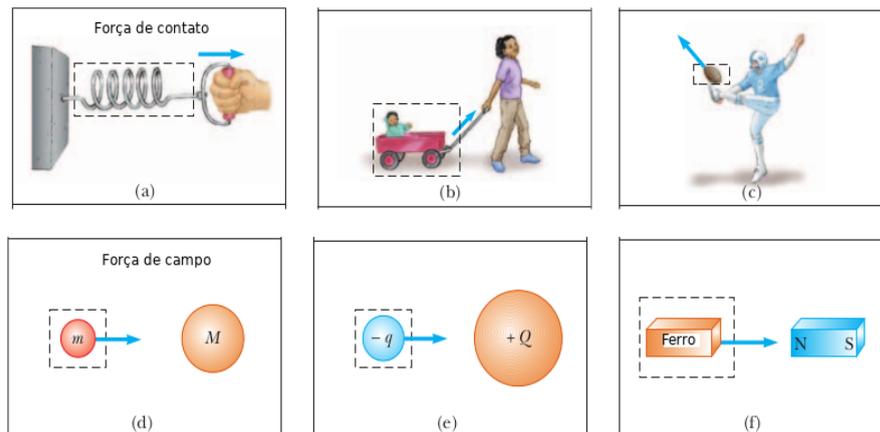


Figura 1.2: Alguns exemplos de forças aplicadas: (a)-(c) forças de contato, (d) força gravitacional, (e) força elétrica e (f) força magnética (Serway,2018).

Ainda falando sobre as forças básicas existentes na natureza. Os físicos identificaram quatro tipos de forças básicas: (1) a **força gravitacional**, que se desenvolve na presença da matéria; (2) a **força eletromagnética**, que inclui as interações elétricas e magnéticas; (3) a **força nuclear fraca**, que causa determinados processos de decaimento radioativo e algumas reações entre partículas fundamentais; e (4) a **força forte**, que age entre as partículas fundamentais e é responsável pela coesão do núcleo (Resnick et al., 2003). Neste curso, vamos trabalhar com as forças que têm origem nas interações gravitacional ou eletromagnética. Não vamos entrar nos aspectos microscópicos dos sistemas mecânicos que serão analisados. Na próxima seção apresentamos brevemente as leis que regem o movimento dos objetos no mundo macroscópico.

1.1 Leis de Newton

Em 1687, Isaac Newton apresentou as três leis fundamentais da mecânica que explicam satisfatoriamente o movimento de objetos (partículas) com dimensões macroscópicas. Devido às leis de Newton, é possível construir grandes edifícios, estudar as propriedades dos materiais, construir aviões, explicar o movimento dos planetas, enviar sondas para ao espaço, etc. O campo de aplicabilidade das leis de Newton não inclui o domínio relativístico (partículas viajando com altas velocidades) e o domínio quântico (partículas pertencentes à escala atômica). Nas próximas seções apresentamos as leis de Newton.

1.1.1 Primeira lei de Newton

A primeira lei de Newton, também conhecida como lei da Inércia pode ser enunciada da seguinte forma:

Todo corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças externas.

A primeira lei de Newton permite definir um conjunto de sistemas de referência chamados *referenciais inerciais*. Segundo Serway e Jewett (2018), um referencial inercial é aquele no qual um corpo que não interage com outros corpos sofre aceleração zero. Qualquer referencial que se mova

com velocidade constante em relação a um referencial inercial também é um referencial inercial. Portanto, a primeira lei de Newton só é válida em referenciais inerciais.

De acordo com a primeira lei de Newton, a soma de todas as forças que atuam num objeto devem ser nula. Quando esta situação ocorre, dizemos que o sistema está **equilíbrio**. Usando a linguagem matemática para expressar a lei da Inércia, temos:

$$\vec{F}_{res} = \sum \vec{F} = \vec{0}, \quad (1.1)$$

onde a notação $\sum \vec{F}$ representa a soma vetorial de todas as forças que agem sobre um corpo. ($\sum \vec{F}$ é geralmente denominado de força resultante).

1.1.2 Segunda lei de Newton

O enunciado da segunda lei de Newton na forma convencional é:

A força resultante que age sobre um objeto é igual ao produto da massa do objeto pela sua aceleração.

Em termos matemáticos, a segunda lei de Newton é dado pela expressão:

$$\vec{F}_{res} = \sum \vec{F} = m\vec{a}, \quad (1.2)$$

onde m é a massa do objeto, \vec{a} é aceleração que o mesmo possui devido à força resultante $\vec{F}_{res} \neq \vec{0}$.

Podemos observar, que a lei da Inércia é um caso particular da segunda lei de Newton. Fazendo $\vec{a} = \vec{0}$ em (1.2), obtemos a primeira lei de Newton (1.1).

A expressão (1.2) é uma equação vetorial, portanto pode ser escrita através de três equações unidimensionais,

$$F_{res,x} = \sum F_x = ma_x, \quad (1.3)$$

$$F_{res,y} = \sum F_y = ma_y, \quad (1.4)$$

$$F_{res,z} = \sum F_z = ma_z. \quad (1.5)$$

Vale apenas chamar atenção, que a notação $\sum F_x$, $\sum F_y$ e $\sum F_z$ denotam, respectivamente, as somas algébricas das componentes nas direções x , y e z de todas as forças que estão atuando sobre um corpo de massa m . Os sinais das componentes devem ser levados em conta, ao efetuar a soma algébrica.

Usando a definição do vetor aceleração, a equação (1.2) pode ser escrita como:

$$\vec{F}_{res} = \sum \vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (1.6)$$

e usando a definição do vetor velocidade, a equação (1.6), é reescrita da seguinte forma:

$$\vec{F}_{res} = \sum \vec{F} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (1.7)$$

Assim, podemos ver que a equação (1.2), além de ser uma equação vetorial, é também uma equação diferencial e usando as técnicas de integração, podemos obter as equações vetoriais da

velocidade e da posição. Assim, com as equações da posição, velocidade e aceleração podemos descrever o movimento de um objeto.

Fazendo a análise dimensional da equação (1.2) temos o seguinte resultado:

$$[|\vec{F}|] = [m][|\vec{a}|] = M \frac{L}{T^2}. \quad (1.8)$$

No sistema de unidades do SI, a unidade de força é chamada de Newton (abreviada por N), ou seja:

$$1N = 1kg \frac{m}{s^2}. \quad (1.9)$$

Assim, se a massa for medida em kg e a aceleração em m/s^2 , a segunda lei de Newton fornece a força em Newton (N).

Na Tabela, apresentamos outras unidades usadas para segunda lei de Newton:

Tabela 1.1: Unidades da Segunda Lei de Newton

Sistema	Força	Massa	aceleração
SI	newton (N)	quilograma (kg)	m/s^2
cgs	dina	grama (g)	cm/s^2
Inglês	libra (lb)	slug	ft/s^2

Observação: a sigla cgs significa centímetro-grama-segundo. A unidade de força neste sistema é o dina, que é equivalente a $g \cdot cm/s^2$. Uma vez que $1 kg = 10^3 g$ e $1 m/s^2 = 100 cm/s^2$, segue que $1 N = 10^5$ dina.

1.1.3 Terceira lei de Newton

Na forma compacta, a terceira de Newton é enunciada da seguinte forma:

A cada ação existe uma reação igual em módulo e oposta em sentido.

Na forma matemática, a terceira lei de Newton é dada por:

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = \vec{0} \implies \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \quad (1.10)$$

onde \vec{F}_{12} denota a força exercida pelo corpo 1 sobre o corpo 2 (ação) e \vec{F}_{21} denota a força exercida pelo corpo 2 sobre o 1 (reação). Podemos notar pela equação (1.10), que os pares ação e reação são iguais em módulo, mas tem sentido oposto.

Atenção: as forças ação e reação sempre ocorrem em corpos diferentes.

Na Figuras 1.3 e 1.4 apresentamos alguns exemplos para ilustrar a terceira lei de Newton.

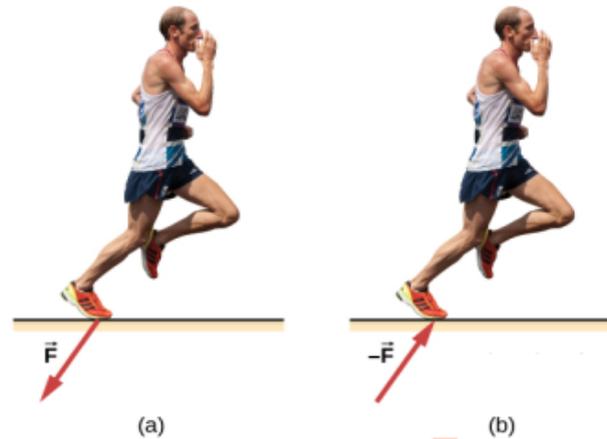


Figura 1.3: Um corredor experimenta a terceira lei de Newton. (a) Uma força é exercida pelo corredor sobre o solo. (b) A força de reação do solo sobre o corredor o empurra para frente (Ling, 2018).

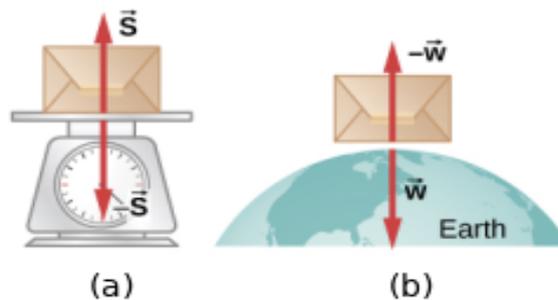


Figura 1.4: Exemplos da terceira lei de Newton. (a) A balança e o pacote exercem forças de contato ação-reação sobre o outro. (b) O pacote e a Terra exercem forças gravitacionais um sobre o outro (Ling, 2018).

Procedimentos para aplicar as leis de Newton

Na análise de problemas usando as leis de Newton, alguns passos devem ser seguidos:

1. Escolher um sistema de referência inercial. A orientação e os sentidos positivos dos eixos do sistema de coordenadas que está posicionado no sistema de referência devem ser selecionados. As componentes de força que coincidem com o sentido positivo devem ser tomadas como positivas, e as com sentido oposto devem ser tomadas como negativas.
2. Desenhar um diagrama de corpo livre de cada objeto do problema, mostrando todas as forças que atuam sobre cada corpo. Neste diagrama, o corpo é considerado como uma partícula.
3. Para cada corpo, encontrar a soma vetorial de todas as forças. Isto, na prática, geralmente significa somar separadamente as componentes x , y e z das forças, prestando atenção aos sinais das variáveis.

(Resnick et al., 2003)

1.2 Leis de força

Nesta seção apresentamos, de forma breve, as principais forças que trabalharemos neste curso de Física Básica. Vamos considerar as seguintes forças: força gravitacional, força normal, força de tração (também chamada de tensão), força elástica e força de atrito.

1.2.1 Força gravitacional

Sabemos que na superfície da Terra e desprezando a resistência do ar, um corpo de massa m em que livre está sob influência apenas da aceleração da gravidade g . Usando esta informação na segunda lei de Newton, temos:

$$\vec{F}_{res} = m\vec{g} = -mg\hat{j}, \quad (1.11)$$

onde \hat{j} é o vetor unitário que aponta para cima ao longo do eixo y , perpendicular ao solo (superfície da Terra).

A expressão $\vec{F}_g = -m\vec{g}$ é o que chamamos de força gravitacional e aponta para o centro da Terra. Mesmo que objeto não esteja em movimento de queda livre, está força continua atuando sobre o objeto, uma vez que a aceleração da gravidade é gerada pelo planeta Terra sobre o objeto. (Para que a força gravitacional desaparecesse, a Terra teria que desaparecer.)

Atenção: o peso P de um corpo é igual ao $|\vec{F}_g|$ que age sobre o corpo.

1.2.2 Força normal

A força normal é uma força que surge devido ao contato de um objeto com uma superfície. Esta força sempre aponta na direção perpendicular à superfície de contato. Não existe uma expressão específica para o cálculo da força normal, assim como temos da força gravitacional na superfície da Terra. O cálculo do módulo da força normal, ou seja $|\vec{N}|$, depende do problema que estamos resolvendo. Para visualizarmos a força normal, consideremos um exemplo simples apresentado na Figura 1.5.

A força gravitacional (popularmente chamado de força peso), exerce uma força sobre o livro para baixo. Todavia o bloco não se movimentar na direção vertical. Logo concluímos que existe uma força que surge do contato do livro com a mesa e que anula a força peso. Esta força é o que chamamos de força normal, e neste exemplo simples, aplicando a segunda lei de Newton temos:

$$\vec{F}_{res} = \vec{N} - \vec{P} = \vec{0} \implies \vec{N} = \vec{P}. \quad (1.12)$$

Atenção: A força normal não é a reação da força peso.



Figura 1.5: Um livro em repouso sobre uma mesa e diagrama de corpo.

1.2.3 Força de tração

A força tração é uma força transmitida através da corda (ou um fio, cabo ou outro objeto do mesmo tipo) a um corpo, quando a mesma está presa a este corpo e tracionada (tensionada). Não existe uma expressão matemática específica para o cálculo da força tração, também chamada de tensão. A expressão para o cálculo da força tração depende do problema que está sendo considerado.

Nos problemas envolvendo a tração neste módulo, será considerado que a corda é ideal (o que significa que a massa da corda é desprezível em comparação com a massa do corpo ao qual está presa) e *inextensível*. Na Figura 1.6 apresentamos alguns exemplos simples de aplicação da força tração. Nesta parte do curso iremos considerar a polia como ideal, o que significa que a massa é desprezível e não existe atrito no processo.

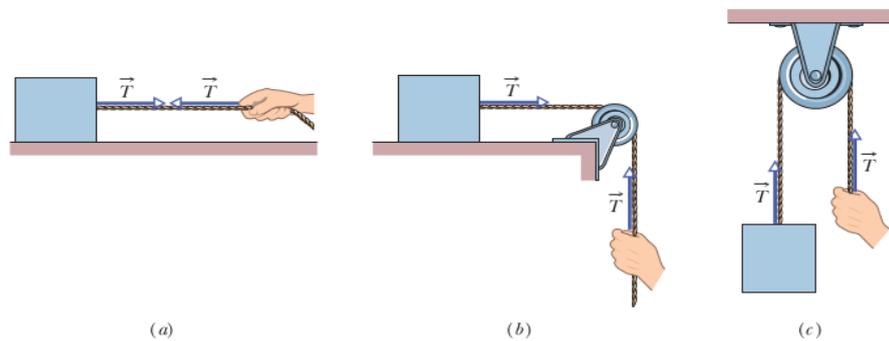


Figura 1.6: (a) Uma corda esticada está sob tensão. Se sua massa é desprezível a corda puxa o corpo e sua mão com uma força \vec{T} , mesmo que a corda passe por uma polia sem massa e sem atrito, como em (b) e (c) (Halliday, 2009).

1.2.4 Força elástica

A força elástica é uma força que surge quando utilizamos molas. No nosso cotidiano utilizamos molas em várias situações, como exemplo: no sistema de amortecimento dos carros (ver Figura 1.7), viadutos e nos edifícios construídos em locais onde existem terremotos. Os conhecimentos adquiridos sobre o comportamento da mola também são usados para desenvolver materiais amortecedores.



Figura 1.7: Sistema de amortecimento de um carro.

Através de experimentos observa-se que força não é constante e quanto mais se varia o comprimento da mola, maior é a força exercida pela mola. Para pequenas deformações da mola, observa-se,

por aproximação, que a intensidade desta força varia linearmente com a distância que a mola é distendida ou comprimida em relação ao seu comprimento. A expressão que permite calcular a força que uma mola exerce por sobre um corpo quando a mesma sofre um pequeno deslocamento é denominada de **lei de Hooke** e é dada pela seguinte expressão no caso unidimensional:

$$\vec{F} = -kx\hat{i}, \quad (1.13)$$

onde a constante de proporcionalidade k é a característica mola, o x representa o deslocamento da mola e sua unidade do SI é newton por metro (**N/m**) e o sinal que aparece na equação (1.5) indica que a força exercida pela mola é sempre oposta ao seu deslocamento. A mola age no sentido de tentar voltar ao seu **estado relaxado** (mola não deformada). Devido a esta característica da força elástica, a mesma é classificada como uma **força restauradora** (ver Figura 1.8).

Força restauradora

Na Figura 1.8, ilustramos a discussão feita sobre a força elástica e o fato dela ser uma força restauradora. Podemos notar, que para x positivo (mola distendida), a força elástica aponta para esquerda. Quando x é zero (comprimento natural da mola), a força elástica é zero. Quando x é negativo (mola comprimida), a força elástica aponta para direita. O gráfico F_M <https://pt.overleaf.com/project/5f7102f13e579e0001f42132> versus x mostra o comportamento linear da força elástica e está em harmonia com experimento físico apresentado na Figura, no que diz respeito ao sentido da força da elástica no processo de comprimir e distender a mola. .

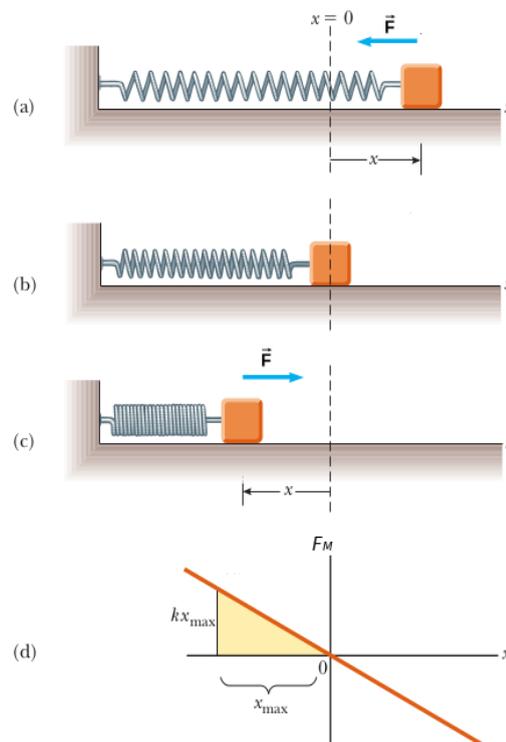


Figura 1.8: A força exercida por uma mola sobre um bloco varia com a posição x do bloco em relação à posição de equilíbrio $x = 0$. (a) x é positivo. (b) x é zero e (c) x é negativo. (d) Gráfico de F_M por x para o sistema bloco-mola (Figura modificada (Serway, 2018)).

1.2.5 Forças de atrito

Quando empurramos ou tentamos empurrar um corpo que está apoiado em uma superfície, a interação dos átomos do corpo com os átomos da superfície faz com que haja uma resistência ao movimento. Essa resistência recebe o nome de força de atrito, ou simplesmente atrito.

A força de atrito é encontrada em quase todas situações do dia a dia. Caso não fôssemos capazes de vencê-las, elas fariam parar todos os objetos que estivessem se movendo e todos os eixos que estivessem girando. Por outro lado, se não houvesse atrito, não poderíamos fazer o automóvel ir a lugar algum, nem poderíamos caminhar ou andar de bicicleta. De fato, é uma força que facilita nossa vida e permite por exemplo nossos deslocamentos, quer seja andando ou utilizando um veículo, sem deslizar, ou por exemplo para prender pregos e parafusos, ou para escrevermos com lápis.

Pode-se mostrar facilmente existência da força de atrito, por exemplo: um corpo lançado sobre uma mesa, depois de um certo tempo, irá parar. O que implica que o corpo experimenta uma aceleração contrária ao seu movimento. De acordo com a lei fundamental da dinâmica, existe uma força responsável por esta aceleração, e que é chamada de força de atrito.

Quando uma força tende a fazer um objeto deslizar em uma superfície, uma força de atrito associada à superfície age sobre o objeto. A força de atrito, que resulta da interação do objeto com a superfície, é paralela à superfície e se opõe ao movimento, como pode ser visto na Figura 1.9.

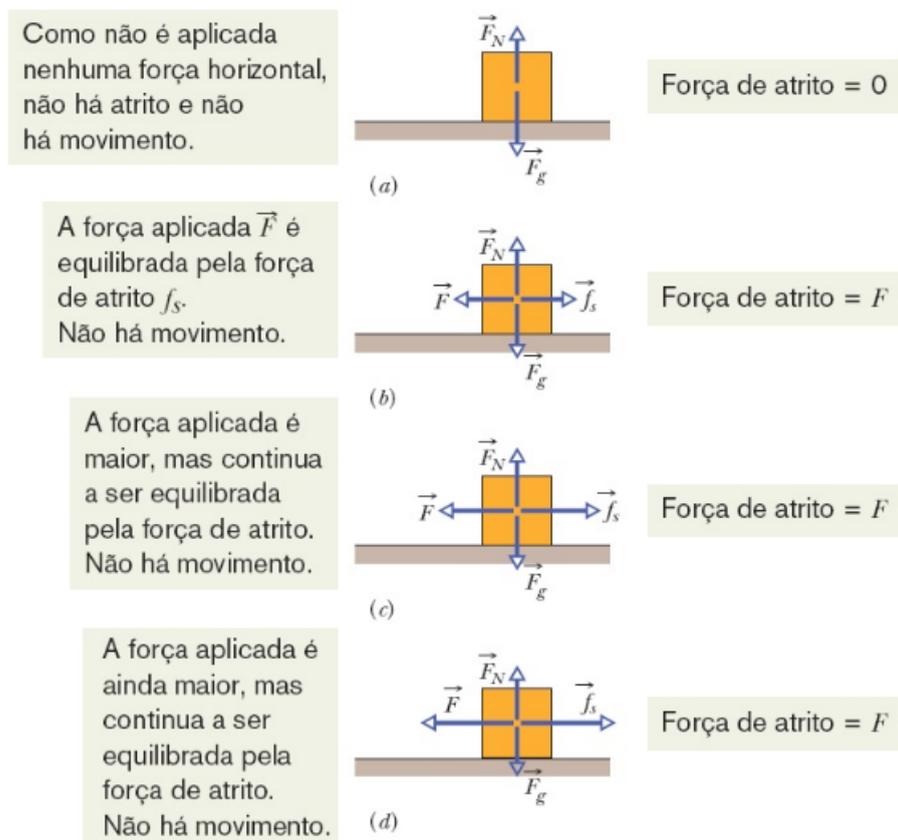


Figura 1.9: As forças que agem sobre um bloco: (a) um bloco estacionário.; (b-d) Uma força externa \vec{F} , aplicada ao bloco, é equilibrada por uma força de atrito estático \vec{f}_s . Quando aumenta, \vec{f}_s também aumenta, até atingir um valor máximo (Halliday, 2010).

A Figura 1.9 (a) mostra um bloco está em repouso em uma mesa, com a força gravitacional \vec{F}_g equilibrada pela força normal \vec{N} .

Na Figura 1.9 (b) é exercida uma força sobre o bloco, tentando puxá-lo para a esquerda. Em consequência, surge uma força de atrito \vec{f}_s para a direita, que equilibra a força que você aplicou. A força \vec{f}_s é chamada de força de atrito estático. O bloco permanece imóvel.

As Figuras 1.9 (c) e (d) mostram que, quando a intensidade da força aplicada aumenta, a intensidade da força de atrito estático \vec{f}_s também aumenta, e o bloco permanece em repouso. Entretanto, quando a força aplicada atinge determinado valor, o bloco "se desprende" da superfície da mesa e sofre aceleração para a esquerda (Fig. 1.10 (a)). A força de atrito \vec{f}_k que se opõe ao movimento na nova situação é chamada de força de atrito cinético.

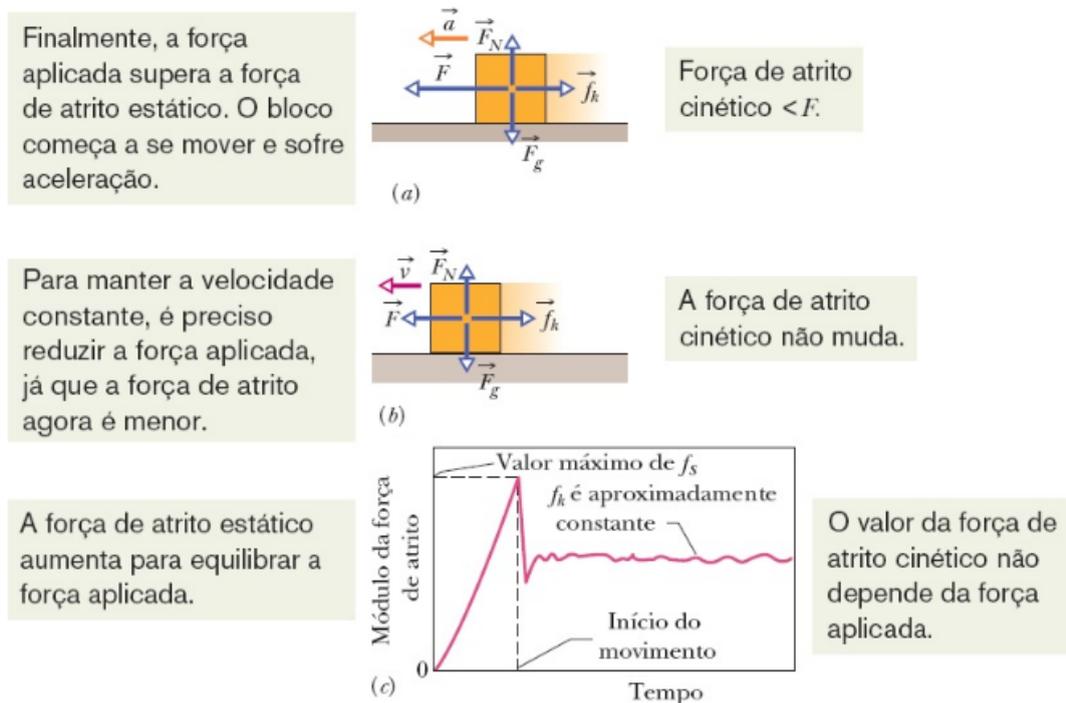


Figura 1.10: As forças que agem sobre um bloco: (a) Quando \vec{f}_s atinge o valor máximo, o bloco movimenta-se e acelera bruscamente na direção de \vec{F} . (b) Para que o bloco se mova com velocidade constante, é preciso reduzir o valor de \vec{F} . (c) Alguns resultados experimentais para a e b (Halliday, 2010).

Se o objeto permanece em repouso, a força de atrito é chamada de força de atrito estático (\vec{f}_e) e caso contrário, a força de atrito é chamada de força de atrito cinético (\vec{f}_c). Em geral, a intensidade da força de atrito cinético, que age sobre os objetos em movimento, é menor do que a intensidade máxima da força de atrito estático, que age sobre os objetos em repouso. Assim, para que o bloco se mova na superfície com velocidade constante, provavelmente você terá que diminuir a intensidade da força aplicada depois que o bloco começar a se mover (Fig. 1.10 (b)). A Figura 1.10 (c) mostra o resultado de um experimento no qual a força aplicada a um bloco foi aumentada lentamente até que o bloco começasse a se mover. Observe que a força necessária para manter o bloco em movimento com velocidade constante é menor que a necessária para que o bloco comece a se mover.

Propriedades do Atrito

As observações experimentais mostram que, quando um corpo seco não lubrificado pressiona uma superfície nas mesmas condições e uma força \vec{F} tenta fazer o corpo deslizar ao longo da superfície, a força resultante de atrito possui três propriedades:

Propriedade 1

Se o corpo não se move, a força de atrito estático \vec{f}_s e a componente de força \vec{F} paralela à superfície se equilibram. As duas forças têm módulos iguais e sentido opostos.

Propriedade 2

O módulo de \vec{f}_s possui um valor máximo $f_{s,max}$ que é dado por:

$$f_{s,max} = \mu_s F_N \quad (\text{iminência do movimento}) \quad (1.14)$$

em que μ_s é o **coeficiente de atrito estático** e F_N é o módulo da força normal que a superfície exerce sobre o corpo. Se $|\vec{F}|$ excede $f_{s,max}$, o corpo desliza na superfície.

Propriedade 3

Depois que o corpo começa a deslizar na superfície, o módulo da força de atrito diminui rapidamente para um valor f_k dado por:

$$f_k = \mu_k F_N, \quad (1.15)$$

em que μ_k é o coeficiente de atrito cinético. Daí em diante, então, durante o deslizamento, uma força de atrito cinético f_k de módulo dado pela equação (1.15) se opõe ao movimento.

Os coeficientes μ_s e μ_k são adimensionais e devem ser determinados experimentalmente. Seus valores dependem das propriedades tanto do corpo como da superfície. Em geral, supomos que o valor de μ_k não depende da velocidade com a qual o corpo desliza ao longo da superfície. Na tabela a seguir, são listados alguns valores de coeficientes de atrito para diversos materiais.

Tabela 1.2: Coeficientes de Atrito

Materiais	μ_s	μ_k
Borracha sobre concreto	1.0	0.80
Aço sobre aço	0.74	0.57
Alumínio sobre aço	0.61	0.47
Vidro sobre vidro	0.94	0.40
Cobre sobre aço	0.53	0.36
Madeira sobre madeira	0.25-0.50	0.20
Metal sobre metal	0.15	0.06
Teflon sobre Teflon	0.04	0.04
Gelo no gelo	0.1	0.03
Articulações em humanos	0.01	0.003

Interpretação microscópica da força de atrito:

A força de atrito é, na verdade, a soma vetorial de muitas forças que agem entre os átomos da superfície de um corpo e os átomos da superfície de outro corpo. Se duas superfícies metálicas polidas e limpas são colocadas em contato em alto vácuo (para que continuem limpas), torna-se impossível fazer uma deslizar em relação à outra. Como as superfícies são lisas, muitos átomos de uma das superfícies entram em contato com muitos átomos da outra, e as superfícies se soldam a frio, formando uma única peça de metal. Se dois blocos de metal, muito polidos, usados para calibrar tornos, são colocados em contato no ar, existe menos contato entre os átomos, mas, mesmo assim, os blocos aderem firmemente e só podem ser separados por um movimento de torção. Em geral, porém, esse grande número de contatos entre átomos não existe. Mesmo uma superfície metálica altamente polida está longe de ser uma superfície plana em escala atômica. Além disso, a superfície dos objetos comuns possui uma camada de óxidos e outras impurezas que reduzem a soldagem a frio.

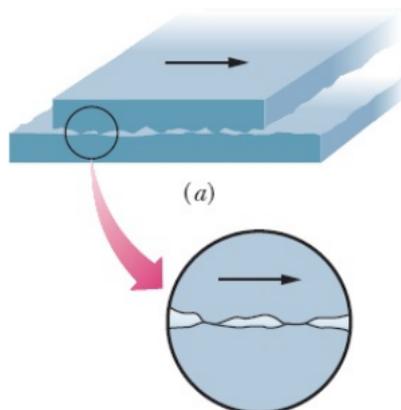


Figura 1.11: Mecanismo responsável pela força de atrito cinético. (a) A placa de cima está deslizando para a direita em relação à placa de baixo. (b) Nesta vista ampliada são mostrados dois pontos onde ocorreu soldagem a frio. É necessária uma força para romper as soldas e manter o movimento (Halliday, 2010).

Quando duas superfícies comuns são colocadas em contato, somente os pontos mais salientes se tocam. A área microscópica de contato é muito menor que a aparente área de contato macroscópica, possivelmente 10^4 vezes menor. Mesmo assim, muitos pontos de contato se soldam a frio. Essas soldas são responsáveis pelo atrito estático que surge quando uma força aplicada tenta fazer uma superfície deslizar em relação à outra.

Se a força aplicada é suficiente para fazer uma das superfícies deslizar, ocorre uma ruptura das soldas (no instante em que começa o movimento) seguida por um processo contínuo de formação e ruptura de novas soldas enquanto ocorre o movimento relativo e novos contatos são formados aleatoriamente. A força de atrito cinético \vec{f}_k que se opõe ao movimento é a soma vetorial das forças produzidas por esses contatos aleatórios.

Se as duas superfícies são pressionadas uma contra a outra com mais força, mais pontos se soldam a frio. Nesse caso, para fazer as superfícies deslizarem uma em relação à outra, é preciso aplicar uma força maior, ou seja, o valor da força de atrito estático \vec{f}_s é maior. Se as superfícies estão deslizando uma em relação à outra, passam a existir mais pontos momentâneos de soldagem a frio, de modo que a força de atrito cinético \vec{f}_k também é maior.

Frequentemente, o movimento de deslizamento de uma superfície em relação à outra ocorre “aos solavancos” porque os processos de soldagem e ruptura se alternam. Esses processos repetitivos de aderência e deslizamento podem produzir sons desagradáveis, como o cantar de pneus no asfalto, o barulho de uma unha arranhando um quadro-negro e o rangido de uma dobradiça enferrujada. Podem também produzir sons melodiosos, como os de um violino bem tocado.

1.3 Leis de Newton e movimento circular uniforme

No módulo 2 vimos que se um corpo (que é modelado como uma partícula) realiza um movimento circular uniforme (MCU), então o corpo possui uma aceleração radial (chamada também de centrípeta) que aponta para o centro da trajetória circular e que tem módulo igual a

$$a_{radial} = a_r = \frac{v^2}{r} \quad (r \text{ é o raio da trajetória circular}). \quad (1.16)$$

Se a segunda lei de Newton for aplicada ao longo da direção radial, então a força resultante é dada por:

$$\vec{F}_{res,radial} = -m \frac{v^2}{r} \hat{r}, \quad (1.17)$$

onde \hat{r} é um versor (vetor unitário) radial e o sinal de menos indica que ele agora aponta para o centro da trajetória circular. A seguir apresentaremos alguns exemplos, para ilustrar a aplicação das leis de Newton ao MCU.

Pêndulo cônico

Uma pequena bola de massa m é suspensa por um barbante de comprimento L . A bola gira com velocidade constante v em um círculo horizontal de raio r como mostrado na Figura 1.12. Como o barbante por toda a superfície de um cone imaginário, o sistema é chamado de pêndulo cônico. Determine uma equação para a velocidade v , em função dos parâmetros: L , θ e g .

Solução:

Como a partícula não se movimenta na direção vertical, concluímos que a componente da aceleração na vertical, $a_z = 0$. Contudo, no plano horizontal, a partícula experimenta uma aceleração centrípeta, logo ela possui uma força resultante na direção radial. Aplicando a segunda lei de Newton temos:

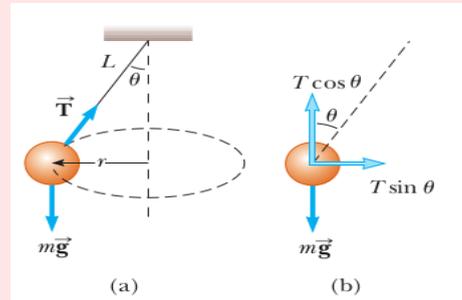


Figura 1.12: Pêndulo cônico

$$\sum F_z = T \cos \theta - mg = 0 \implies T \cos \theta = mg \quad (1.18)$$

e

$$\sum F_{radial} = T \sin \theta = ma_r = m \frac{v^2}{r}. \quad (1.19)$$

Dividindo a equação (1.19) pela (1.18) resulta em:

$$tg \theta = \frac{v^2}{rg} \implies v = \sqrt{rg \, tg \theta} = \sqrt{(L \sin \theta) g \, tg \theta} \quad (1.20)$$

Pista curvilínea

Um carro de 1500,0 kg movimentado-se numa estrada plana horizontal faz uma curva, como pode ser visto na Figura 1.13. Se o raio da curva é 35,0 m e o coeficiente de atrito estático entre os pneus e o calçamento seco é de 0,523, determine a velocidade máxima que o carro pode atingir e fazer a curva com sucesso.

Solução:

Como o carro não se movimenta na direção vertical, concluímos que a componente da aceleração na vertical, $a_z = 0$. No plano horizontal, o carro realiza um movimento circular, logo o carro experimenta uma aceleração centrípeta. Vamos considerar que durante todo o trajeto circular a velocidade em módulo do carro seja constante.

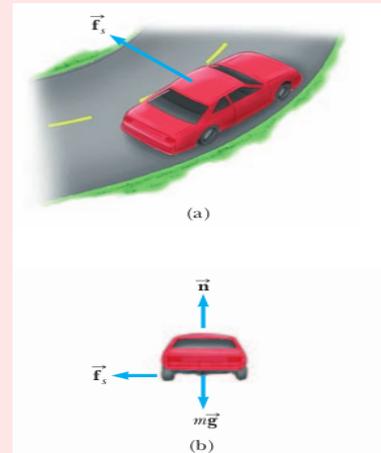


Figura 1.13: Pista curvilínea

Aplicando a segunda lei de Newton temos:

$$\sum F_z = n - mg = 0 \implies n = mg \quad (1.21)$$

e

$$\sum F_{radial} = ma_r = m \frac{v^2}{r} . \quad (1.22)$$

Na Figura 1.13(b), apresentamos todas as forças que atuam no carro. A força que permite o carro fazer a curva é a força de atrito estática. É estática por que não ocorre nenhuma derrapagem no ponto de contato entre a pista e os pneus. Se a pista tivesse sido coberta por gela ou por óleo lubrificante o atrito seria muito pequeno, quase nulo. Assim, o motorista não conseguiria fazer a curva. A velocidade máxima que o carro poderia ter ao fazer a curva é aquela com a qual ele está à beira de derrapar para fora da pista. Usando esta informação em (1.22), temos:

$$f_{s,max} = \mu_e n = ma_r = m \frac{v^2}{r} . \quad (1.23)$$

Usando a equação (1.21) em (1.23) resulta em:

$$v_{max} = \sqrt{\mu_e g r} = 13,4 \text{ m/s} . \quad (1.24)$$

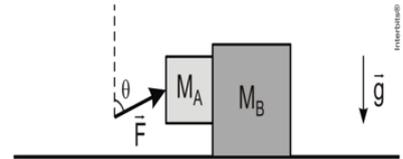
(Serway e Jewett, 2018)

1.4 Exercícios Resolvidos

Exemplo 1

A figura ao lado ilustra dois blocos A e B de massas $M_A = 2,0 \text{ kg}$ e $M_B = 1,0 \text{ kg}$. Não existe atrito entre o bloco B e a superfície horizontal, mas há atrito entre os blocos. Os blocos se movem com aceleração de $2,0 \text{ m/s}^2$ ao longo da horizontal, sem que haja deslizamento relativo entre eles. Considere: $\sin(\theta) = 0,60$ e $\cos(\theta) = 0,80$. Calcule:

- (a) O módulo, em newtons, da força F aplicada no bloco A?
 (b) A força de contato entre os corpos A e B?



Solução:

A força aplicada (componente de F) no corpo (M_A), na direção da aceleração horizontal, é $F \sin(\theta)$. Daí temos que:

$$F \sin(\theta) - f_c = M_A a \quad \text{e} \quad f_c = M_B a$$

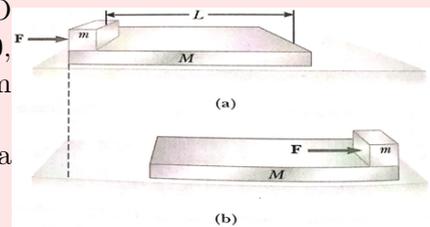
Logo:

$$F = \frac{(M_A + M_B)a}{\sin(\theta)} = 10 \text{ N} \quad \text{e} \quad f_c = 2 \text{ N}$$

Exemplo 2

Um bloco de massa $m = 2,0 \text{ kg}$ está apoiado sobre o lado esquerdo de um bloco de massa $M = 8,0 \text{ kg}$. O coeficiente de atrito cinético entre os dois blocos é de $0,30$, e a superfície sobre a qual o bloco M está apoiado é sem atrito. Uma força $F = 10 \text{ N}$ é aplicada ao bloco m .

- (a) Se $L = 3 \text{ m}$, quanto tempo o bloco m levará para alcançar o lado direito do bloco M ?
 (b) Qual é a distância percorrida pelo bloco M ?



Solução:

No corpo m a força resultante é $F_r = F - fat = ma_m$. Já para o corpo M , temos que $fat = Ma_M$ (a força de atrito é a única força atuando em M).

Para $F = 10 \text{ N}$ e $fat = \mu N = \mu mg = 6 \text{ N}$, temos que as acelerações dos blocos são:

$$a_m = 2 \text{ m/s}^2 \quad \text{e} \quad a_M = 0,75 \text{ m/s}^2 \quad (\text{relação ao solo})$$

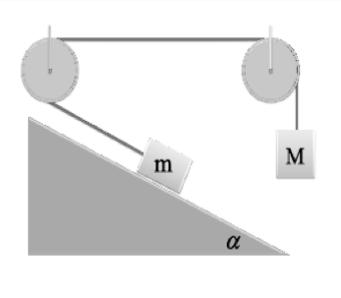
No intervalo de tempo (t), o bloco M se desloca $X = \frac{1}{2}a_M t^2$ e o bloco de massa m se desloca $L + X = \frac{1}{2}a_m t^2$. Logo:

$$\frac{X + L}{X} = \frac{a_m}{a_M} = 2,0/0,75 \quad \rightarrow \quad X = 9/5 \text{ m}$$

E o tempo para alcançar o lado direito do bloco M é $t = \sqrt{2X/a_M} = 2,19 \text{ s}$

Exemplo 3

3.- Considere o sistema mostrado ao lado, que consiste de um bloco de massa m , sobre um plano inclinado de ângulo α , que por sua vez encontra-se ligado ao bloco de massa M mediante a um sistema de polias fixas e uma corda (elementos ideais). O coeficiente de atrito entre o bloco e o plano é μ .

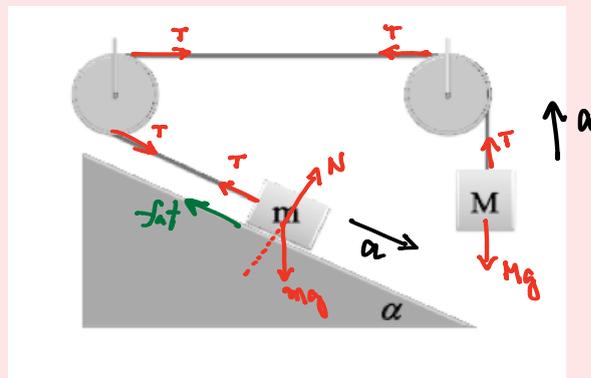


(a) Faça um diagrama de todas as forças que atuam sobre cada bloco isoladamente.

(b) Neste problema nos interessa conhecer a condição para que o bloco de massa m desça deslizando o plano inclinando, em função de M , e ângulo α .

Solução:

Na figura abaixo temos todas as forças indicadas.



Aplicando a 2ª lei de Newton para cada bloco:

$$T - Mg = Ma \quad \text{e} \quad mg \sin(\alpha) - fat - T = ma$$

onde $fat = \mu N = \mu mg \cos(\alpha)$

Eliminando-se a tensão (T), obtemos:

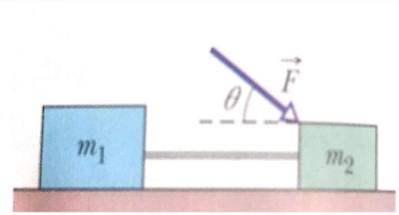
$$mg \sin(\alpha) - \mu mg \cos(\alpha) - Mg = (M + m)a$$

Para o bloco m descer o plano inclinado, devemos ter que $a > 0$, ou seja,

$$m > \frac{M}{\sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha)}$$

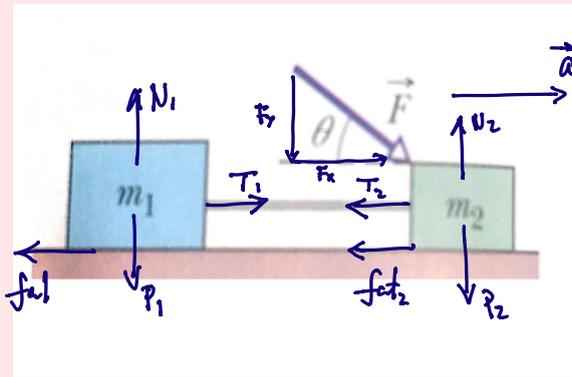
Exemplo 4

Na figura ao lado, o bloco 1 de massa $m_1 = 2,0 \text{ kg}$ e o bloco 2 de massa $m_2 = 1,0 \text{ kg}$ estão ligados por um fio, de massa desprezível. O bloco 2 é empurrado por uma força F de módulo 20 N que faz um ângulo $\theta = 35^\circ$ com a horizontal. O coeficiente de atrito cinético entre cada bloco e a superfície horizontal é $0,20$. Determine:



- (a) A aceleração dos blocos;
 (b) A tração na corda.

Solução:



A partir das forças indicadas na figura acima temos que:
 Para o corpo $m_1 = 2,0 \text{ kg}$.

$$T - fat_1 = 2a \quad \text{e} \quad N_1 = P_1 = m_1 g$$

Para o corpo $m_2 = 1,0 \text{ kg}$.

$$F \cos(\theta) - T - fat_2 = a \quad \text{e} \quad N_2 = F \sin(\theta) + P_2$$

onde $P_2 = m_2 g$.

Eliminando a tensão (T), temos que:

$$F \cos(\theta) - fat_1 - fat_2 = 3a$$

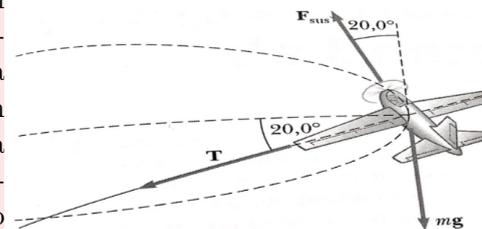
onde

$$fat_1 = \mu N_1 = 4,0 \text{ N} \quad \text{e} \quad fat_2 = \mu N_2 = \mu(F \sin(\theta) + P_2) = 4,28 \text{ N}$$

Assim temos que o valor da aceleração é $a = 2,64 \text{ m/s}^2$ e a tensão $T = 9,4 \text{ N}$

Exemplo 5

Um avião de brinquedo com massa de $0,75 \text{ kg}$ voa num círculo horizontal na extremidade um fio de controle remoto de $60,0 \text{ m}$, à velocidade de $35,0 \text{ m/s}$. Calcule a tensão no fio se ele faz um ângulo constante de 20° com a horizontal. As forças exercidas sobre o avião são a tensão do fio de controle, seu próprio peso, e a sustentação aerodinâmica, que age a 20° para dentro em relação à vertical como mostrado (figura ao lado).



Solução:

Decompondo as forças nas suas componentes vertical e radial:

Na direção vertical, temos que:

$$F_s \cos(20^\circ) - T \sin(20^\circ) - mg = 0 \quad (\text{não há movimento vertical})$$

Na direção radial:

$$F_s \sin(20^\circ) + T \cos(20^\circ) = F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (\text{força resultante para o centro -força centrípeta})$$

Para os dados $m = 0,75 \text{ kg}$; $R = 60 \text{ m}$ e $v = 35 \text{ m/s}$, eliminado-se a força F_s , obtemos que $T = 12,8 \text{ N}$.

Exemplo 6

Um manual de motorista estabelece que quando se viaja a 50 km/h e se deseja parar tão rápido quanto possível, percorre-se 10 m antes que a ação do freio comece a se fazer sentir. Depois que o freio começa a atuar o carro ainda percorre 20 m até parar.

- Calcule o coeficiente de atrito para estas condições;
- Determine o raio mínimo de uma curva circular que pode ser completada com 50 km/h sem que o carro derrape na curva.

Solução:

- A força resultante no carro, durante uma frenagem é exatamente igual a força de atrito. Assim:

$$F_R = f_{at}$$

$$m \cdot a = \mu \cdot m \cdot g \Rightarrow a = \mu \cdot g$$

Com $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Utilizando a equação de Torricelli, teremos:

$$v^2 = v_0^2 - 2 \cdot a \cdot \Delta x, \text{ sabendo que } v_0 = 50 \text{ km/h} = 13,9 \text{ m/s}$$

$$0 = 13,9^2 - 2 \cdot \mu \cdot 9,8 \cdot 20 \rightarrow \mu = 0,49$$

- Durante a curva, a resultante centrípeta será igual a força de atrito. Assim, teremos:

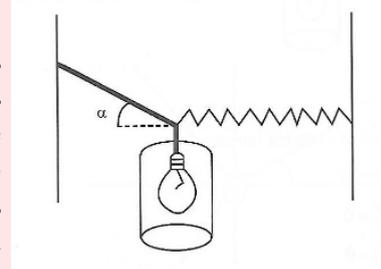
$$F_{cp} = f_{at}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = \mu \cdot m \cdot g$$

e substituindo os valores de v , g e μ temos $R = 40,3 \text{ m}$.

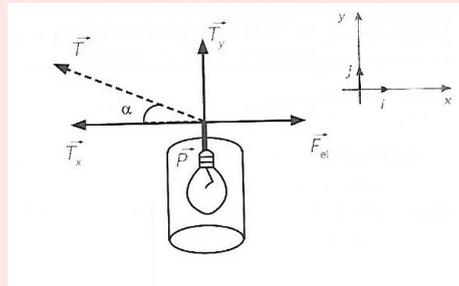
Exemplo 7

Após aprender as leis de Newton você resolve instalar uma luminária, sem usar o teto e utilizando um cabo e uma corda elástica. A luminária deverá ficar em repouso. Você já tem uma luminária e a corda elástica, falta comprar o cabo. Sabemos que a massa da luminária (m) é igual a 8,0 kg, a constante elástica (k) da corda é igual a 300 N/m e será alongada 0,5 m na instalação. Instalando conforme figura ao lado. Ao chegar a loja o vendedor pergunta se você quer um cabo que suporte até 100 N ou até 200 N? Qual cabo você deverá pedir ao vendedor?



Solução:

Para responder ao vendedor você rapidamente analisa o sistema de instalação da luminária com o objetivo de calcular a tração no cabo e o ângulo α . Veja o diagrama do corpo livre com todas as forças que atuam sobre a luminária:



Para o equilíbrio da luminária temos:

Analisando o eixo x:

$$\sum \vec{F}_x = \vec{F}_{el} + \vec{T}_x = \vec{0} \rightarrow (k \cdot x)\hat{i} - \vec{T}_x = \vec{0} \rightarrow (300 \cdot 0,5)\hat{i} - (\vec{T}_x) = \vec{0} \rightarrow \vec{T}_x = 150\hat{i} \text{ N.}$$

Analisando o eixo y:

$$\sum \vec{F}_y = \vec{T}_y + \vec{F}_g = \vec{0} \rightarrow \vec{T}_y + (m \cdot g)\hat{j} = \vec{0} \rightarrow \vec{T}_y - (8,0 \cdot 9,8)\hat{j} = \vec{0} \rightarrow \vec{T}_y = 78,4\hat{j} \text{ N.}$$

Podemos concluir que o módulo da Tração no cabo é:

$$T^2 = T_x^2 + T_y^2 \rightarrow T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2} \rightarrow T = \sqrt{150^2 + 78,4^2} \approx 169,3 \text{ N}$$

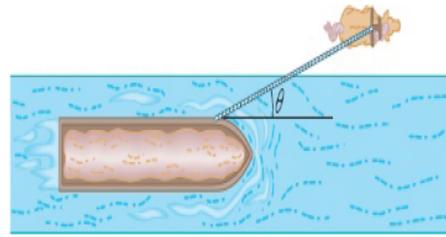
Sabendo que $T_x = T \cos \alpha$, temos que: $150 = 169,3 \cos \alpha \rightarrow \cos \alpha = \frac{150}{169,3} \approx 0,89$

Logo: $\alpha = \arccos(0,89) \approx 27,6^\circ$

E o cabo que irá comprar deverá suportar até 200 N.

Exemplo 8

No passado, cavalos eram usados para puxar barcaças em canais, como mostra a figura ao lado. Suponha que o cavalo puxa o cabo com uma força de módulo 7900 N e ângulo $\theta = 18^\circ$ em relação à direção do movimento da barcaça, que se desloca no sentido positivo de um eixo x. A massa da barcaça é 9500 kg e o módulo da aceleração da barcaça é $0,12 \text{ m/s}^2$. Qual é (a) o módulo e (b) qual a orientação (em relação ao semieixo x positivo) da força exercida pela água sobre a barcaça?



Solução:

A direção do movimento, ou seja, da direção da aceleração da barcaça, é $+\hat{i}$, e $+\hat{j}$, e foi escolhido de modo que a tração a T do cavalo esteja no primeiro quadrante. As componentes da força desconhecida da água são denominados simplesmente F_x e F_y .

(a) A segunda lei de Newton aplicada à barcaça, nas direções x e y, leva a:

$$(7900 \text{ N}) \cdot \cos 18^\circ + F_x = ma$$

$$(7900 \text{ N}) \cdot \sin 18^\circ + F_y = 0$$

respectivamente. Utilizando as informações da aceleração $a = 0,12 \text{ m/s}^2$ e massa $m = 9500 \text{ kg}$, obtemos:

$$F_x = -6,4 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\text{e } F_y = -2,4 \times 10^3 \text{ N}.$$

A magnitude da força da água é, portanto,

$$F_{\text{agua}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 6,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

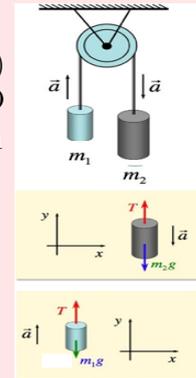
(b) O ângulo medido a partir de $+\hat{i}$ é então:

Para o equilíbrio da luminária temos:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = +21^\circ \text{ ou } 201^\circ.$$

Exemplo 9

A Figura mostra dois blocos ligados por uma corda (de massa desprezível) que passa por uma polia sem atrito (também de massa desprezível). O conjunto é conhecido como máquina de Atwood. Um bloco tem massa $m_1 = 1,3$ kg; o outro tem massa $m_2 = 2,8$ kg.



Responda:

- (a) Qual é o módulo da aceleração dos blocos;
 (b) Qual a tração da corda?

Solução:

Começamos desenhando os diagramas de corpo livre para m_1 e m_2 . Nos diagramas, optamos por apontar o eixo y positivo para cima. A corda exerce uma tensão T , de módulo ainda a ser determinado, para cima sobre m_1 e m_2 . Com nossas escolhas do sistema de coordenadas e o sentido da aceleração, a aceleração para baixo de m_2 é a aceleração em um sentido negativo. Para m_1 podemos escrever:

$$T - m_1 \cdot g = m_1 \cdot a$$

$$T = m_1 \cdot g + m_1 \cdot a = m_1 \cdot (g + a)$$

Para m_2 podemos escrever:

$$T - m_2 \cdot g = -m_2 \cdot a$$

$$T = m_2 \cdot g - m_2 \cdot a = m_2 \cdot (g - a)$$

Equacionando as duas expressões para T podemos escrever:

$$m_2 \cdot (g - a) = m_1 \cdot (g + a) \rightarrow m_1 \cdot a + m_2 \cdot a = m_2 \cdot g - m_1 \cdot g$$

$$a = g \cdot \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)}$$

(a) Agora podemos calcular a aceleração:

$$a = 9,8 \cdot \frac{(2,8 - 1,3)}{(1,3 + 2,8)} \approx 3,6 \text{ m/s}^2$$

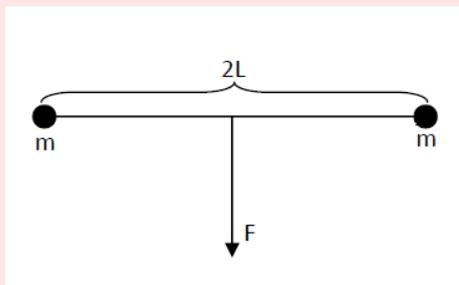
(b) E calcular a Tração:

$$T = m_1 \cdot (g + a) = (1,3) \cdot (9,8 + 3,6) \approx 17,4 \text{ N}$$

Desta equação, é possível ver que o módulo da aceleração, a , é sempre menor do que g nesta situação. Se as massas são iguais, obtemos o resultado esperado de aceleração zero. Selecionado a combinação adequada de massas, podemos gerar qualquer valor da aceleração entre zero e g que desejarmos.

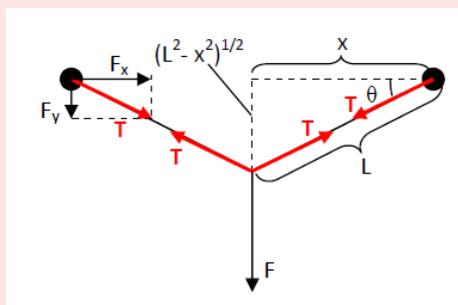
Exemplo 10

Duas partículas de mesma massa m estão ligadas por um fio leve de comprimento $2L$, conforme mostra a figura. Aplica-se uma força contínua F no ponto médio da corda ($x=0$), perpendicularmente à posição inicial da corda. Determine a aceleração de m numa direção perpendicular à força aplicada, em função da distância x de uma das partículas à linha de ação da força aplicada.



Solução:

Vamos apresentar o diagrama de forças:



Observando a figura, podemos concluir que a força resultante em cada partícula é dada por:

$$F_R = m \cdot a = T \rightarrow a = \frac{T}{m}$$

Assim, podemos escrever :

$$a_x = a \cdot \cos\theta \rightarrow a_x = \frac{T}{m} \cdot \cos\theta$$

Mas,

$$F = 2 \cdot T \cdot \sin\theta \rightarrow T = \frac{F}{2 \cdot \sin\theta}$$

Logo temos:

$$a_x = \frac{F}{2 \cdot m} \cdot \frac{\cos\theta}{\sin\theta}$$

Do triângulo retângulo, temos:

$$\frac{\cos\theta}{\sin\theta} = \frac{x}{\sqrt{L^2 - x^2}}$$

Assim,

$$a_x = \frac{F}{2 \cdot m} \cdot \frac{x}{\sqrt{L^2 - x^2}}$$

1.5 Resumo

A **Força** é uma ação física que causa deformações ou que altera o estado de repouso ou de movimento de um determinado objeto. O conceito de força está relacionado com as leis de Newton, criadas por Isaac Newton, que foi responsável por grandes desenvolvimentos no âmbito da Física e mais concretamente no estudo da força. Atualmente, depois de aproximadamente 3 séculos de terem sido formuladas, as leis de Newton ainda são válidas. Por esse motivo, a unidade do Sistema Internacional de força é o newton (N).

Existem vários tipos de força: força de inércia, força gravitacional, força centrífuga e centrípeta, força de atrito, força elétrica, força magnética, força nuclear, etc.

Um **referencial inercial** é um sistema de referência em que os corpos livres não interagem com outros objetos e experimenta aceleração zero. Nesse referencial uma partícula não está sujeita a forças, então está parada ou se movimentando em linha reta e com velocidades constante.

A **primeira lei de Newton** afirma que todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças aplicadas sobre ele.

A **segunda lei de Newton** afirma que a aceleração de um objeto é diretamente proporcional à força resultante que age sobre ele e inversamente proporcional à sua massa. Ou seja, a mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada.

A **terceira lei de Newton** afirma que, se dois objetos interagirem, a força exercida pelo objeto 1 no objeto 2 é igual em magnitude e oposta na direção à força exercida pelo objeto 2 no objeto 1. A toda ação há sempre uma reação oposta e de igual intensidade: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos.

A **Força Gravitacional** é a força de atração que existe entre todas as partículas com massa no universo. A gravitação é responsável por prender objetos à superfície de planetas e, de acordo com as leis do movimento de Newton, é responsável por manter objetos em órbita em torno uns dos outros. Segundo Newton todos os objetos no Universo atraem todos os outros objetos com uma força direcionada ao longo da linha que passa pelos centros dos dois objetos, e que é proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da separação entre os dois objetos.

A **Força Resultante** é a soma vetorial de forças agindo em uma partícula ou corpo. Esta é uma única força que substitui o efeito das forças originais no movimento da partícula. Dá à partícula a mesma aceleração que todas as forças reais juntas como descrito pela segunda lei de Newton.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Condição de Equilíbrio: Se uma partícula mantém uma velocidade constante (de modo que $\vec{a} = 0$), ou que poderia incluir também uma velocidade igual a zero, consideramos então que as forças que agem sobre a partícula estão em equilíbrio e a segunda lei de Newton se reduz a:

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

Força de Atrito (f_{at}) é a força de contato que atua sempre que dois corpos entram em choque e há tendência ao movimento. É gerada pela aspereza (rugosidade) dos corpos (vide figura ilustrativa ao lado). A força de atrito é sempre paralela às superfícies em interação e geralmente contrária ao movimento relativo entre elas. Existem dois tipos de atrito estático e cinético. Quando existe força atuando em um corpo mas ele não se move, o atrito é denominado estático ($f_s = \mu_s F_N$), quando existe força atuando num corpo e ele se move, o atrito é denominado cinético ($f_k = \mu_k F_N$).

Força Elástica: Quando aplicamos uma força F na extremidade de um mola ou corpo elástico, este tende a se deformar, ou seja esticar ou comprimir dependendo do sentido da força aplicada. Ao estudar as deformações de molas e as forças aplicadas, Robert Hooke (1635-1703), verificou que a deformação da mola aumenta proporcionalmente à força. Daí estabeleceu-se a seguinte lei, chamada Lei de Hooke:

$$\vec{F}_{el} = -kx\hat{i},$$

\vec{F}_{el} é intensidade da força aplicada (N); k é a constante elástica da mola (N/m); x é a deformação da mola (m).

Partícula em Movimento Circular Uniforme: Com nosso conhecimento de forças, podemos adicionar ao modelo de uma partícula em movimento circular uniforme. A segunda lei de Newton aplicada a uma partícula se movendo em movimento circular uniforme afirma que a força resultante que faz com que a partícula sofra uma aceleração centrípeta está relacionada à aceleração de acordo com:

$$\vec{F}_{res,radial} = -m\frac{v^2}{r}\hat{r}.$$

Referências Bibliográficas

- Bauer, W.; Westfall, G. D. e Dias, W. (2012) Física Para Universitários, Mecânica, Bookman, São Paulo.
- Ling, S. J.; Sanny, J. e Moebs, W. (2018) University Physics Volume 1, openstax, Hosuton, Texas.
- Nussenzveig, H. M. (2008) Curso de Física Básica 1, Mecânica, Editora Blucher, São Paulo.
- Resnick, S.; Halliday, D. e Krane, K. (2003) Física 1, Editora LTC, São Paulo.
- Serway, R. A. e Jewett, J. W. (2018) Física Para Cientistas E Engenheiros, Volume 1, Mecânica, Editora Cengage, São Paulo.