

VOLUME 1

MECÂNICA NEWTONIANA
GRAVITAÇÃO
OSCILAÇÕES E ONDAS

FÍSICA

UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA

2ª EDIÇÃO

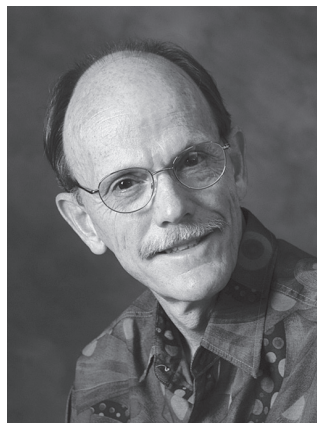


Com exercícios
interativos

Act'v
Physics

RANDALL D. KNIGHT

Sobre o Autor



Randy Knight leciona Física básica há 25 anos na Ohio State University, EUA, e na California Polytechnic University, onde atualmente é professor de física. O professor Knight bacharelou-se em Física pela Washington University, em Saint Louis, e doutorou-se em Física pela University of California, Berkeley. Fez pós-doutorado no Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, antes de trabalhar na Ohio State University. Foi aí que ele começou a pesquisar sobre o ensino da física, o que, muitos anos depois, o levou a escrever este livro.

Os interesses de pesquisa do professor Knight situam-se na área de laser e espectroscopia, com cerca de 25 artigos de pesquisa publicados. Ele também dirige o programa de estudos ambientais da Cal Poly, onde, além de física introdutória, leciona tópicos relacionados a energia, oceanografia e meio ambiente. Quando não está em sala de aula ou na frente de um computador, o professor Knight está fazendo longas caminhadas, remando em um caiaque, tocando piano ou usufruindo seu tempo com a esposa Sally e seus sete gatos.



K71f Knight, Radall.

Física 1 [recurso eletrônico] : uma abordagem estratégica / Randall Knight ; tradução Trieste Freire Ricci. – 2. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : Bookman, 2009.

Editado também como livro impresso em 2009.
ISBN 978-85-7780-519-8

1. Física – Mecânica. 2. Mecânica newtoniana. I. Título.

CDU 531/534

Catálogo na publicação: Renata de Souza Borges CRB-10/1922

5.1 Força

Se você chutar uma bola com pouca força, ela rolará pelo chão. Se você puxar uma maçaneta, a porta abrirá. De muitos anos de experiência, você sabe que é necessário algum tipo de *força* para mover estes objetos. Nosso objetivo é compreender *por que* o movimento ocorre, e a constatação de que força e movimento estão relacionados é um bom ponto de partida.

Os dois principais assuntos deste capítulo são:

- O que é uma força?
- Qual é a relação entre força e movimento?

Começaremos com o primeiro tópico na tabela abaixo.

O que é uma força?



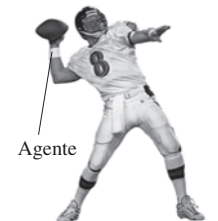
Uma força é um empurrão ou um puxão.

A idéia comum que temos de uma **força** é que ela é um *empurrão* ou um *puxão*. Iremos aperfeiçoar esta idéia mais adiante, todavia ela é apropriada agora como ponto de partida. Note nossa escolha cuidadosa das palavras: nos referimos a “*uma* força”, em vez de, simplesmente, a “força”. Desejamos conceber uma força como um caso muito específico de *ação*, de modo que podemos falar a respeito de uma única força ou, talvez, sobre duas ou três forças individuais que podem ser claramente diferenciadas entre si. Daí a idéia concreta de “uma força” como uma ação sobre um objeto.



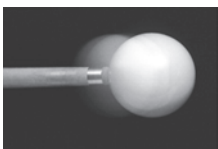
Uma força representa uma ação sobre um objeto.

Está implícito em nosso conceito de força que uma **força é exercida sobre um objeto**. Em outras palavras, empurrões e puxões são aplicados *em* algo – um objeto. Do ponto de vista do objeto, uma força foi *exercida* sobre ele. Forças não existem isoladas dos objetos que as experimentam.



Uma força requer um agente.

Cada força possui um agente, algo que atua ou exerce poder, isto é, uma força possui uma *causa* específica e identificável. Quando você arremessa uma bola, o agente ou a causa da força é sua mão, enquanto fica em contato com a bola. Se uma determinada força está sendo exercida sobre um objeto, deve-se ser capaz de identificar a causa específica (i.e., o agente) para ela. Alternativamente, uma força não é exercida sobre um objeto a *menos* que se possa especificar uma causa ou agente. Embora esta idéia possa parecer expressar o óbvio, você verá que ela será uma ferramenta poderosa para evitar algumas concepções errôneas comuns acerca do que seja e do que não seja uma força.



Uma força é um vetor.

Se você empurrar um objeto, pode fazê-lo suave ou fortemente. De forma análoga, você poderia empurrá-lo para a esquerda ou para a direita, para cima ou para baixo. Para qualificar um empurrão, você precisa especificar um módulo e uma orientação. Não surpreende o fato de uma força ser uma grandeza vetorial. O símbolo geral de uma força é \vec{F} . O “tamanho” ou intensidade de uma força é o seu módulo F .



Uma força pode ser de contato ...

Existem dois tipos básicos de forças, dependendo se o agente toca ou não o objeto. **Forças de contato** são aquelas exercidas sobre um corpo através do contato com algum ponto do mesmo. O bastão deve tocar na bola a fim de rebatê-la. Uma corda deve ser amarrada a um objeto para poder puxá-lo. A maioria das forças que abordaremos são forças de contato.



... ou de ação a distância.

Forças de ação a distância são aquelas exercidas sobre um corpo sem haver contato físico. A força magnética é um exemplo de força de ação a distância. Sem dúvida você já viu um ímã colocado acima de um clipe conseguir erguê-lo. Uma xícara de café solta de sua mão é puxada pela Terra pela força de ação a distância da gravidade.

Vamos resumir estas idéias como nossa definição de força:

- Uma força é um empurrão ou um puxão sobre um objeto.
- Qualquer força é um vetor. Ela possui módulo e orientação.
- Qualquer força requer um agente. Algo que empurre ou puxe.
- Qualquer força é de contato ou de ação a distância. A gravidade é a única força de ação a distância que abordaremos até bem mais adiante no livro.


NOTA ► No modelo de partícula, os objetos não podem exercer forças sobre si mesmos. Uma força sobre um objeto terá um agente ou uma causa externa ao objeto. Agora, certamente existem objetos que possuem forças internas (pense nas forças dentro do motor de seu carro!), porém o modelo de partícula já não é válido se você precisa levar em conta forças internas. Se você for considerar seu carro como uma partícula e se concentrar no movimento global dele como um todo, este movimento será uma consequência das forças externas exercidas sobre o carro. ◀

Vetores força

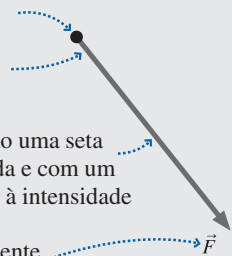
Podemos usar um diagrama simples para visualizar como as forças externas são exercidas sobre os corpos. Uma vez que estamos usando o modelo de partícula, no qual os objetos são considerados como pontos, o processo de desenhar um vetor força é direto. Eis como:

BOX TÁTICO
5.1

Desenhando vetores força



- 1 Represente o objeto como uma partícula.
- 2 Localize a *cauda* do vetor força sobre a partícula.
- 3 Desenhe o vetor força como uma seta com a orientação apropriada e com um comprimento proporcional à intensidade da força.
- 4 Denote o vetor adequadamente.



A etapa 2 parece contrária ao que um “empurrão” deveria fazer, mas recorde-se de que um vetor não é alterado se seu comprimento e seu ângulo de orientação não mudam. O vetor \vec{F} é o mesmo, não importa se sua cauda ou sua ponta está localizada sobre a partícula. A razão para usarmos a cauda sobre a partícula se tornará clara quando considerarmos como combinar várias forças.

A **FIGURA 5.1** ilustra três exemplos de vetores força. Um corresponde a um empurrão, outro a um puxão e o terceiro a uma força de ação a distância, mas nos três a cauda do vetor força está localizada sobre a partícula que representa o objeto.

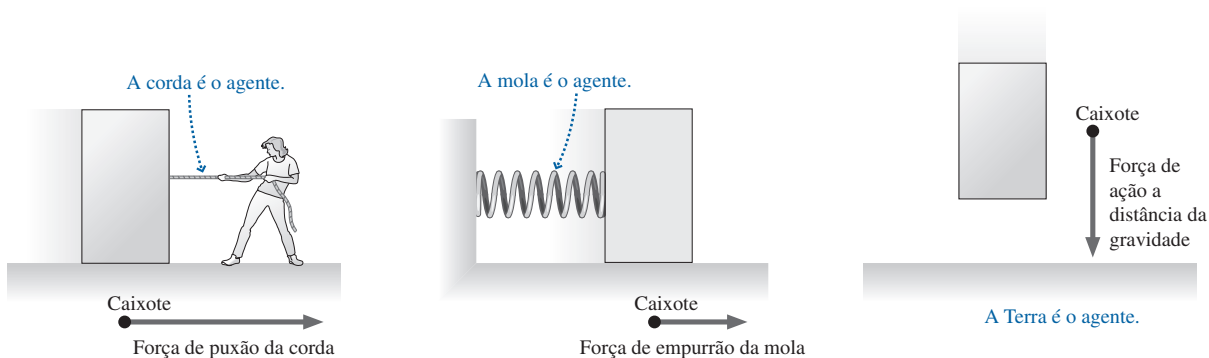


FIGURA 5.1 Três exemplos de forças e suas representações vetoriais.

Combinando forças

A **FIGURA 5.2a** mostra uma caixa sendo puxada por duas cordas, cada qual exercendo uma força sobre a caixa. Como reagirá a caixa? Experimentalmente, constatamos que quando várias forças $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \dots$ são exercidas simultaneamente sobre um corpo, elas se combinam para formar uma **força resultante**, dada pelo vetor soma de *todas* as forças:

$$\vec{F}_{\text{res}} \equiv \sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N \quad (5.1)$$

Recorde-se de que o símbolo \equiv significa “é definido como”. Matematicamente, esta soma é chamada de uma **superposição de forças**. A força resultante às vezes também é chamada de *força total*. A **FIGURA 5.2b** mostra a força resultante sobre a caixa.

PAUSE E PENSE 5.1

Duas das três forças exercidas sobre um objeto são mostradas à esquerda na figura abaixo. A força resultante aponta para a esquerda. Qual das alternativas representa a terceira força exercida?

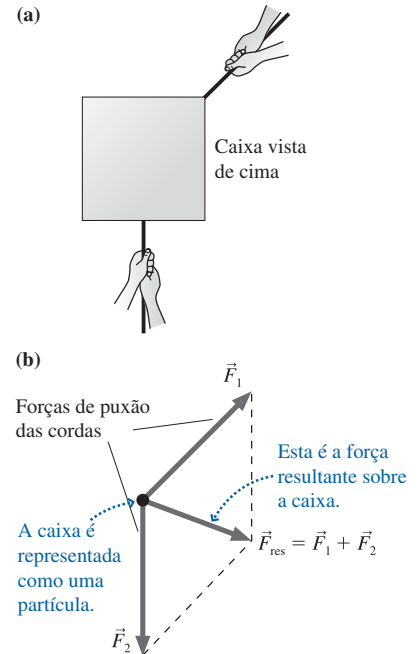
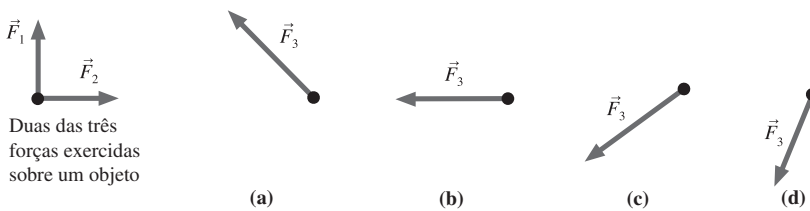


FIGURA 5.2 Duas forças exercidas sobre uma caixa.

5.2 Um curto catálogo de forças

Existem muitas forças com as quais trabalharemos repetidas vezes. Esta seção o introduzirá a algumas delas. Muitas dessas forças possuem símbolos especiais. Quando você estudar as principais forças, deverá memorizar o símbolo usado para cada uma delas.

Gravidade

Uma pedra em queda é puxada para baixo pela Terra através da força de ação a distância da gravidade. A gravidade — o único tipo de força de ação a distância que encontraremos nos próximos capítulos — mantém você sobre uma cadeira, mantém os planetas em suas órbitas em torno do Sol e determina a forma da estrutura de larga escala do universo. Veremos a gravidade mais detalhadamente no Capítulo 13. Por ora, nos concentraremos em corpos sobre a superfície da Terra ou próximos dela (ou de outro planeta).

O puxão gravitacional de um planeta sobre um corpo em sua superfície ou próximo dela é chamada de **força gravitacional**. O agente da força gravitacional é o *planeta inteiro* que puxa o objeto. A gravidade é exercida sobre *todos* os corpos, estejam eles se movendo ou parados. O símbolo para a força gravitacional é \vec{F}_G . O vetor força gravitacional sempre aponta verticalmente para baixo, como ilustrado na **FIGURA 5.3**.

NOTA ► Frequentemente nos referiremos ao “peso” de um objeto. Para um corpo em repouso sobre a superfície de um planeta, seu peso é, simplesmente, o módulo F_G da força gravitacional. Todavia, peso e força gravitacional não são a mesma coisa, assim como peso não é a mesma coisa que a massa. Examinaremos a massa mais adiante neste capítulo, e exploraremos as ligações sutis entre a gravidade, o peso e a massa no Capítulo 6. ◀

Força elástica de uma mola

As molas exercem uma das forças de contato mais comuns. Uma mola pode empurrar (quando comprimida) ou puxar (quando esticada). A **FIGURA 5.4** mostra a **força elástica**, para a qual usaremos o símbolo F_{elast} . Em ambos os casos, empurrando ou puxando, a cauda do vetor força está localizada sobre a partícula no diagrama de força.

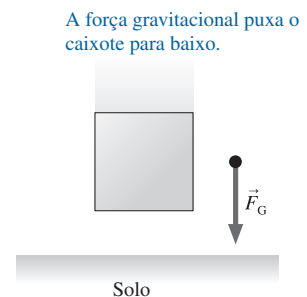
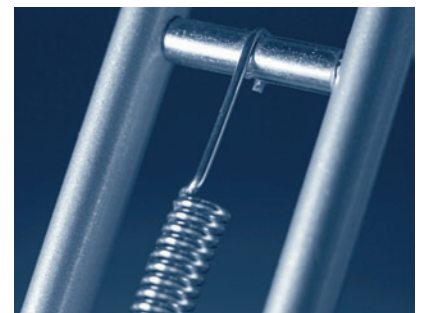


FIGURA 5.3 Gravidade.



Uma mola esticada exerce uma força sobre um objeto em contato com ela.

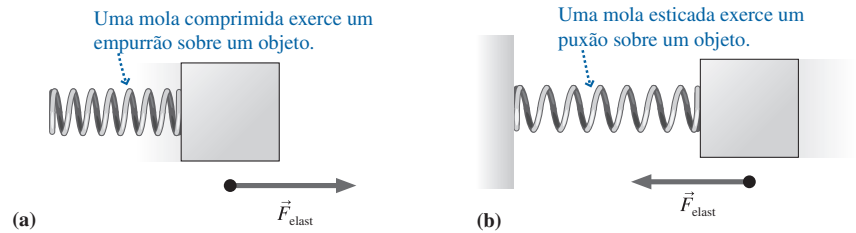


FIGURA 5.4 A força elástica de uma mola.

Embora você possa estar pensando em uma mola como um uma espiral metálica que pode ser esticada ou comprimida, isto é somente um tipo de mola. Segure pelas extremidades uma régua de madeira, ou qualquer outro pedaço fino de madeira ou metal, e dobre-a ligeiramente. Ela flexiona. Quando você a libera, ela retorna á forma original. Isso é exatamente o que uma mola de espiral metálica faz.

Força de tensão

Quando um barbante, uma corda ou um arame puxa um objeto, ele exerce uma força de contato que chamamos de **força de tensão**, representada pela letra maiúscula \vec{T} . A orientação da força de tensão é a mesma do barbante ou da corda, como se pode ver na FIGURA 5.5. A referência usual à “tensão” em um barbante é uma maneira informal de expressar o que se denota por T , o tamanho ou módulo da força de tensão.

NOTA ► A tensão é representada pelo símbolo T . Isso é lógico, mas existe o risco de se confundir o símbolo T da tensão com o símbolo T de período do movimento circular. O número de símbolos usados em ciência e engenharia excede em muito o número de letras do alfabeto latino. Mesmo tomando emprestadas as letras do alfabeto grego, os cientistas inevitavelmente acabam usando algumas letras diversas vezes para representar grandezas inteiramente diferentes. O uso de T é a primeira ocorrência deste problema, mas não será a última. Você deve ficar alerta para o *contexto* em que um símbolo é usado para poder deduzir seu significado. ◀



FIGURA 5.5 Tensão.

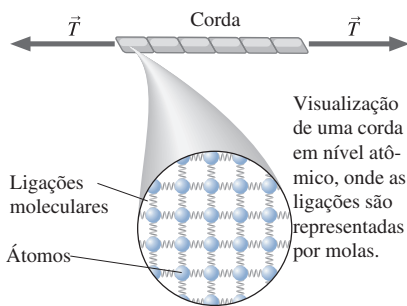


FIGURA 5.6 Um modelo atômico da tensão.

Se usássemos um microscópio muito poderoso para olhar o interior de uma corda, “veríamos” que ela é formada por *átomos* mantidos juntos por meio de *ligações atômicas*. As ligações atômicas não são conexões rígidas entre átomos. Elas se parecem mais com minúsculas *molas* mantendo os átomos juntos, como na FIGURA 5.6. Puxando-se as extremidades de um barbante ou de uma corda, estica-se ligeiramente as molas atômicas. A tensão dentro da corda e a força de tensão experimentada por um objeto em contato com uma das extremidades da corda são, de fato, a força resultante exercida por bilhões e bilhões de molas microscópicas.

Esta visão da tensão em escala atômica introduz uma nova idéia: a de um **modelo atômico** microscópico para a compreensão do comportamento e das propriedades dos objetos macroscópicos. Trata-se de um *modelo* porque átomos e ligações atômicas não são, realmente, pequenas bolas e molas. Estamos usando conceitos macroscópicos — bolas e molas — para entender fenômenos em escala atômica que não podemos ver ou sentir diretamente. Este é um bom modelo para explicar as propriedades elásticas dos materiais, mas ele não seria necessariamente um bom modelo para explicar outros fenômenos. Com frequência usaremos modelos atômicos para obter uma compreensão mais profunda do que observamos.

Força normal

Se você sentar em um colchão de molas, estas serão comprimidas e, em consequência disso, exercerão uma força orientada para cima sobre você. Molas mais duras sofreriam menor compressão, mas ainda assim exerceriam forças orientadas para cima. Pode ser que a compressão de molas extremamente duras seja mensurável apenas por instrumentos sensíveis. Apesar disso, as molas seriam comprimidas ainda que ligeiramente e exerceriam uma força orientada para cima sobre você.

A **FIGURA 5.7** mostra um objeto estacionário sobre o tampo duro de uma mesa. A mesa pode não flexionar ou encurvar visivelmente, mas — da mesma forma como você fez com o colchão de molas — o objeto comprime as molas atômicas da mesa. O tamanho da compressão é muito pequeno, mas não é nulo. Como consequência, as molas atômicas comprimidas *empurram para cima* o objeto. Dizemos que “a mesa” exerce uma força para cima, mas é importante que se compreenda que o empurrão é, *de fato*, realizado pelas molas atômicas que o mantêm íntegro e, conseqüentemente, o solo empurra o objeto para cima.

Podemos ampliar esta idéia. Suponha que você encoste sua mão sobre uma parede e a empurre, como ilustrado na **FIGURA 5.8**. A parede exercerá uma força sobre sua mão? Quando você empurra, comprime as molas atômicas da parede e, como consequência, elas empurram sua mão de volta. Logo, a resposta é sim, a parede realmente exerce uma força sobre você.

A força exercida pelo tampo da mesa é vertical; a força que a parede exerce é horizontal. Em todos os casos, a força exercida sobre um objeto que pressiona uma superfície tem uma direção perpendicular à superfície. Os matemáticos se referem a uma reta que é *perpendicular* a uma superfície como sendo *normal* a esta. Mantendo esta terminologia, definimos a **força normal** como aquela exercida por uma superfície (o agente) contra um objeto que a está pressionando. O símbolo para a força normal será \vec{n} .

Não estamos empregando a palavra normal para significar que se trata de uma força “comum” ou para diferenciá-la de uma “força anormal”. Uma superfície exerce uma força *perpendicular* (i.e., normal) a si mesma quando as molas atômicas empurram *para fora*. A **FIGURA 5.9** mostra um objeto sobre uma superfície plana inclinada, uma situação inteiramente comum. Note que a força normal \vec{n} é perpendicular à superfície.

Gastamos um bocado de tempo descrevendo a força normal porque muitas pessoas levam tempo para entendê-la. A força normal é uma força real que surge da compressão real das ligações atômicas. Ela é, em essência, uma força elástica de uma mola, mas exercida por um número enorme de molas microscópicas agindo juntas. A força normal é responsável pela “solidez” dos corpos sólidos. É ela que impede você de atravessar direto através da cadeira onde está sentado e é ela que causa dor e que o machuca quando você bate sua cabeça em uma porta. Sua cabeça pode, então, dizer-lhe que a força exercida sobre ela pela porta é bem real!

Força de atrito

Certamente você já observou que um objeto rolando ou escorregando, se não for empurrado ou propelido, desacelera até parar. Provavelmente você já descobriu que pode deslizar mais sobre uma camada de gelo do que sobre o asfalto. Você também sabe que a maioria dos objetos ficam parados sobre uma mesa, sem deslizar para fora dela, mesmo se a mesa não estiver perfeitamente nivelada. A força responsável por este tipo de comportamento é o **atrito**. O símbolo para o atrito é a letra minúscula \vec{f} .

O atrito, como a força normal, é exercido por uma superfície. Mas enquanto a força normal é perpendicular à superfície, a força de atrito é sempre *tangente* à superfície. Ao nível microscópico, o atrito surge quando os átomos do objeto e da superfície movem-se uns em relação aos outros. Quanto mais rugosa for a superfície, mais estes átomos serão forçados a se aproximar e, como resultado, surgirá uma grande força de atrito. No próximo capítulo, desenvolveremos um modelo simples para o atrito que será suficiente para nossas necessidades. Por ora, é útil distinguir entre dois tipos de atrito:

- O **atrito cinético**, denotado por \vec{f}_c , aparece quando um objeto desliza ao longo de uma superfície. É uma força “oposta ao movimento”, o que significa que o vetor força de atrito \vec{f}_c tem sentido oposto ao do vetor velocidade \vec{v} (i.e., “o movimento”).
- O **atrito estático**, denotado por \vec{f}_e , é a força que mantém um objeto “grudado” sobre uma superfície e que o impede de se mover. Determinar a orientação de \vec{f}_e é um pouco mais complicado do que encontrar a de \vec{f}_c . O atrito estático aponta no sentido oposto àquele em que o objeto se *movimentaria* se não existisse o atrito, ou seja, ele tem a orientação necessária para *impedir* a ocorrência do movimento.

A **FIGURA 5.10** mostra exemplos de atrito cinético e estático.

NOTA ► Uma superfície exerce uma força de atrito cinético quando um objeto se move *em relação* à superfície. Uma mala sobre uma esteira rolante encontra-se em movimento, mas não experimenta uma força de atrito cinético por não estar se movimentan-

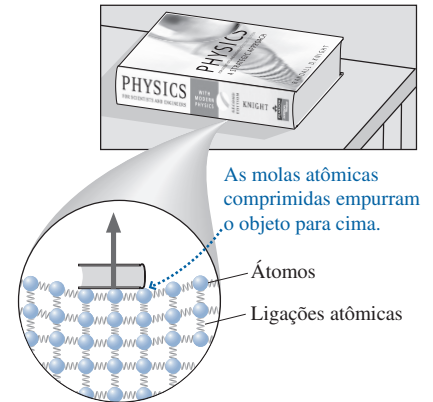


FIGURA 5.7 Um modelo atômico da força exercida por uma mesa.

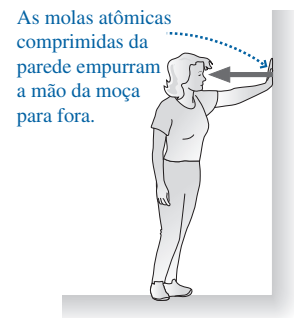


FIGURA 5.8 A parede empurra para fora.

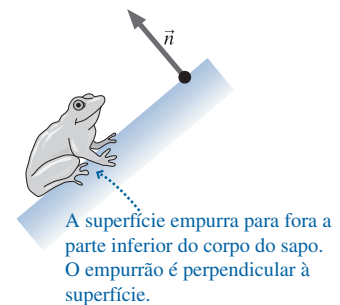


FIGURA 5.9 A força normal.

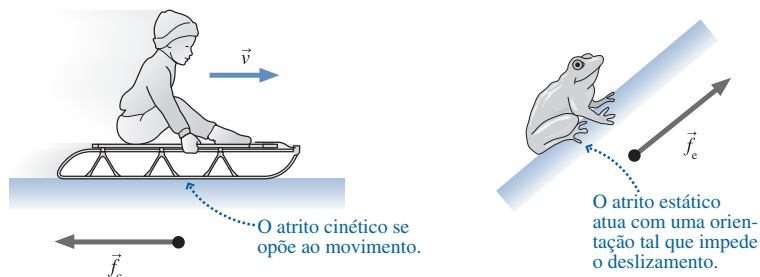


FIGURA 5.10 Atritos cinético e estático.

A resistência do ar é uma força significativa no caso da queda de folhas. Ela aponta em sentido oposto ao do movimento.

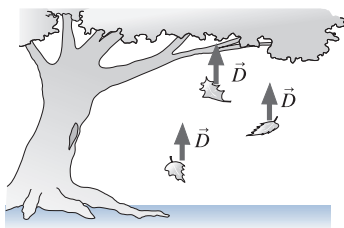


FIGURA 5.11 A resistência do ar é um exemplo de força de arraste.

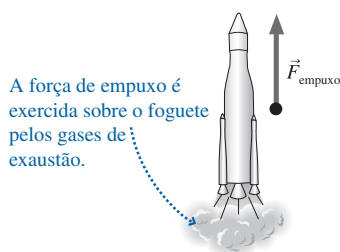


FIGURA 5.12 A força de empuxo de um foguete.

do em relação à esteira. Para sermos precisos, deveríamos dizer que a força de atrito cinético tem sentido oposto ao do movimento de um objeto *com relação* à superfície. ◀

Força de arraste

A força de atrito em uma superfície é um exemplo de *força de resistência* ou *resistiva*, uma força que se opõe ou resiste ao movimento. Forças resistivas também são experimentadas por objetos que se movem no interior de um fluido — um gás ou um líquido. A força resistiva de um fluido é chamada de **força de arraste** e simbolizada por \vec{D} (D de *drag*, que quer dizer arraste). A força de arraste, como o atrito cinético, tem sentido oposto ao do movimento. A FIGURA 5.11 mostra um exemplo de força de arraste.

A força de arraste pode ser grande para objetos que se movem com altas velocidades ou em fluidos densos. Mantenha sua mão fora da janela de seu carro em movimento e sinta a resistência do ar contra ela quando a velocidade do carro aumenta rapidamente. Solte um objeto leve em uma bacia com água e observe como ele afunda até o fundo. Em ambos os casos, a força de arraste é muito significativa.

Para objetos pesados e compactos, movendo-se no ar e com velocidade não muito grande, a força de arraste do ar é muito pequena. Para manter as coisas tão simples quanto possível, **você pode desprezar a resistência do ar em todos os problemas a menos que lhe seja pedido explicitamente para incluí-la.** O erro introduzido nos cálculos por esta aproximação geralmente é muito pequeno. Este livro não abordará o caso de objetos se movendo em líquidos.

Força de empuxo

Durante a decolagem, um avião a jato obviamente é impulsionado para a frente por uma força. Da mesma forma ocorre com o foguete mostrado durante o lançamento na FIGURA 5.12. Esta força, chamada de **empuxo**, ocorre quando o motor de um jato ou de um foguete expelle moléculas de gás em altas velocidades. O empuxo é uma força de contato, com os gases da exaustão correspondendo ao agente que empurra o motor. O processo pelo qual o empuxo é gerado é bastante sutil, e adiaremos sua discussão até que estudemos a terceira lei de Newton no Capítulo 7. Por ora, abordaremos o empuxo como sendo uma força de sentido contrário ao dos gases expelidos. Não existe um símbolo especial para o empuxo, de modo que o denotaremos por \vec{F}_{empuxo} .

Forças elétricas e magnéticas

A eletricidade e o magnetismo, como a gravidade, exercem forças de ação a distância. As forças elétricas e magnéticas são exercidas sobre partículas eletricamente carregadas. Estudaremos as forças elétricas e magnéticas detalhadamente na Parte VI deste livro. Por ora, não é relevante que as forças que mantêm juntas as moléculas — ligações moleculares — não sejam realmente como as de pequenas molas. Os átomos e as moléculas são constituídos de partículas carregadas — elétrons e prótons —, e o que chamamos de ligação molecular é realmente uma força elétrica entre tais partículas. Assim, quando dissermos que a força normal e a força de tensão devem-se a “molas atômicas” ou que o atrito se deve ao movimento de uns átomos sobre os outros, o que realmente estaremos querendo expressar é que estas forças, no nível mais fundamental são, de fato, forças elétricas entre as partículas carregadas no interior dos átomos.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.