

Finalmente, existe a **interação fraca**. Ela não desempenha nenhum papel direto na matéria ordinária, mas é de importância vital em interações entre as partículas fundamentais. A interação fraca é responsável por uma forma comum de radioatividade denominada decaimento beta, no qual um nêutron de um núcleo radioativo se transforma em um próton libertando um elétron e uma partícula essencialmente sem massa chamada antineutrino. A interação fraca entre um antineutrino e a matéria ordinária é tão débil que um antineutrino poderia atravessar facilmente uma parede de chumbo com espessura de um milhão de quilômetros! Entretanto, quando uma estrela gigante sofre uma explosão cataclísmica chamada supernova, a maior parte da energia é liberada por meio da interação fraca (Figura 5.38d).

Na década de 1960 foi desenvolvida uma teoria que unifica a interação fraca com a interação eletromagnética, formando uma interação *eletrofraca*. Essa teoria passou por todos os testes a que foi submetida. O sucesso dessa iniciativa incentivou físicos a fazerem tentativas semelhantes no sentido de unificar a interação forte com a interação fraca e com a interação eletromagnética; essas tentativas são conhecidas pela sigla GUT (iniciais de *grand unified theory*, que significa *teoria da grande unificação*). Também já foram dados os primeiros passos para uma possível unificação geral de todas as interações englobando-as na TOE (iniciais de *theory of everything*, que significa *teoria de todas as coisas*). Tais teorias são especulativas; existem ainda muitas questões sem resposta nesta área fértil da pesquisa atual.

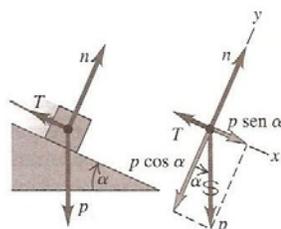
Resumo

Uso da primeira lei de Newton: quando um corpo está em equilíbrio em um sistema de referência inercial, a soma vetorial das forças que atuam sobre ele é igual a zero (primeira lei de Newton). O diagrama do corpo livre é essencial para identificar as forças que atuam sobre o corpo. A terceira lei de Newton (ação e reação) é também geralmente necessária em problemas de equilíbrio. As duas forças de um par de ação e reação nunca atuam sobre o mesmo corpo (exemplos 5.1–5.5).

A força normal exercida sobre um corpo por uma superfície nem sempre é igual ao peso do corpo (Exemplo 5.3).

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (\text{forma vetorial}) \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \end{aligned} \quad (\text{forma dos componentes}) \quad (5.2)$$



Uso da segunda lei de Newton: quando a soma vetorial das forças que atuam sobre um corpo não é igual a zero, o corpo possui uma aceleração dada pela segunda lei de Newton.

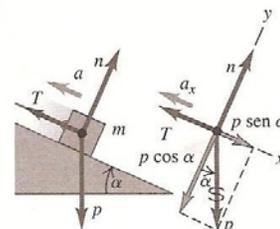
Como no caso dos problemas envolvendo equilíbrio, o diagrama do corpo livre é essencial para a solução de problemas envolvendo a segunda lei de Newton, e a força normal exercida sobre um corpo nem sempre é igual ao seu peso (exemplos 5.6–5.12).

Forma vetorial:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (5.3)$$

Forma dos componentes:

$$\sum F_x = ma_x \quad \sum F_y = ma_y \quad (5.4)$$



Atrito e a resistência de um fluido: a força de contato entre dois corpos pode sempre ser representada em termos de uma força normal \vec{n} perpendicular à superfície de interação e de uma força de atrito \vec{f} paralela a essa superfície.

Quando um corpo está deslizando sobre uma superfície, a força de atrito é chamada de força *cinética*. Seu módulo, f_c é aproximadamente proporcional a n , e a constante de proporcionalidade é μ_c , o coeficiente de atrito cinético. Quando *não* há movimento relativo a uma superfície, a força de atrito é chamada de *estática*. A força de atrito *máxima* é aproximadamente proporcional à força normal. A constante de proporcionalidade é μ_s , o coeficiente de atrito estático. A força de atrito estático *real* deve estar compreendida entre zero e seu valor máximo, dependendo da situação. Geralmente μ_c é menor do que μ_s para um dado par de superfícies (exemplos 5.12–5.17).

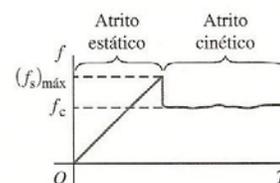
O atrito de rolamento é semelhante ao atrito cinético, mas a força da resistência de um fluido depende da velocidade escalar de um objeto que atravessa o fluido (exemplos 5.18 e 5.19).

Módulo de força de atrito cinético:

$$f_c = \mu_c n \quad (5.5)$$

Módulo de força de atrito estático:

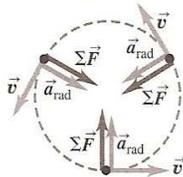
$$f_s \leq \mu_s n \quad (5.6)$$



Forças em movimento circular: em um movimento circular uniforme, o vetor aceleração é dirigido para o centro do círculo e

possui módulo v^2/R . O movimento é governado pela segunda lei de Newton, $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$. (exemplos 5.20–5.24).

$$a_{\text{rad}} = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \quad (5.14), (5.16)$$



Principais termos

- arraste do ar, 154
- coeficiente de atrito cinético, 149
- coeficiente de atrito estático, 150
- coeficiente de atrito de rolamento, 153
- força de atrito, 149
- força de atrito cinético, 149
- força de atrito estático, 150
- interações eletromagnéticas, 163
- interação forte, 164
- interação fraca, 164
- interações gravitacionais, 163
- peso aparente, 144
- resistência de um fluido, 154
- velocidade terminal, 155

Resposta à Pergunta Inicial do Capítulo

Nenhuma delas; a força de baixo para cima do ar possui o *mesmo* módulo que a força da gravidade. Embora o pássaro esteja alcançando vôo, sua velocidade vertical é constante e, portanto, sua aceleração vertical é igual a zero. Por isso, a força resultante vertical sobre o pássaro deve também ser zero, e as forças verticais individuais devem se equilibrar.

Respostas às Perguntas dos Testes de Compreensão

- 5.1 Resposta: (ii)** Os dois cabos estão agrupados simetricamente, portanto a tensão em qualquer dos cabos tem o mesmo módulo T . O componente vertical da tensão de cada cabo é $T \sin 45^\circ$ (ou, de forma equivalente, $T \cos 45^\circ$). Então, de acordo com a primeira lei de Newton aplicada às forças verticais, $2T \sin 45^\circ - p = 0$. Logo, $T = p / (2 \sin 45^\circ) = p / \sqrt{2} = 0,71p$. Cada cabo suporta metade do peso do semáforo, mas a tensão é maior do que $p/2$ porque somente o componente vertical da tensão se contrapõe ao peso.
- 5.2 Resposta: (ii)** Seja qual for a velocidade instantânea do cavaleiro, sua aceleração é constante e possui o valor encontrado no Exemplo 5.12. Analogamente, a aceleração de um corpo em queda livre é a mesma, esteja ele subindo, descendo ou no ponto mais alto do seu movimento (Seção 2.5).

5.3 Respostas para (a): (i), (iii); respostas para (b): (ii), (iv); resposta para (c): (v). Nas situações (i) e (iii) a caixa não está acelerando (portanto a força resultante sobre ela deve ser igual a zero) e não há nenhuma outra força atuando em paralelo à superfície horizontal; então nenhuma força de atrito se faz necessária para evitar o deslizamento. Nas situações (ii) e (iv), a caixa começaria a deslizar pela superfície, caso nenhum atrito estivesse presente e, por isso, um atrito estático deve atuar para impedir isso. Na situação (v), a caixa está deslizando sobre uma superfície áspera, portanto uma força de atrito cinético atua sobre ela.

5.4 Resposta: (iii) Um satélite de massa m orbitando a Terra à velocidade escalar v em uma órbita de raio r possui uma aceleração de módulo v^2/r , de modo que a força resultante atuando sobre ele a partir da gravidade terrestre possui módulo $F = mv^2/r$. Quanto mais distante o satélite estiver da Terra, maior o valor de r , menor o valor de v e portanto menores os valores de v^2/r e de F . Em outras palavras, a força gravitacional da Terra diminui com o aumento da distância.

Questões para discussão

- Q5.1** Um homem está sentado em um assento suspenso por uma corda. A corda passa por uma polia presa ao teto e o homem segura a outra extremidade da corda. Qual é a tensão na corda e que força o assento exerce sobre o homem? Desenhe um diagrama do corpo livre para o homem.
- Q5.2** ‘Em geral, a força normal não é igual ao peso.’ Dê um exemplo em que os módulos dessas duas forças são iguais e pelo menos dois exemplos em que os módulos dessas duas forças não são iguais.
- Q5.3** Uma corda para secar roupas é amarrada entre dois postes. Por mais que você estique a corda, ela sempre fica com uma concavidade no centro. Explique por quê.
- Q5.4** Um carro se desloca com velocidade constante subindo uma montanha íngreme. Discuta as forças que atuam sobre o carro. O que empurra o carro para cima da montanha?
- Q5.5** Por razões médicas, é importante que um astronauta determine sua massa em intervalos de tempo regulares. Descreva um modo de medir massas em um ambiente com peso aparente igual a zero.
- Q5.6** Quando você empurra uma caixa para cima de uma rampa, a força que você exerce empurrando horizontalmente é maior ou menor do que a força que você exerce empurrando paralelamente ao plano da rampa? Por quê?
- Q5.7** Ao deixar cair sua bolsa em um elevador, a mulher nota que a bolsa não atinge o piso do elevador. Como o elevador está se movendo?
- Q5.8** As balanças para pesar objetos são classificadas como as que usam molas e as que usam massas padrão para equilibrarem as massas desconhecidas. Qual tipo de balança fornece medidas mais precisas em uma nave espacial? E sobre a superfície da Lua?
- Q5.9** Quando você aperta uma porca em um parafuso, como você está aumentando a força de atrito? Como funciona uma arruela de aperto?
- Q5.10** Um bloco está em repouso sobre um plano inclinado que possui atrito suficiente para impedir seu deslizamento para baixo.