



Seu guia em Português simples para tudo, desde a relatividade até as supernovas!

Física

PARA

LEIGOS[®]

FOR
DUMMIES[™]

Steven Holzner, PhD
Ex-professor de Física, Cornell University

Tornando tudo mais fácil!

Equações e fórmulas importantes da Física

A Física está repleta de equações e fórmulas. Eis uma lista completa de algumas — organizadas por tópico — para que você não tenha que pesquisar para encontrá-las. Veja os capítulos individuais do livro para saber mais!

Movimento angular

- ✓ $\omega = \Delta\theta \div \Delta t$
- ✓ $\alpha = \Delta\omega \div \Delta t$
- ✓ $\theta = \omega_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}\alpha(t_f - t_0)^2$
- ✓ $\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$
- ✓ $s = r\theta$
- ✓ $v = r\omega$
- ✓ $a = r\alpha$
- ✓ $a_c = v^2 \div r$
- ✓ $F_c = mv^2 \div r$

Eletricidade e magnetismo

- ✓ $F = kq_1q_2 \div r^2$
- ✓ $E = F \div q$
- ✓ $W = qV$
- ✓ $C = k\epsilon_0 A \div s$
- ✓ $E = \frac{1}{2}CV^2$
- ✓ $V = IR$
- ✓ $P = IV = V^2 \div R = I^2R$
- ✓ $B = F \div qvB \sin \theta$
- ✓ $F = qvB \sin \theta$
- ✓ $r = mv \div qB$
- ✓ $F = ILB \sin \theta$

Forças

- ✓ $\Sigma F = ma$
- ✓ $F_f = \mu F_N$

Gravidade

- ✓ $F = G m_1 m_2 \div r^2$

Campo magnético em circuito fechado

- ✓ $B = N(\mu_0 I \div 2R)$

Campo magnético em solenoide

- ✓ $B = \mu_0 nI$
- ✓ $V_{rms} = I_{rms} Z$

Campo magnético em fio elétrico

- ✓ $B = \mu_0 I \div 2\pi r$

Espelhos e lentes

- ✓ $1 \div d_o + 1 \div d_i = 1 \div f$
- ✓ $m = -d_i \div d_o$

Momentos de inércia

- ✓ Disco girando em torno de seu centro: $I = \frac{1}{2}mr^2$
- ✓ Cilindro côncavo girando em torno de seu centro: $I = mr^2$
- ✓ Esfera côncava: $I = \frac{2}{3}mr^2$
- ✓ Aro girando em torno de seu centro: $I = mr^2$
- ✓ Massa pontual girando no raio r : $I = mr^2$
- ✓ Retângulo girando na margem de um eixo: $I = \frac{1}{3}mr^2$
- ✓ Retângulo girando em torno de um eixo paralelo a uma margem e passando pelo centro: $I = \frac{1}{12}mr^2$
- ✓ Haste girando em torno de um eixo perpendicular a ela e através de seu centro: $I = \frac{1}{12}mr^2$
- ✓ Haste girando em torno de um eixo perpendicular a ela e através de uma extremidade: $I = \frac{1}{3}mr^2$
- ✓ Cilindro sólido: $I = \frac{1}{2}mr^2$
- ✓ $E_c = \frac{1}{2}I\omega^2$
- ✓ $L = I\omega$
- ✓ $F = -kx$
- ✓ $T = 2\pi \div \omega$

Movimento

- ✓ $v = \Delta x \div \Delta t = (x_f - x_0) \div (t_f - t_0)$
- ✓ $a = \Delta v \div \Delta t = (v_f - v_0) \div (t_f - t_0)$
- ✓ $s = v_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}a(t_f - t_0)^2$
- ✓ $v_f^2 - v_0^2 = 2as = 2a(x_f - x_0)$

Movimento harmônico simples

- ✓ $x = A \cos \omega t$
- ✓ $v_x = -A\omega \sin \theta$
- ✓ $a = -A\omega^2 \cos \theta$

Termodinâmica

- ✓ $C = 5/9(F - 32)$
- ✓ $F = 9/5(C + 32)$
- ✓ $K = C + 273,15$
- ✓ $Q = cm \Delta T$
- ✓ $Q = (kA\Delta T t) \div L$
- ✓ $Q = e \sigma A t T^4$
- ✓ $PV = nRT$
- ✓ $E_{c\text{média}} = 3/2kT$

Trabalho e energia

- ✓ $W = Fs \cos \theta$
- ✓ $p = mv$
- ✓ $E_c = \frac{1}{2}mv^2$
- ✓ $\tau = Fr \sin \theta$
- ✓ $\Sigma \tau = I\alpha$
- ✓ $I = \Sigma mr^2$

Física Para Leigos®

Folha
de cola

Fatores de conversão entre os sistemas de medida

Esta é uma lista útil para ajudar na conversão entre os sistemas de medida que expressam quantidades físicas. Tenha sempre por perto para resolver problemas com medidas.

- ✓ 1 metro (m) = 100 centímetros (cm) = 1.000 milímetros (mm)
- ✓ 1 quilômetro (km) = 1.000 m
- ✓ 1 quilograma (kg) = 1.000 gramas (g)
- ✓ 1 Newton (N) = 10^5 dinas
- ✓ 1 Tesla (T) = 10^4 Gauss (G)
- ✓ 1 polegada (pol) = 2,54 cm
- ✓ 1 m = 39,37 pol
- ✓ 1 milha = 5.280 (ft) = 1,609 km
- ✓ 1 angstrom (Å) = 10^{-10} m
- ✓ 1 libra-massa (sistema FPI) = 14,59 kg
- ✓ 1 unidade de massa atômica (u.m.a) = $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
- ✓ 1 libra (lb) = 4,448 N
- ✓ 1 N = 10^5 dinas
- ✓ 1 N = 0,2248 lb
- ✓ 1 J = 10^7 ergs
- ✓ 1 J = 0,7376 pés-lb
- ✓ 1 Unidade Térmica Inglesa (BTU) = 1.055 J
- ✓ 1 quilowatt-hora (kWh) = $3,600 \times 10^6$ J
- ✓ 1 elétron-volt (eV) = $1,602 \times 10^{-19}$ J
- ✓ 1 cavalo-vapor (hp) = 550 pés-lb/segundos
- ✓ 1 watt (W) = 0,7376 pés-lb/s

Constantes físicas

As constantes físicas são quantidades físicas com valores numéricos fixos, como, por exemplo, a velocidade da luz ou a massa de um elétron. A seguinte lista contém as constantes mais comuns.

- ✓ Número de Avogadro: $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- ✓ Constante de Boltzmann: $k = 1,380 \times 10^{-23}$ J/K
- ✓ Constante de Coulomb: $k = 8,99 \times 10^9$ N-m²/C²
- ✓ Carga do elétron: $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C
- ✓ Permeabilidade do espaço livre: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T-m/A
- ✓ Permissividade do espaço livre: $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ C²/(N-m)²
- ✓ Massa do elétron: $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$ kg
- ✓ Massa do próton: $m_p = 1,672 \times 10^{-27}$ kg
- ✓ Velocidade da luz: $c = 2,997 \times 10^8$ m/s
- ✓ Constante gravitacional: $G = 6,672 \times 10^{-11}$ N-m²/kg²
- ✓ Constante do gás: $R = 8,314$ J/(mol-K)

Copyright © 2008 Editora Alta Books
Rua Viúva Cláudio, 291 – Jacaré
Rio de Janeiro – RJ
CEP: 20970-031
Tels: 21 3278-8069/8419
Email: altabooks@altabooks.com.br
Site: www.altabooks.com.br

Para Leigos: A série de livros para iniciantes que mais vende no mundo.

Física

PARA

LEIGOS[®]

Física
PARA
LEIGOS®

Por Steven Holzner



ALTA BOOKS
E D I T O R A

Rio de Janeiro, 2011

Física Para Leigos, Copyright © 2010 da Starlin Alta Con. Com. Ltda.
ISBN 978-85-7608-243-9

Produção Editorial:
Starlin Alta Con. Com. Ltda

Gerência de Produção:
Anderson da Silva Viera

Supervisão de Produção:
Angel Cabeza

Tradução:
Eveline Vieira Machado

Revisão Gramatical:
Karina Gerke

Revisão Técnica:
Daniela Nanni

William Konnai

Diagramação:
Abreu's

Fechamento:
Sergio Luiz Almeida de Souza

2ª Reimpressão, 2011

Original English language edition Copyright © 2003 by Willey Publishing, Inc. by Steven Holzner. All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form. This translation published by arrangement with Willey Publishing, Inc

Portuguese language edition Copyright © 2010 da Starlin Alta Con. Com. Ltda. All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form. This translation published by arrangement with Willey Publishing, Inc

“**Willey, the Willey Publishing Logo, for Dummies, the Dummies Man** and related trad dress are trademarks or registered trademarks of John Wiley and Sons, Inc. and/or its affiliates in the United States and/ or other countries. Used under license.

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei 9.610 de 19/02/98. Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados: eletrônico, mecânico, fotográfico, gravação ou quaisquer outros.

Todo o esforço foi feito para fornecer a mais completa e adequada informação; contudo, a editora e o(s) autor(es) não assumem responsabilidade pelos resultados e usos da informação fornecida.

Erratas e atualizações: Sempre nos esforçamos para entregar ao leitor um livro livre de erros técnicos ou de conteúdo; porém, nem sempre isso é conseguido, seja por motivo de alteração de software, interpretação ou mesmo quando há alguns deslizes que constam na versão original de alguns livros que traduzimos. Sendo assim, criamos em nosso site, www.altabooks.com.br, a seção *Erratas*, onde relataremos, com a devida correção, qualquer erro encontrado em nossos livros.

Avisos e Renúncia de Direitos: Este livro é vendido como está, sem garantia de qualquer tipo, seja expressa ou implícita.

Marcas Registradas: Todos os termos mencionados e reconhecidos como Marca Registrada e/ou comercial são de responsabilidade de seus proprietários. A Editora informa não estar associada a nenhum produto e/ou fornecedor apresentado no livro. No decorrer da obra, imagens, nomes de produtos e fabricantes podem ter sido utilizados, e, desde, já a Editora informa que o uso é apenas ilustrativo e/ou educativo, não visando ao lucro, favorecimento ou desmerecimento do produto/fabricante.

Impresso no Brasil

O código de propriedade intelectual de 1º de julho de 1992 proíbe expressamente o uso coletivo sem autorização dos detentores do direito autoral da obra, bem como a cópia ilegal do original. Esta prática generalizada, nos estabelecimentos de ensino, provoca uma brutal baixa nas vendas dos livros a ponto de impossibilitar os autores de criarem novas obras.



ALTA BOOKS
E D I T O R A

Rua Viúva Cláudio, 291 - Bairro Industrial do Jacaré
CEP: 20970-031 - Rio de Janeiro – Tel: 21 3278-8069/8419 Fax: 21 3277-1253
www.altabooks.com.br – e-mail: altabooks@altabooks.com.br

Sobre o Autor

Steven Holzner é um autor premiado com 94 livros que venderam mais de dois milhões de cópias e foram traduzidos em 18 idiomas. Trabalhou na faculdade de Física na Cornell University por mais de uma década, ensinando Física 101 e Física 102. Dr. Holzner fez seu doutorado em Física na Cornell e realizou seu trabalho de pós-graduação na MIT, onde também foi membro do corpo docente.

Dedicatória

Para Nancy.

Agradecimentos do Autor

Qualquer livro como este é um trabalho de muitas pessoas além do autor. Gostaria de agradecer à minha editora de aquisições, Stacy Kennedy, e a todas as outras pessoas que contribuíram com o conteúdo do livro, inclusive Natalie Harris, Josh Dials, Joe Breeden e outros. Obrigado a todos.

Sumário Resumido

Introdução 1

Parte I: Colocando a Física em Movimento..... 5

Capítulo 1: Usando a Física para Entender Seu Mundo 7
Capítulo 2: Compreendendo os Fundamentos da Física..... 13
Capítulo 3: Explorando a Necessidade de Velocidade 25
Capítulo 4: Seguindo Direções: Para Qual Caminho Você Está Indo? 43

Parte II: Que as Forças da Física Estejam com Você 61

Capítulo 5: Quando o Empurrão Torna-se Impulso: Força 63
Capítulo 6: Que Resistência: Planos Inclinados e Atrito..... 81
Capítulo 7: Girando em Torno de Movimentos Circulares e Órbitas 99

Parte III: Manifestando a Energia para Trabalhar 117

Capítulo 8: Descobrimos algum trabalho da Física..... 119
Capítulo 9: Colocando Objetos em Movimento: Quantidade de Movimento e Impulso..... 137
Capítulo 10: Enrolando com a Cinética Angular 153
Capítulo 11: Circule e Circule com a Dinâmica Rotacional..... 173
Capítulo 12: Molas: Movimento Harmônico Simples..... 189

Parte IV: Formulando as Leis da Termodinâmica 205

Capítulo 13: Aumentando o Calor com a Termodinâmica..... 207
Capítulo 14: Aqui, Pegue Meu Casaco: Transferência de Calor em Sólidos e Gases..... 219
Capítulo 15: Quando o Calor e o Trabalho Colidem: As Leis da Termodinâmica 235

Parte V: Descobrimos a Carga da Eletricidade e do Magnetismo 251

Capítulo 16: Movendo com a Eletricidade Estática 253
Capítulo 17: Dando um Empurrão aos Elétrons com Circuitos..... 271
Capítulo 18: Magnetismo: Mais do que uma Atração..... 287
Capítulo 19: Mantendo a Corrente com a Voltagem 305
Capítulo 20: Colocando Alguma Luz Sobre Espelhos e Lentes 323

<i>Parte VI: A Parte dos Dez</i>	339
Capítulo 21: Dez Critérios Surpreendentes sobre a Relatividade.....	341
Capítulo 22: Dez Teorias Extraordinárias da Física.....	349
<i>Glossário</i>	355
<i>Índice Remissivo</i>	361

Sumário

Introdução 1

Sobre Este Livro.....	1
Convenções Utilizadas Neste Livro.....	2
O Que Você Não Deve Ler.....	2
Suposições Malucas	2
Como este Livro está Organizado.....	2
Parte I: Colocando a Física em Movimento	3
Parte II: Que as Forças da Física Estejam com Você	3
Parte III: Manifestando a Energia para Trabalhar	3
Parte IV: Formulando as Leis da Termodinâmica.....	3
Parte V: Descobrimo a Carga da Eletricidade e do Magnetismo	3
Parte VI: A Parte dos Dez.....	4
Ícones Usados Neste Livro	4
Aonde Ir a Partir Daqui	4

Parte I: Colocando a Física em Movimento..... 5

Capítulo 1: Usando a Física para Entender Seu Mundo 7

O que é Física.....	7
Observando Objetos em Movimento.....	8
Absorvendo a Energia à Sua Volta.....	9
Sentindo-se Quente, mas Não Incomodado	10
Lidando com Cargas e Ímãs.....	10
Preparando-se para o Extraordinário, Física Extraordinária Chegando	11

Capítulo 2: Compreendendo os Fundamentos da Física 13

Não tenha Medo, é Apenas Física.....	13
Medindo o Mundo à Sua Volta e Fazendo Previsões.....	15
Não misture e combine: Mantenha as unidades físicas corretas	16
Dos metros às polegadas e de volta: Convertendo entre as unidades	17
Eliminando Alguns Zeros: Usando a Notação Científica.....	20
Verificando a Precisão das Medidas.....	21
Sabendo quais dígitos são significantes	21
Estimando a precisão	22
Armando-se com a Álgebra Básica.....	23
Trabalhando com um Pouco de Trigonometria	23



Capítulo 3: Explorando a Necessidade de Velocidade 25

Dissecando o Deslocamento	26
Examinando eixos	27
Medindo a velocidade	28
Particularidades da Velocidade: O que é Velocidade, Afinal?	29
Lendo o velocímetro: Velocidade instantânea	30
Ficando firme: Velocidade uniforme	30
Desviando para frente e para trás: Movimento não uniforme	30
Disparando o cronômetro: Velocidade média	31
Opondo velocidade média <i>versus</i> movimento uniforme	31
Aumentando a Velocidade (ou Diminuindo): Aceleração	33
Definindo aceleração	33
Determinando as unidades da aceleração	33
Aceleração positiva e negativa	35
Aceleração média e instantânea	36
Aceleração uniforme e não uniforme	37
Relacionando Aceleração, Tempo e Deslocamento	37
Relações não tão distantes	38
Comparando situações mais rápidas	39
Relacionando Velocidade, Aceleração e Deslocamento	40

**Capítulo 4: Seguindo Direções: Para Qual Caminho Você
Está Indo? 43**

Conquistando os Vetores	43
Pedindo direções: Fundamentos do vetor	44
Reunindo as direções: Adicionando vetores	45
Separando a distância: Subtraindo vetores	46
Colocando Números nos Vetores	47
Dividindo Vetores em Componentes	49
Encontrando os componentes do vetor dados as grandezas e os ângulos	49
Encontrando grandezas e ângulos dados os componentes do vetor	51
Revelando as Identidades dos Vetores	53
O deslocamento é um vetor	54
A velocidade é outro vetor	55
Aceleração: Sim, outro vetor	55
Deslizando no Arco-Íris da Gravidade: Um Exercício de Velocidade	57

Parte II: Que As Forças da Física Estejam Com Você 61

Capítulo 5: Quando o Empurrão Torna-se Impulso: Força 63

Forçando o Problema	63
Para seu Primeiro Truque, a Primeira Lei do Movimento de Newton	64
Continuando: Inércia e massa	65
Medindo a massa	65
Senhoras e Senhores, a Segunda Lei do Movimento de Newton	66
Nomeando as unidades da força	67
Reunindo as forças resultantes	67
Grand Finale de Newton: A Terceira Lei do Movimento	72

A tensão não deve causar torcicolos: Atrito na terceira lei de Newton	73
Analisando os ângulos e a força na terceira lei de Newton	75
Encontrando o equilíbrio.....	78

Capítulo 6: Que Resistência: Planos Inclinados e Atrito 81

Não Deixe que Isso o Coloque para Baixo: Lidando com a Gravidade.....	81
Inclinação Vertical: Um Plano Inclinado	82
Descobrir os ângulos do modo fácil.....	83
Trabalhando com a aceleração.....	84
Ficando Confuso com o Atrito	85
Calculando o atrito e a força normal.....	86
Conquistando o coeficiente do atrito.....	86
Compreendendo os atritos estático e cinético	87
Trabalhando com o atrito para cima	89
Determinando como a Gravidade Afeta os Objetos	
Transportados pelo Ar.....	94
Subindo: Altura máxima.....	94
Flutuando no ar: Hora da suspensão.....	95
Descendo: Decompondo o tempo total	95
Atirando um objeto em ângulo	96

Capítulo 7: Girando em Torno de Movimentos Circulares e Órbitas 99

Ficando no Curso: Movimento Circular Uniforme.....	100
Mudando a Direção: Aceleração Centrípeta	101
Controlando a velocidade com a aceleração centrípeta	101
Encontrando a grandeza da aceleração centrípeta.....	102
Puxando em Direção ao Centro: Força Centrípeta	102
Negociando Curvas e Declives: Força Centrípeta Através de Rotações	104
Ficando Angular: Deslocamento, Velocidade e Aceleração	106
Soltando a Maçã: Lei da Gravitação de Newton	108
Derivando a força da gravidade na superfície da Terra....	109
Usando a lei da gravitação para examinar as órbitas circulares	110
Fazendo Uma Volta Completa: Movimento Circular Vertical	113

Parte III: Manifestando a Energia para Trabalhar.... 117

Capítulo 8: Descobrimos Algum Trabalho da Física. 119

Trabalho: Não é o que você pensa	119
Trabalhando nos sistemas de medida	120
Empurrando seu peso	120
Arrastando.....	122
Considerando o Trabalho Negativo	122
Acertando as Contas: Energia Cinética.....	123
Dividindo a equação da energia cinética	125
Colocando a equação da energia cinética em uso.....	126
Calculando a energia cinética utilizando a força resultante	127

Energia no Declive: Energia Potencial.....	128
Trabalhando contra a gravidade	129
Convertendo energia potencial em energia cinética.....	130
Escolha seu Caminho: Forças Conservativas <i>versus</i> Não Conservativas.....	131
Para Cima, Para Baixo e por Todo Lado: A Conservação da Energia Mecânica	132
Determinando a velocidade final com a energia mecânica	134
Determinando a altura final com a energia mecânica.....	134
Aumentando a Potência: A Razão de Fazer o Trabalho.....	135
Unidades comuns da potência.....	135
Cálculos alternativos da potência	136
Capítulo 9: Colocando Objetos em Movimento: Quantidade de Movimento e Impulso.	137
Vendo o Impacto do Impulso	137
Reunindo a Quantidade de Movimento	139
Teorema do Impulso-Quantidade de Movimento: Relacionando Impulso e Cinética.....	140
Mesa de bilhar: Encontrando o impulso e a quantidade de movimento	141
Cantando na chuva: Uma atividade impulsiva.....	142
Quando os Objetos Ficam Doidos: Conservando a Quantidade de Movimento	143
Medindo a velocidade com a conservação da quantidade de movimento	145
Medindo a velocidade de fogo com a conservação da quantidade de movimento	146
Quando os Mundos (ou Carros) Colidem: Colisões Elásticas e Inelásticas	148
Quando os objetos saltam: Colisões elásticas	148
Quando os objetos não saltam: Colisões inelásticas	149
Colidindo em uma linha	149
Colidindo em duas dimensões	151
Capítulo 10: Enrolando com a Cinética Angular.	153
Do movimento Linear ao Rotacional.....	153
Compreendendo o Movimento Tangencial	154
Encontrando a velocidade tangencial.....	154
Encontrando a aceleração tangencial	156
Encontrando a aceleração centrípeta.....	156
Aplicando Vetores na Rotação	158
Calculando a velocidade angular.....	158
Descobrimo a aceleração angular	159
Torcendo e Gritando: Torque.....	160
Mapeando a equação do torque	162
Compreendendo os braços da alavanca.....	163
Descobrimo o torque gerado	164
Reconhecendo que o torque é um vetor	165
Nenhuma Oscilação Permitida: Equilíbrio Rotacional.....	166
Pendurando uma bandeira: Um problema do equilíbrio rotacional	167
Segurança da escada: Introduzindo o atrito no equilíbrio rotacional	168

Capítulo 11: Circule e Circule com a Dinâmica Rotacional . . 173

Enrolando a Segunda Lei de Newton no	
Movimento Angular	173
Convertendo a aceleração tangencial na	
aceleração angular	174
Decompondo o momento de inércia	175
Examinando os Momentos de Inércia	176
CD players e torque: Um exemplo de inércia	177
Aceleração angular e torque: Outro exemplo de inércia ..	179
Envolvendo sua Cabeça no Trabalho Rotacional e na	
Energia Cinética	180
Fazendo algum trabalho rotacional.....	180
Controlando a energia cinética rotacional	182
Medindo a energia cinética rotacional em uma rampa.....	183
Isto não Pode Parar: Cinética Angular	185
Revisando a conservação da cinética angular	186
Órbitas do satélite: Um exemplo de conservação da	
quantidade de movimento angular	186

Capítulo 12: Molas: Movimento Harmônico Simples 189

Conectando-se com a Lei de Hooke	189
Mantendo as molas esticadas	190
Deduzindo que a lei de Hooke é uma força	
de restauração	191
Movendo-se com o Movimento Harmônico Simples.....	191
Examinando os movimentos harmônicos simples	
horizontal e vertical.....	192
Mergulhando mais no movimento harmônico simples	193
Encontrando a frequência angular de uma massa	
em uma mola.....	200
Decompondo a Energia no Movimento Harmônico Simples.....	202
Balançando com os Pêndulos	203

Parte IV: Formulando as Leis da Termodinâmica .. 205

Capítulo 13: Aumentando o Calor com a Termodinâmica . . . 207

Entrando na água quente.....	208
Quando o termômetro informa Fahrenheit	208
Quando o termômetro informa Celsius	208
Quando o termômetro informa Kelvin	209
O calor está ativado: Expansão linear	210
Desconstruindo a expansão linear	212
Trabalhando nos trilhos: Um exemplo	
de expansão linear	212
O calor continua: Expansão do volume.....	213
A favor do Fluxo (de calor)	214
Mudanças de fases: Quando as temperaturas não mudam	216
Quebrando o gelo com as mudanças de fase.....	217
Compreendendo o calor latente	218

Capítulo 14: Aqui, Pegue Meu Casaco: Transferência de Calor em Sólidos e Gases 219

Fervendo a Água: Convecção.....	219
Quente Demais: Condução	220

Examinando as propriedades que afetam a condução para encontrar a equação da condução	221
Aplicando a equação do calor transferido pela condução.....	223
Emitindo e Absorvendo Luz: Radiação.....	224
Você não pode ver a radiação, mas ela existe.....	225
Radiação e corpos negros.....	226
Quebrando o Número de Avogadro	228
Forjando a Lei do Gás Ideal	229
Pressão do gás: Um exemplo de Lei do gás ideal	231
Lei de Boyle e Lei de Charles: Expressões alternativas da Lei do gás ideal.....	231
Controlando Moléculas do Gás Ideal	232
Preveno a velocidade da molécula de ar.....	232
Calculando a energia cinética em um gás ideal	233
Capítulo 15: Quando o Calor e o Trabalho Colidem:	
As Leis da Termodinâmica	235
Ganhando um Equilíbrio Térmico: A Lei Zero da Termodinâmica	235
Conservando Calor e Energia: A Primeira Lei da Termodinâmica	236
Calculando a conservação.....	237
Examinando os processos isobárico, isocórico, isotérmico e adiabático, ai meu!	238
Descobrimo as capacidades do calor específico	245
Quando o Calor Flui: A Segunda Lei da Termodinâmica	246
Colocando o calor para trabalhar: Máquinas térmicas	246
Avaliando o trabalho do calor: A eficiência das máquinas térmicas.....	247
Carnot diz que não se pode ter tudo.....	248
Ficando Frio: A Terceira (e a Última Absoluta) Lei da Termodinâmica	250
Parte V: Descobrimo a Carga da Eletricidade e do Magnetismo.....	251
Capítulo 16: Movendo com a Eletricidade Estática	253
Mais e Menos: Cargas de Elétron e Próton.....	253
Empurra e Puxa: Forças Elétricas.....	254
Carregando na Lei de Coulomb.....	255
Reunindo objetos.....	255
Calculando a velocidade dos elétrons	256
Vendo as forças entre diversas cargas.....	256
Influência à Distância: Campos Elétricos.....	258
Vindo de todas as direções: Campos elétricos a partir de cargas pontuais.....	259
Carregando bem e regularmente: Campos elétricos em capacitores de placa paralela.....	261
Potencial Elétrico: Acionando a Voltagem	262
Calculando a energia potencial elétrica.....	263
Percebendo o potencial na voltagem.....	264
Descobrimo que o potencial elétrico é conservado	265
Encontrando o potencial elétrico das cargas pontuais	266
Ficando totalmente carregado com a capacitância.....	269

Capítulo 17: Dando um Empurrão aos Elétrons com Circuitos	271
Elétrons em Marcha: Corrente.....	271
Definindo a corrente.....	272
Calculando a corrente nas baterias.....	272
Dando Alguma Resistência: Lei de Ohm.....	273
Determinando o fluxo da corrente	273
Examinando a resistividade.....	274
Aumentando a Força: Voltagem.....	275
Fluindo de Um para Outro: Circuitos em Série.....	275
Dividindo a Corrente: Circuitos Paralelos.....	276
Fazendo um Circuito Elétrico com as Regras de Kirchoff.....	278
Implementando a regra do circuito fechado.....	279
Usando circuitos com diversos circuitos fechados.....	280
Dominando os Capacitores em Circuitos Paralelos e em Série.....	283
Capacitores nos circuitos paralelos.....	283
Capacitores nos circuitos em série.....	284
Reunindo Resistores e Capacitores: Circuitos RC.....	285
 Capítulo 18: Magnetismo: Mais do que uma Atração	287
Encontrando a Origem da Atração.....	288
Forçando uma Carga em Movimento.....	289
Descobrimdo o Tamanho Quantitativo das Forças Magnéticas.....	290
Movendo-se em Órbitas: Partículas Carregadas nos Campos Magnéticos.....	292
Os campos magnéticos não trabalham.....	292
...mas afetam as partículas carregadas em movimento....	293
Empurrando e Puxando Correntes.....	295
Forças nas correntes.....	295
Torques nas correntes.....	296
Identificando o Campo Magnético a Partir de um Fio.....	298
Determinando o Centro nos Circuitos Fechados da Corrente.....	300
Conseguindo um Campo Magnético Uniforme com Solenóides.....	302
 Capítulo 19: Mantendo a Corrente com a Voltagem.	305
Induzindo a FEM (Frequência Eletromagnética).....	305
Movendo um condutor em um campo magnético para causar a voltagem.....	306
Induzindo a voltagem em certa área.....	307
Decompondo o Fluxo com a Lei de Faraday.....	308
Obtendo os Sinais Certos com a Lei de Lenz.....	310
Descobrimdo a Indutância.....	312
Examinando Circuitos de Corrente Alternada.....	313
Desenhando a voltagem alternada.....	314
Revelando a corrente e a voltagem com raiz quadrada média.....	314
Conduzindo com capacitores.....	315
Retardando com indutores.....	318
Lidando com Uma Tripla Ameaça: Circuitos RCL.....	321

Capítulo 20: Colocando Alguma Luz Sobre Espelhos

e Lentes	323
Tudo sobre Espelhos (sohlepe serbos oduT).....	323
Quando a Luz fica Inclinada	324
Refratando a luz com a Lei de Snell.....	324
Examinando a água em profundezas aparentes.....	325
Todos os Espelhos e Nenhuma Fumaça	327
Expandindo com espelhos côncavos	327
Contraindo com espelhos convexos	332
Vendo Claramente com Lentes	333
Expandindo com lentes convergentes	334
Contraindo com lentes divergentes	337

Parte VI: A Parte dos Dez..... 339**Capítulo 21: Dez Critérios Surpreendentes sobre a Relatividade**

a Relatividade	341
A Natureza Não tem Favoritos	341
A Velocidade da Luz é Constante, Não Importa a Velocidade ..	342
O Tempo se Dilata em Altas Velocidades	343
A Viagem Espacial Envelhece Menos Você.....	343
O Comprimento se Contraí em Altas Velocidades	344
$E = mc^2$: A Equivalência da Matéria e da Energia	345
Matéria Mais Antimatéria é Igual a Boom.....	345
O Sol está Irradiando Massa.....	346
A Velocidade da Luz é a Velocidade Máxima	346
Newton Ainda Está Certo.....	347

Capítulo 22: Dez Teorias Extraordinárias da Física 349

Você Pode Medir a Menor Distância	349
Pode Haver um Tempo Menor	350
Heisenberg Diz que Você Pode Não Estar Certo.....	350
Os Buracos Negros Não Deixam a Luz Sair	351
A Gravidade Curva o Espaço	351
A Matéria e a Antimatéria Destroem-se	352
As Supernovas São as Explosões Mais Poderosas	353
O Universo Começa com o Big Bang e Termina com o Gnab Gib ..	353
Os Fornos de Microondas São Física Quente.....	353
Os Físicos Podem Não Ter Medidas Absolutas Físicas.....	354

Glossário..... 355**Índice Remissivo** 361

Introdução

Física é tudo.

O que quer dizer tudo?

Todas as coisas. É exatamente isso. A Física está presente em toda ação à sua volta. E como a Física não tem limite, ela entra em alguns lugares capciosos, o que significa que ela pode ser difícil de seguir. Pode ser ainda pior quando você está lendo algum livro pesado que é difícil de acompanhar.

Para a maioria das pessoas que entra em contato com a Física, os livros didáticos com cerca de 1.200 páginas são sua única opção neste campo surpreendentemente rico e gratificante. E o que se segue são lutas cansativas quando os leitores tentam escalar uma impressionante murada de pesados tomos. Nenhuma alma corajosa quis escrever um livro sobre Física do ponto de vista do *leitor*? Sim, uma alma está encarregada desta tarefa e aqui, surjo com tal livro.

Sobre Este Livro

O livro *Física para Leigos* é sobre a Física do *seu* ponto de vista. Ensinei Física a milhares de alunos no nível universitário e, a partir dessa experiência, sei que a maioria dos estudantes compartilha uma peculiaridade comum: a confusão. Do tipo: “Estou confuso com o que fiz para merecer tal tortura”.

Este livro é diferente. Ao invés de escrevê-lo a partir do ponto de vista do físico ou do professor, ele foi escrito a partir do ponto de vista do leitor. Depois de milhares de aulas particulares, sei onde um livro normalmente começa a confundir as pessoas e tive muito cuidado para descartar um pouco de explicações de cima para baixo. Você não sobrevive às aulas particulares por muito tempo, a menos que saiba o que realmente faz sentido para as pessoas – o que elas querem ver a partir de *seus* pontos de vista. Em outras palavras, planejei este livro para ser repleto de coisas boas – e *apenas* as coisas boas. Você também descobre maneiras únicas de enxergar os problemas que os professores usam, de maneira a torná-los mais simples.

Convenções Utilizadas Neste Livro

Alguns livros têm uma dúzia de convenções que você precisa saber antes de iniciar. Não este. Tudo o que você precisa saber é que os termos novos aparecem em itálico, *assim*, na primeira vez em que os analiso, como, por exemplo, o que são os vetores – os itens que têm uma grandeza e uma direção – aparecem em negrito no Capítulo 4, **assim**.

O Que Você Não Deve Ler

Forneço dois elementos neste livro que você não terá que ler se não estiver interessado nos trabalhos internos da Física – seções separadas e parágrafos marcados com um ícone Equipe Técnica.

As seções separadas existem para fornecer um pouco mais de visão sobre o que está acontecendo com um tópico em particular. Elas fornecem um pouco mais de história, como, por exemplo, como algum físico famoso fez o que fez ou uma aplicação real inesperada do ponto em discussão. Você pode pular as seções separadas, se quiser, sem perder nenhuma Física essencial.

O material Equipe Técnica fornece visões técnicas sobre um tópico, mas você não perde nenhuma informação necessária para resolver um problema. Seu *tour* guiado do mundo da Física não perderá nada.

Suposições Malucas

Suponho que você não tem nenhum conhecimento sobre a Física quando começa a ler este livro. Contudo, você deve ter alguma destreza matemática. Em particular, deve conhecer um pouco de Álgebra. Você não precisa ser um profissional da Álgebra, mas deve saber como mover os itens de um lado da equação para o outro e como entender os valores. Dê uma olhada no Capítulo 2, se quiser mais informações sobre o tópico. Você também precisa de um pouco de conhecimento de Trigonometria, mas não muito. Novamente, dê uma olhada no Capítulo 2, onde reviso toda a Trigonometria que você precisa saber – uma compreensão dos senos e cossenos – completamente.

Como Este Livro Está Organizado

O mundo natural é bem *grande*. E para lidar com ele, a Física divide o mundo em partes diferentes. As seguintes seções apresentam as várias partes que você vê neste livro.

Parte I: Colocando a Física em Movimento

A Parte I é onde você geralmente inicia sua jornada da Física, pois descrever o movimento — inclusive a aceleração, velocidade e deslocamento — não é muito difícil. Você tem apenas algumas equações para lidar e pode colocá-las no bolso em pouco tempo. Examinar o movimento é uma ótima maneira de entender como a Física funciona, medindo e prevendo o que está acontecendo.

Parte II: Que As Forças da Física Estejam com Você

“Para toda ação, há uma reação igual e oposta”. Já ouviu isso? A lei e suas implicações associadas aparecem nesta parte. Sem forças, o movimento dos objetos não aconteceria, contribuindo para um mundo chato. Graças ao Sr. Isaac Newton, a Física é, particularmente, boa para explicar o que acontece quando você aplica forças.

Parte III: Manifestando a Energia para Trabalhar

Se você aplicar uma força em um objeto, movendo-o e fazendo-o ir mais rapidamente, o que você realmente está fazendo? Está fazendo um *trabalho* e esse trabalho torna-se a *energia* desse objeto. Juntos, o trabalho e a energia explicam muito sobre o mundo louco em torno de nós, por isso eu dedico a Parte III a esses tópicos.

Parte IV: Formulando as Leis da Termodinâmica

O que acontece quando você coloca seu dedo em uma vela acesa e segura? Você queima o dedo! E você completa um experimento na transferência do calor, um dos tópicos que você vê na Parte IV, um resumo da termodinâmica — a Física do calor e o fluxo do calor. Você também vê como as máquinas térmicas funcionam, como o gelo derrete e muito mais.

Parte V: Descobrimo a Carga da Eletricidade e do Magnetismo

A Parte V é onde entra a parte impressionante da Física. Você vê os prós e os contras da eletricidade, desde os elétrons do componente que fazem a ação acontecer até os circuitos com correntes e voltagens. O magnetismo é um tópico bem atraente também. Quando a eletricidade flui, você vê o magnetismo e tem sua história na Parte V, inclusive como o magnetismo e a eletricidade formam a luz.

Parte VI: A Parte dos Dez

As partes dos dez é composta de listas rápidas com 10 itens cada uma, e a Física pode reunir listas como nenhuma outra ciência. Você descobre todos os tipos de tópicos surpreendentes da relatividade aqui, como, por exemplo, a dilatação do tempo e a contração do comprimento. E você vê uma Física diferente — tudo, desde buracos negros e o Big Bang até os buracos no espaço e a menor distância em que o espaço pode ser dividido.

Ícones Usados Neste Livro

Você pode encontrar alguns ícones neste livro que chamam atenção para certos petiscos de informação. É isto que os ícones significam:



Este ícone marca as informações que devem ser lembradas, tais como a aplicação de uma lei da Física ou um atalho para uma equação particularmente interessante.



Este ícone significa que as informações são técnicas, coisas bem aprofundadas. Você não precisa ler se não quiser, mas se quiser se tornar um profissional da Física (e quem não quer?), dê uma olhada.



Quando aparecer este ícone, esteja preparado para encontrar um pouco de informação extra planejada para ajudá-lo a entender melhor um tópico.

Aonde Ir a Partir Daqui

Você pode folhear este livro. Não precisa lê-lo do início ao fim. Como alguns outros livros *Para Leigos*, este foi planejado para permitir que você pule quando quiser. Este é seu livro e a Física é sua ostra. Você pode pular para o Capítulo 1, que é onde a ação começa; pode ir para o Capítulo 2 para ver uma análise sobre a álgebra e a trigonometria necessárias que deve saber; ou pode pular para qualquer lugar desejado se souber exatamente qual tópico deseja estudar.

Parte I

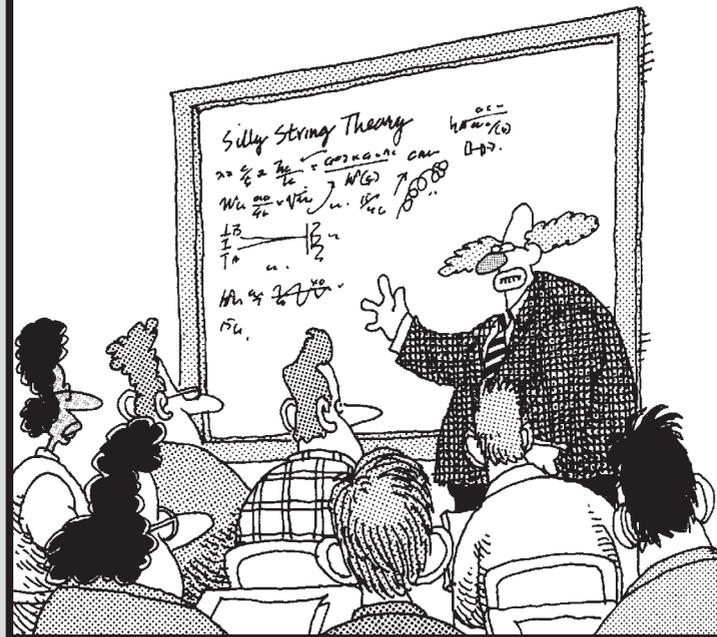
Colocando a Física em Movimento

A 5ª Onda

Por Rich Tennant

Depois do circo, Bozo destacou-se por seu trabalho sobre a Campanha Divertida de Partícula de Onda, esguicho de Quarks e a Teoria Quântica do Tombo.

©RICH TENNANT



Nesta parte...

A Parte I é planejada para dar uma introdução sobre as formas da Física – tais como o movimento. O movimento está em toda sua volta e, felizmente, é um dos tópicos mais fáceis na Física para trabalhar. A Física prima por medir coisas e fazer previsões e, com apenas algumas equações, você pode se tornar um mestre do movimento. As equações mostram como a Física funciona no mundo à sua volta. Simplesmente conecte os números e poderá fazer cálculos que deixarão seus colegas perplexos.

Capítulo 1

Usando a Física para Entender Seu Mundo

Neste Capítulo

- ▶ Reconhecendo a Física em nosso mundo
- ▶ Colocando freios no movimento
- ▶ Lidando com a força e a energia à sua volta
- ▶ Ficando irritado com a termodinâmica
- ▶ Apresentando a eletricidade e o magnetismo
- ▶ Envolvendo sua cabeça com a Física extraordinária

A Física é o estudo de nosso mundo, e o Universo à sua volta. Você pode considerar a Física como uma obrigação – uma obrigação imposta na escola, em grande parte como sendo desagradável – mas não é assim. A Física é um estudo que você experimenta naturalmente, desde o momento em que abre seus olhos.

Nada fica fora do alcance da Física; é uma ciência abrangente. Você pode estudar vários aspectos do mundo natural e, conseqüentemente, pode estudar diferentes campos na Física: a física dos objetos em movimento, das forças, da eletricidade, do magnetismo, do que acontece quando você começa a chegar perto da velocidade da luz etc. Você se diverte com o estudo desses tópicos e muito mais neste livro.



A Física tem se feito presente desde quando as pessoas começaram a tentar compreender seu mundo. A palavra “física” é derivada da palavra grega “physika”, que significa “coisas naturais”.

O que é Física

Você pode observar muitas coisas à sua volta sempre no meio de seu mundo complexo. As folhas estão balançando, o sol está brilhando, as estrelas estão cintilando, as lâmpadas estão acesas, os carros estão se movendo, as impressoras estão imprimindo, as pessoas

estão caminhando e andando de bicicleta, os rios estão fluindo etc. Quando você para para examinar essas ações, sua curiosidade natural dá margem a perguntas infinitas:

- ✔ Como posso ver?
- ✔ Por que sou quente?
- ✔ De que é feito o ar que respiro?
- ✔ Por que escorrego quando tento escalar um banco de neve?
- ✔ Tudo isso são estrelas? Ou são planetas? Por que parecem mover-se?
- ✔ Qual é a natureza desta partícula de poeira?
- ✔ Existem mundos ocultos que não posso ver?
- ✔ O que é luz?
- ✔ Por que os cobertores me aquecem?
- ✔ Qual é a natureza da matéria?
- ✔ O que acontecerá se eu tocar naquela linha de alta tensão? (Você sabe a resposta desta; como pode ver, um pouco de conhecimento da Física pode ser um salva-vidas.)

A Física é uma indagação do mundo e o modo como funciona, desde o mais básico (como, por exemplo, chegar a um acordo com a inércia de um carro parado que você está tentando empurrar) até o mais exótico (como, por exemplo, examinar o menor dos mundos dentro da menor das partículas para tentar entender os blocos de construção fundamentais da matéria). Ou seja, a Física é sobre ter consciência de seu mundo.

Observando Objetos em Movimento

Algumas das perguntas mais fundamentais que você pode ter sobre o mundo lidam com os objetos em movimento. Aquela pedra rolando em sua direção diminuirá de velocidade? Com que rapidez você terá que se mover para sair de seu caminho? (Espere só um pouco enquanto pego minha calculadora...). O movimento foi uma das primeiras explorações da Física, e ela foi notável ao sugerir respostas.

A Parte I deste livro lida com os objetos em movimento – desde bolas até vagões ferroviários e a maioria dos objetos intermediários. O movimento é um fato fundamental da vida e, sobre o qual, a maioria das pessoas já sabe muito. Você coloca seu pé no acelerador e o carro parte.

Porém, existe mais nesta história. Descrever o movimento e como ele funciona é o primeiro passo para realmente compreender a Física, que é sobre observações e medidas, sobre criar modelos mentais e

matemáticos com base nessas observações e medidas. Este processo é pouco familiar para a maioria das pessoas e é onde entra este livro.

Estudar o movimento é bom, mas é apenas o começo do começo. Quando você olha em volta, vê que o movimento dos objetos muda o tempo inteiro. Você vê uma motocicleta parando no sinal de trânsito. Vê uma folha caindo e, então, parando quando atinge o chão, apenas para ser apanhada de novo pelo vento. Vê uma bola de sinuca atingir outras bolas de modo errado, de maneira que todas se movem sem ir para onde deveriam.

O movimento muda o tempo inteiro como resultado da *força*, e este é o assunto da Parte II. Você pode saber o básico da força, mas, algumas vezes, é preciso um especialista para realmente saber o que está acontecendo de um modo mensurável. Em outras palavras, algumas vezes requer um físico, como você.

Absorvendo a Energia à Sua Volta

Você não tem que olhar longe para encontrar sua próxima parte da Física. Nunca tem. Quando você sai de casa pela manhã, por exemplo, pode ouvir uma colisão na rua. Dois carros colidiram em alta velocidade e, presos um ao outro, deslizam na rua.

Graças à Física (e, mais especificamente, à Parte III deste livro), você pode fazer as medidas e as previsões necessárias para saber exatamente a distância que precisa se mover para sair do caminho. Você sabe que é preciso muito para parar os carros. Mas muito *o quê?*

Ajuda ter noções de energia e cinética neste momento. Você usa essas noções para descrever o movimento dos objetos por meio da massa. A energia do movimento é chamada de *energia cinética* e quando você acelera um carro de 0 a 90 quilômetros por hora em 10 segundos, o carro gera com muita energia cinética.

De onde vem a energia cinética? De algum lugar — senão, você não teria que se preocupar com o preço do combustível. Usando combustível, o motor faz o *trabalho* no carro para que ele tenha velocidade.

Ou, digamos, por exemplo, que você não tenha o luxo de utilizar uma máquina quando está subindo um piano nas escadas de sua nova moradia. Mas, sempre há tempo para um pouco de Física, portanto, você pega sua calculadora para calcular quanto trabalho terá que fazer para subir seis andares até seu apartamento.

Depois de subir as escadas, seu piano terá o que é chamado de *energia potencial*, simplesmente porque você coloca muito trabalho contra a gravidade para subir o piano por seis andares.

Infelizmente, seu colega de quarto odeia pianos e joga o seu pela janela. O que acontece em seguida? A energia potencial do piano, devido à sua altura em um campo gravitacional, é convertida em energia cinética, a energia do movimento. É um processo

interessante de observar, e você decide calcular a velocidade final do piano quando ele atinge a rua.

Em seguida, você calcula a conta do piano, entrega a seu colega de quarto e desce as escadas para pegar sua bateria acústica.

Sentindo-se Quente, Mas Não Incomodado

O calor e o frio são partes de sua vida cotidiana, portanto, claro, a Física existe no verão e no inverno. Já deu uma olhada nas gotas de condensação em um copo de água fria em um cômodo quente? O vapor da água no ar está sendo resfriado quando toca o vidro e condensa em líquido. O vapor da água passa a energia térmica para a bebida gelada, que acaba ficando mais quente como resultado.

A *termodinâmica* é a Parte IV deste livro. A termodinâmica pode dizer quanto calor você está irradiando em um dia frio, quantas bolsas de gelo você precisa para resfriar um poço de lava, a temperatura da superfície do sol e qualquer outra coisa que lide com a energia do calor.

Você também descobre que a Física não está limitada ao seu planeta. Por que o espaço é frio? Está vazio, portanto, como pode ser frio? Não é frio porque você pode medir sua temperatura como frio. No espaço, você irradia calor, e muito pouco calor é irradiado de volta para você? Em um ambiente normal, você irradia calor à sua volta, e tudo à sua volta irradia calor para você. Mas no espaço, seu calor apenas se irradia, portanto, você pode congelar.

Irradiar calor é apenas uma das três maneiras como o calor pode ser transferido. Você pode descobrir muito sobre o calor que ocorre à sua volta, ou seja, por uma fonte de calor, como o Sol, ou por atrito, através dos tópicos deste livro.

Lidando com Cargas e Ímãs

Depois de dominar o mundo visível dos objetos chocando-se em movimento, você poderá ir para o mundo invisível da energia. A Parte V oferece mais informação sobre o mundo invisível, dissecando o que acontece com a eletricidade e o magnetismo.



Você pode ver a eletricidade e o magnetismo em funcionamento, mas não pode vê-los diretamente. Porém, quando você combina a eletricidade e o magnetismo, produz luz pura — a verdadeira essência de ser visível. Como a luz funciona e como fica curva na lente e em outros materiais pode ser visto na Parte V.

Muito da Física envolve entender o mundo invisível que nos rodeia. A matéria em si é composta de partículas que carregam cargas elétricas e um número incrível dessas cargas existe em todas as pessoas.

Quando você obtém concentrações de cargas, tem eletricidade estática e um fenômeno que chama atenção, chamado de raio. Quando essas cargas se movem, por outro lado, você obtém eletricidade e magnetismo como pode ser observado em tomada de parede.

Desde o raio até as lâmpadas, a eletricidade faz parte da Física, claro. Neste livro, você não só vê que a eletricidade pode fluir nos circuitos, mas como faz isso. Você também compreende os prós e os contras dos resistores, capacitores e indutores.

Preparando-se Para o Extraordinário, Física Extraordinária Chegando

Mesmo quando você começa com os tópicos mais comuns na Física, rapidamente chega ao mais exótico. Na Parte VI, você descobre dez visões surpreendentes na Teoria Especial da Relatividade de Einstein e dez fatos físicos surpreendentes.

Einstein é um dos heróis mais conhecidos da Física, claro, e um ícone da genialidade. Ele simboliza o gênio solitário da Física, para muitas pessoas, seguindo a direção do desconhecido no Universo e trazendo luz para as áreas obscuras.

Mas o que exatamente Einstein disse? O que realmente significa a famosa equação $E = mc^2$? Realmente diz que a matéria e a energia são equivalentes — que você pode converter matéria em energia e energia em matéria? Sim, certamente pode.

Esse é um fato da Física realmente extraordinário e é um que você pode pensar que não encontrará na vida diária. Mas encontrará. Para irradiar tanta luz como irradia, o Sol converte cerca de 4,79 milhões de toneladas de matéria em energia radiante a *cada segundo*.

E as coisas mais estranhas acontecem quando a matéria começa a se mover perto da velocidade da luz, como previsto por nosso amigo Einstein.

“Observe a nave espacial”, você diz quando um foguete passa próximo da velocidade da luz. “Parece comprimida em sua direção de viagem — tem apenas metade do comprimento que teria em repouso.”

“Qual nave espacial?”, seus amigos perguntam. “Passou tão rapidamente por nós que não vimos nada.”

“O tempo medido nessa nave espacial ocorre mais lentamente do que o tempo aqui na Terra, também. Para nós, levará 200 anos para

o foguete atingir a estrela mais próxima. Mas, para o foguete, levará apenas 2 anos.”

“Você está inventando isso?”, todos perguntam.

A Física está à sua volta em cada ação comum. Mas se você quiser ser extraordinário, a Física é uma ciência para tanto. Este livro termina com um resumo da Física extraordinária: a possibilidade de buracos no espaço, por exemplo, e como a atração gravitacional dos buracos negros é forte demais até para deixar a luz escapar. Divirta-se!

Capítulo 2

Compreendendo os Fundamentos da Física

Neste Capítulo

- ▶ Compreendendo o conceito da Física... e por quê
- ▶ Dominando medidas (e mantendo-as certas quando você resolve equações)
- ▶ Considerando dígitos significativos e possíveis erros
- ▶ Relembrando a álgebra básica e os conceitos da trigonometria

Aqui está você, trabalhando em um problema de Física difícil e praticamente, sem resposta, buscando um avanço crucial. A questão é difícil, e você sabe que legiões de outras pessoas lutaram com ela em vão. De repente, a luz se acende e tudo fica claro.

“É lógico”, você diz. “É elementar. A bola eleva-se 9,8 metros no ar em seu ponto mais alto.”

Mostrada a solução correta do problema, um professor agradecido compensa-o com um aceno de cabeça. Você reconhece modestamente o elogio e vai para o próximo problema. Nada mal.

Com a Física, a glória o espera, mas você também tem um trabalho difícil esperando. Não se preocupe com o trabalho; a satisfação do sucesso vale a pena. E quando você terminar este livro será um físico profissional, lidando muito bem com problemas por todos os lados que antes eram difíceis.

Este capítulo começa sua aventura cobrindo algumas habilidades básicas que você precisa para os próximos capítulos. Cubro as medidas e a notação científica, forneço uma recapitulação sobre a álgebra básica e a trigonometria e mostro em quais dígitos do número prestar atenção — e quais ignorar. Continuo a construir uma base da Física, sólida e inabalável, com a qual você poderá contar neste livro.

Não Tenha Medo, é Apenas Física

Muitas pessoas ficam um pouco ansiosas quando pensam sobre Física. É fácil ficar intimidado com o assunto, pensando que parece um tópico estranho e intelectual que tira números e regras do ar. Mas a verdade é que a Física existe para ajudá-lo a compreender o mundo. É uma aventura humana, empreendida em benefício de todos, no modo como o mundo funciona.

Embora o contrário possa parecer verdade, não há nenhum mistério real sobre os objetivos e as técnicas da Física; a Física é, simplesmente, *modelar* o mundo. A ideia é criar modelos mentais para descrever como o mundo funciona: como os blocos descem rampas, como as estrelas se formam e brilham, como os buracos negros pegam a luz de forma que ela não pode escapar, o que acontece quando os carros colidem etc. Quando esses modelos são criados pela primeira vez, geralmente têm pouca relação com os números; apenas cobrem a essência da situação. Por exemplo, uma estrela é composta por esta camada e por aquela, e, como resultado, essa reação ocorre, seguido daquela outra. E — *pow* — você tem uma estrela.

Com o passar do tempo, esses modelos começam a ficar numéricos, sendo o momento onde os alunos, algumas vezes, começam a ter problemas. A aula de Física seria fácil se você pudesse simplesmente dizer: “Esse carrinho descerá aquela montanha e quando chegar na parte inferior, correrá cada vez mais rapidamente”. Mas a história é mais complicada do que isso; não só você pode dizer que o carrinho irá mais rapidamente, como também ao exercer seu domínio sobre o mundo físico, também pode dizer a rapidez com que ele irá.



A essência da Física é esta: você começa fazendo uma observação, cria um modelo para simular essa situação e, então, adiciona matemática para preencher — e *voilà!* Você tem o poder de prever o que acontecerá no mundo real. Toda essa matemática existe para ajudá-lo a se sentir mais em casa no mundo físico e ajudá-lo a ver o que acontece e o porquê, não para aliená-lo com o que está à sua volta.

Seja um gênio: Não foque na matemática

Richard Feynman foi um famoso ganhador famoso do Prêmio Nobel em Física, conhecido nas décadas de 50 e 60 como um gênio surpreendente. Posteriormente, ele explicou seu método: ligava o problema em mãos a uma situação real, criando uma imagem mental, ao passo que as outras pessoas lançavam mão da matemática. Quando alguém lhe mostrava uma longa derivação que tinha dado errado, por exemplo, ele pensava em algum

fenômeno físico que a derivação deveria explicar. Quando seguia neste caminho, chegava ao ponto onde, de repente, percebia que a derivação não coincidia mais com o que acontecia no mundo real e dizia: “Não, este é o problema”. Ele estava sempre certo, fazendo com que as pessoas, atemorizadas, confundissem-no com um supergênio. Quer ser um supergênio? Faça o mesmo: não deixe que a matemática assuste você.

Lembre-se sempre de que o mundo real vem primeiro e que a matemática, depois. Quando você encarar um problema da Física não fique perdido na matemática; mantenha uma perspectiva global sobre o que está acontecendo no problema, pois fazer isso irá ajudá-lo a ficar no controle. Depois de ensinar Física para alunos de faculdade por muitos anos, estou muito familiarizado com um dos maiores problemas que eles enfrentam: ficam perdidos e intimidados pela matemática.

E, agora, para endereçar aquela pergunta chata que incomoda sua mente: o que você aproveitará da Física? Se você deseja seguir uma carreira na Física ou em um campo afim, tal como a Engenharia, a resposta é clara: você precisará deste conhecimento diariamente. Mas mesmo que você não esteja planejando embarcar em uma carreira relacionada à Física, poderá aproveitar bastante estudando o tema. Você pode aplicar muito do que descobre, em um curso de Física introdutório, na vida real. Mas, muito mais importante do que a aplicação da Física são as habilidades para resolver problemas com as quais você fica apto para abordar as várias circunstâncias. Os problemas da Física treinam-no a recuar, considerar suas opções para atacar o problema, selecionar seu método e, então, resolver o problema do modo mais fácil possível.

Medindo o Mundo à Sua Volta e Fazendo Previsões

A Física distingue-se ao medir e prever o mundo físico. Afinal, é por isso que ela existe. Medir é o ponto de partida; parte de observar o mundo para que você possa, então, modelá-lo e prevê-lo. Você tem à sua disposição vários objetos para medir: alguns para comprimento, outros para peso, para o tempo etc. Dominar essas medidas faz parte do domínio da Física.

Para manter as medidas juntas, os físicos e os matemáticos agruparam-nas em *sistemas de medida*. Os sistemas de medida mais comuns que você vê na Física são os sistemas centímetro-grama-segundo (CGS) e metro-quilograma-segundo (MKS), juntos chamados de *SI* (abreviação de *Système International d'Unités*), mas você também pode encontrar o sistema pé-libra-polegada (FPI). Para uma consulta, a Tabela 2-1 mostra as unidades básicas de medida no sistema CGS (não se preocupe em memorizar aqueles com os quais você não está familiarizado agora; volte para vê-los depois, quando for necessário).

Tabela 2-1: Unidades de medida no sistema CGS

<i>Medida</i>	<i>Unidade</i>	<i>Abreviação</i>
Comprimento	centímetro	cm
Massa	grama	g
Tempo	segundo	s
Força	dina	DYNE
Energia	erg	erg
Pressão	bária	ba
Corrente elétrica	biot	Bi
Magnetismo	gauss	G
Carga elétrica	franklin	Fr

A Tabela 2-2 lista as unidades primárias de medida no sistema MKS, junto com suas abreviações.

Tabela 2-2: Unidades de medida no sistema MKS

<i>Medida</i>	<i>Unidade</i>	<i>Abreviação</i>
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Força	Newton	N
Energia	Joule	J
Pressão	Pascal	Pa
Corrente elétrica	ampère	A
Magnetismo	Tesla	T
Carga elétrica	Coulomb	C

Não misture e combine: Mantenha as unidades físicas corretas

Como cada sistema de medida usa um comprimento padrão diferente, você pode obter vários números diferentes para uma parte do problema, dependendo da medida usada. Por exemplo, se você estiver medindo a profundidade da água em uma piscina, poderá usar o sistema de medida MKS, que fornece uma resposta em metros; o sistema CGS, mede a profundidade em centímetros; ou o sistema FPI menos comum, que, no caso, determinaria a profundidade da água em polegadas.

Porém, suponha que você queira saber a pressão da água na parte inferior da piscina. Pode, simplesmente, usar a medida encontrada para a profundidade e colocá-la na devida equação para a pressão (ver os Capítulos 14 e 15). Ao trabalhar com equações, contudo, você sempre deve manter uma coisa em mente: o sistema de medida.



Lembre-se sempre de ficar com o mesmo sistema de medida em todo o problema. Se você começar no sistema MKS, fique com ele. Se não, sua resposta será uma confusão sem sentido, pois estará trocando as medidas para diversos itens quando tenta chegar a uma única resposta. Misturar as medidas causa problemas — imagine fazer um bolo onde a receita pede duas xícaras de farinha, mas você usa dois litros.

Com os anos, vi pessoas misturarem os sistemas de medida mais e mais e, então, coçarem suas cabeças quando suas respostas davam errado. Com certeza, elas tinham intenções nobres e tudo sobre suas soluções ótimas — e, certamente, tinham critérios de mestre, aplicações de mestre e egos de mestre. Mas também tinham as respostas erradas.

Suponha que a solução para um problema de teste seja 15 quilogramas-metros por segundo², mas um aluno sugeriu o resultado 1.500 quilogramas-centímetros por segundo². A resposta está errada não por causa de um erro de compreensão, mas porque a resposta está no sistema de medida errado.

Dos metros às polegadas e de volta: Convertendo entre as unidades

Os físicos usam vários sistemas de medida para registrar números a partir de suas observações. Mas o que acontece quando você tem que converter entre esses sistemas? Os problemas da Física, algumas vezes, tentam confundir-lo aqui, dando-lhe os dados necessários em unidades misturadas: centímetros para esta medida, mas metros para aquela outra e, talvez, até misturando polegadas também. Não fique confuso. Você tem que converter *tudo* para o mesmo sistema de medida antes de continuar. Como você converte do modo mais fácil possível? Usa os fatores de conversão. Por exemplo, considere o seguinte problema:

Cruzando a fronteira do estado, você nota que percorreu 4.680 milhas em exatamente três dias. Muito impressionante. Se você estivesse em uma velocidade constante, com que rapidez estaria? Como analiso no Capítulo 3, a noção de velocidade da Física é simplesmente o que você espera — distância dividida pelo tempo. Portanto, você calcula sua velocidade como a seguir:

$$\frac{4.680 \text{ milhas}}{3 \text{ dias}} = 1.560 \text{ milhas/dia}$$

Contudo, sua resposta não está exatamente em uma unidade padrão de medida. Você deseja saber o resultado em uma unidade com a qual possa lidar, por exemplo, milhas por hora. Para obter as milhas por hora, precisa converter as unidades.



Para converter as medidas, em sistemas de medida diferentes, você pode multiplicar por um fator de conversão. Um *fator de conversão* é uma proporção que, quando multiplicada pelo item que você está convertendo, pega as unidades que você não deseja e fornece as desejadas. O fator de conversão deve ser igual a 1.

No problema anterior, você tem um resultado em milhas por dia, que é escrito como milhas/dia. Para calcular as milhas por hora, você precisa de um fator de conversão que elimine o denominador e deixe as horas em seu lugar, portanto multiplica dias por hora e cancela os dias:

$$\text{milhas/dia} \times \text{dias/hora} = \text{milhas/hora}$$

Seu fator de conversão é dias por hora. Quando você liga todos os números, simplifica a fração milhas por dia e multiplica pelo fator de conversão, seu trabalho fica assim:

$$4.680 \text{ milhas}/3 \text{ dias} = 1.560 \text{ milhas}/1 \text{ dia} = 1.560 \text{ milhas/dia} \times 1 \text{ dia}/24 \text{ horas}$$

Nota: palavras como “segundos” e “metros” agem como as variáveis x e y no sentido de que, se estivessem presentes no numerador e no denominador, cancelariam umas às outras.

Quando os números fizerem sua cabeça girar, veja as unidades

Deseja um truque secreto que os professores e instrutores geralmente usam para resolver os problemas da Física? Preste atenção nas unidades com as quais está trabalhando. Tive milhares de reuniões resolvendo problemas com alunos, trabalhando em problemas feitos em casa, e posso dizer que este é um truque que os instrutores usaram sempre.

Como um exemplo simples, digamos que sejam dados uma distância e um tempo, e você tenha que encontrar uma velocidade. Você pode simplificar o problema imediatamente, pois sabe que a distância (por exemplo, metros) dividida pelo tempo (por exemplo, segundos) fornece a velocidade (metros/segundo).

Contudo, quando os problemas ficam mais complexos, mais itens estarão

envolvidos — digamos, por exemplo, uma massa, distância, tempo etc. Você se encontra olhando as palavras de um problema para obter os valores numéricos e suas unidades. Tem que encontrar uma quantidade de energia? Como analiso no Capítulo 10, a energia é a massa vezes a distância ao quadrado sobre o tempo ao quadrado, portanto, se você puder identificar esse itens na questão, saberá como irá colocar na solução e não ficará perdido nos números.

O resultado é que as unidades são suas amigas. Elas fornecem um modo fácil de assegurar que você seja conduzido à resposta desejada. Portanto, quando se sentir envolvido em números, verifique as unidades para assegurar que esteja no caminho certo.



Note que, como há 24 horas em um dia, o fator de conversão é exatamente igual a 1, como todos os fatores de conversão devem ser. Assim, quando você multiplicar 1.560 milhas/dia por esse fator de conversão, não estará mudando nada. Tudo que está fazendo é multiplicar por 1.

Quando você cancela os dias e multiplica as frações, obtém a resposta que está procurando:

$$\frac{1.560 \text{ milhas}}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ horas}} = \frac{65 \text{ milhas}}{\text{hora}}$$

Assim, sua velocidade média é de 65 mph, o que é muito rápido, considerando que esse problema supõe que você esteja dirigindo continuamente por três dias.



Você não *tem* que usar um fator de conversão; se souber instintivamente que para converter de milhas por dia em milhas por hora precisa dividir por 24, então, muito melhor. Mas se estiver em dúvida, use um fator de conversão e anote os cálculos, pois pegar uma estrada longa é muito melhor do que cometer um erro. Já vi muitas pessoas fazerem tudo certo em um problema, exceto esse tipo de conversão simples.

Converter entre horas e dias é bem fácil, pois você sabe que um dia consiste em 24 horas. Porém, nem todas as conversões são tão óbvias; você pode não estar familiarizado com os sistemas CGS e MKS, portanto a Tabela 2-3 fornece uma lista prática para consulta (consulte as Tabelas 2-1 e 2-2 para obter as abreviações).

Tabela 2-3: Conversões do sistema MKS no sistema CGS

1 m	100 cm
1 km	1.000 m
1 kg	1.000 g
1 N	10 ⁵ dinas
1 J	10 ⁷ ergs
1 Pa	10 ba
1 A	0,1 Bi
1 T	10 ⁴ G
1 C	2,9979 × 10 ⁹ Fr

Como a diferença entre CGS e MKS é quase sempre um fator 100, converter entre os dois sistemas é fácil. Por exemplo, se você souber que uma bola cai 5 metros, mas precisa da distância em centímetros, simplesmente multiplique por 100 centímetros/1 metro para obter sua resposta:

$$5,0 \text{ metros} \times \frac{100 \text{ centímetros}}{1 \text{ metro}} = 500 \text{ centímetros}$$

Porém, e se você precisar converter para e a partir do sistema FPI? Tudo bem. Inclua todas as conversões necessárias na frente deste livro, na folha de cola amarela. Mantenha-a à mão ao ler este livro ou ao lidar com os problemas de Física sozinho.

Eliminando Alguns Zeros: Usando a Notação Científica

Os físicos têm mania de colocar suas mentes nos lugares mais estranhos possíveis e esses lugares geralmente envolvem números realmente grandes ou pequenos. Por exemplo, digamos que você esteja lidando com a distância entre o Sol e Plutão, que tem 5.890.000.000.000 metros. Você tem muitos metros em mãos, acompanhados por muitos zeros. A Física tem um modo de lidar com números muito grandes e muito pequenos; para ajudar a reduzir a confusão e torná-los mais fáceis de digerir, ela usa uma *notação científica*. Na notação científica, você expressa os zeros como uma potência de dez. Para conseguir a potência certa de dez, você conta todas as casas na frente da vírgula decimal, da direita para a esquerda, até a casa logo à direita do primeiro dígito (você não inclui o primeiro dígito porque o deixa na frente da vírgula decimal no resultado). Portanto, você pode escrever a distância entre o Sol e Plutão como a seguir:

$$5.890.000.000.000 \text{ metros} = 5,89 \times 10^{12} \text{ metros}$$

A notação científica também funciona para os números muito pequenos, como, por exemplo, o número a seguir, onde a potência de dez é negativa. Você conta o número de casas, movendo-se da esquerda para a direita, da vírgula decimal até logo depois do primeiro dígito diferente de zero (novamente, deixando o resultado com apenas um dígito na frente do decimal):

$$0.00000000000000000005339 \text{ metros} = 5,339 \times 10^{-19} \text{ metros}$$

Se o número com o qual você está trabalhando for maior que dez, terá um expoente positivo na notação científica; se ele for menor que um, terá um expoente negativo. Como pode ver, lidar com números supergrandes ou superpequenos com a notação científica é mais fácil do que escrevê-los, sendo, por isso, que as calculadoras vêm com esse tipo de funcionalidade já embutida.

Verificando a Precisão das Medidas

A precisão é importante ao fazer medidas (e análises) na Física. Você não pode concluir que sua medição mais precisa do que realmente é simplesmente por adicionar algarismos significativos, além disso você deve levar em conta a possibilidade de erro no seu sistema de medição acrescentando um \pm quando necessário. As seguintes seções aprofundam-se nos tópicos dos dígitos significantes e na precisão.

Sabendo quais dígitos são significantes

Em uma medida, os *dígitos significantes* são aqueles que foram realmente medidos. Portanto, por exemplo, se alguém disser que um foguete percorreu 10,0 metros em 7,00 segundos, a pessoa está dizendo que as medidas são conhecidas com três dígitos significantes (o número de dígitos em ambas as medidas).

Se você quiser encontrar a velocidade do foguete, poderá pegar uma calculadora e dividir 10,0 por 7,00 para obter 1,428571429 metros por segundo, que parece uma medida bem precisa. Mas o resultado é preciso demais. Se você souber as medidas com apenas três dígitos significantes, não poderá dizer que sabe a resposta com os dez dígitos significantes. Declarar tal coisa seria como pegar um metro, ler o milímetro mais próximo e, então, escrever uma resposta para o décimo de milhão mais próximo de um milímetro.

No caso do foguete, você tem apenas três dígitos significantes com os quais trabalhar, portanto o melhor que você pode dizer é que o foguete está percorrendo 1,43 metro por segundo, que é 1,428571429 arredondado para duas casas decimais. Se você incluir outros dígitos, irá declarar uma precisão que realmente não tem e não mediu.



Quando você arredondar um número, veja o dígito à direita da casa para o qual está arredondando. Se esse dígito à direita for 5 ou maior, você irá arredondar para cima. Se for 4 ou menor, irá arredondar para baixo. Por exemplo, você deve arredondar 1,428 para 1,43 e 1,42 para 1,4.

E se um transeunte disser, porém, que o foguete percorreu 10,0 metros em 7,0 segundos? Um valor tem três dígitos significantes e o outro tem apenas dois. As regras para determinar o número de dígitos significantes quando você tem dois números diferentes são as seguintes:

✓ **Quando você multiplica ou divide números**, o resultado tem que ter o mesmo número de dígitos significantes do número original que tem os menores dígitos significantes.

No caso do foguete, onde você precisa dividir, o resultado deverá ter apenas dois dígitos significantes. Portanto, a resposta correta é 1,4 metros por segundo.

- ✓ **Quando você adiciona ou subtrai números**, alinhe os pontos decimais; o último algarismo significativo no resultado corresponde à coluna mais à direita, onde todos os números ainda têm dígitos significantes.

Se você tivesse que adicionar 3,6, 14 e 6,33, escreveria a resposta com o número inteiro mais próximo – o 14 não tem nenhum algarismo significativo depois da casa decimal, portanto a resposta não deverá ter também. Para preservar os dígitos significantes, você deve arredondar a resposta para 24. Você pode ver o que quero dizer dando uma olhada por si mesmo:

$$\begin{array}{r} 3,6 \\ + 14 \\ + \underline{6,33} \\ \hline 23,93 \end{array}$$



Por convenção, os zeros são usados simplesmente para preencher os valores abaixo (ou acima) da vírgula decimal e não são considerados significantes. Por exemplo, o número 3.600 tem apenas dois dígitos significantes por padrão. Se você realmente medir o valor como sendo 3.600, naturalmente, iria expressá-lo como 3.600,0, com uma vírgula decimal; a vírgula decimal final indica que você deseja que todos os dígitos sejam significantes.

Estimando a precisão

Os físicos nem sempre contam com os dígitos significantes ao registrar as medidas. Algumas vezes, você vê medidas como

$$5,36 \pm 0,05 \text{ metros}$$

A parte $\pm (0,05 \text{ metro no exemplo anterior})$ é a estimativa do físico do possível erro na medida. Portanto o físico está dizendo que o valor real está entre $5,36 + 0,05$ (isto é, 5,41) metros e $5,36 - 0,05$ (isto é, 5,31 metros), inclusive (não é na quantidade que sua medida difere da resposta “certa” como dada nos livros; é uma indicação da precisão que seu aparelho pode medir. Em outras palavras, a confiabilidade que têm seus resultados como uma medida).

Sondando a mania \pm

Este negócio \pm ficou tão popular que você o vê em todo lugar, como em um anúncio de imóveis que anuncia $35 \pm$ acres para a venda. Algumas vezes, você até vê anúncios de imóveis com números como, por exemplo, ± 35 acres, que o faz imaginar se o

corretor percebe que o anúncio indica que a medida está na faixa de -35 até +35 acres. E se você comprar o lugar e ele acabar tendo -15 acres? Você deve ao corretor 15 acres?

Armando-se com a Álgebra Básica

Sim, a Física lida com muitas equações e, para ser capaz de manipulá-las, você deve saber como mover os itens. É hora de voltar para a álgebra básica e recordar rapidamente.

A seguinte equação informa a distância, s , que um objeto irá percorrer se iniciar a partir do repouso e acelerar em a por um tempo t :

$$s = \frac{1}{2}at^2$$

Agora, suponha que o problema realmente informe o tempo no qual o objeto estava em movimento e a distância percorrida, e pede para calcular a aceleração do objeto. Reorganizando a equação, você pode determinar a aceleração:

$$a = 2s / t^2$$

Neste caso, você multiplica os dois lados por 2 e divide os dois por t^2 para isolar a aceleração, a , em um lado da equação.

E se você tiver que determinar o tempo, t ? Movendo o número e as variáveis, você obtém a seguinte equação:

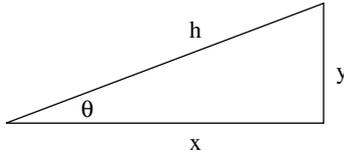
$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

Você precisa memorizar todas estas três variações sobre a mesma equação? Certamente que não. Você só grava uma equação que se relaciona com estes três itens – distância, aceleração e tempo – e, então, reorganiza a equação quando necessário (para obter uma lista prática das muitas equações que deve lembrar, verifique a folha de cola amarela na frente deste livro).

Trabalhando com um Pouco de Trigonometria

Além de um pouco de álgebra básica, você precisa saber um pouco de trigonometria, inclusive senos, cossenos e tangentes para os problemas da Física. Para encontrar esses valores, você começa com um triângulo retângulo simples — dê uma olhada na Figura 2-1, que exhibe um triângulo em toda sua glória, completo com rótulos que forneci para a explicação (note, em particular, o ângulo entre os dois lados menores, θ).

Figura 2-1:
Um triângulo rotulado que você pode usar para encontrar os valores da trigonometria.



Para encontrar os valores trigonométricos do triângulo na Figura 2-1, você divide um lado pelo outro. Você precisa saber as seguintes equações, pois quando os vetores aparecerem no Capítulo 4, essas equações serão úteis:

$$\text{sen } \theta = y/r$$

$$\text{cos } \theta = x/r$$

$$\text{tan } \theta = y/x$$

Se você tiver a medida de um ângulo e de um lado do triângulo, poderá encontrar todos os outros. Eis alguns exemplos — provavelmente, eles se tornarão muito familiares antes de você terminar qualquer curso de Física, mas você *não* precisa memorizá-los. Se souber as equações com seno, cosseno e tangente anteriores, poderá derivar as seguintes quando precisar:

$$x = r \text{ cos } \theta = y/\text{tan } \theta$$

$$y = r \text{ sen } \theta = x \text{ tan } \theta$$

$$r = y/\text{sen } \theta = x/\text{cos } \theta$$

Lembre-se de que você pode voltar com o seno, cosseno e tangente inversos, que são escritos como sen^{-1} , cos^{-1} e tan^{-1} . Basicamente, se você fornecer o seno de um ângulo na equação sen^{-1} , acabará com a medida do próprio ângulo (se você precisar de um lembrete mais profundo, verifique o livro em inglês *Trigonometria para Leigos*, de Mary Jane Sterling [Alta Books].) Eis os inversos para o triângulo na Figura 2-1:

$$\text{sen}^{-1}(y/r) = \theta$$

$$\text{cos}^{-1}(x/r) = \theta$$

$$\text{tan}^{-1}(y/x) = \theta$$

Capítulo 3

Explorando a Necessidade de Velocidade

Neste Capítulo

- ▶ Ficando por dentro da velocidade do deslocamento
- ▶ Dissecando os diferentes tipos de velocidade
- ▶ Parando e continuando com a aceleração
- ▶ Examinando a conexão entre aceleração, tempo e deslocamento
- ▶ Ligando velocidade, aceleração e deslocamento

Lá está você em sua corrida de Fórmula 1, correndo para a glória. Você tem a velocidade necessária, e os marcos estão passando rapidamente em cada lado. Você está confiante de que pode vencer e, indo para a volta final, está bem à frente. Ou, pelo menos, pensa que está. Parece que outro corredor também está fazendo um grande esforço, pois você vê um brilho prateado em seu espelho. Você olha melhor e percebe que precisa fazer algo – o vencedor do último ano está se aproximando rapidamente.

É bom que você saiba tudo sobre velocidade e aceleração. Com tal conhecimento, sabe exatamente o que fazer: você pisa no pedal, acelerando sem problemas. Seu conhecimento de velocidade permite que lide com a curva final facilmente. A bandeira quadriculada é uma mancha quando você cruza a linha de chegada em tempo recorde. Nada mal. Você pode agradecer ao seu conhecimento dos problemas neste capítulo: deslocamento, velocidade e aceleração.

Você já tem uma ideia intuitiva daquilo que analiso neste capítulo, ou não seria capaz de dirigir ou mesmo andar de bicicleta. O deslocamento significa onde você está, a velocidade é a rapidez com a qual se move e qualquer pessoa que já tenha estado em um carro conhece a aceleração. Essas forças interessam as pessoas todos os dias, e a Física fez um estudo organizado delas. Conhecer essas forças tem permitido que as pessoas planejem estradas, construam naves espaciais, organizem padrões de tráfego, voo, controlem o movimento dos planetas, prevejam o tempo e até fiquem furiosas com engarrafamentos lentos.

Compreender a Física é compreender o movimento e esse é o tópico deste capítulo. É hora de continuar.

Dissecando o Deslocamento

Quando algo se move do ponto A até o ponto B, um *deslocamento* ocorre em termos de Física. Em português simples, o deslocamento é uma *distância*. Digamos, por exemplo, que você tenha um bela bola de golfe nova que costuma rolar sozinha, mostrada na Figura 3-1. Essa bola, em particular, gosta de rolar sobre um grande metro ou uma fita métrica gigante. Você coloca a bola de golfe na posição 0 no metro, como vê na Figura 3-1, diagrama A.

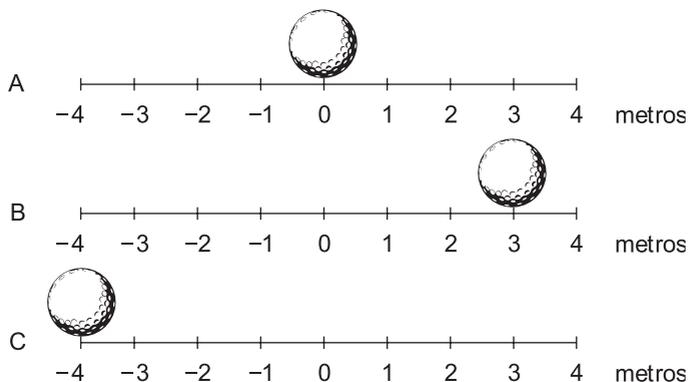


Figura 3-1: Examinando o deslocamento com uma bola de golfe.

Até então, tudo bem. Porém, note que a bola de golfe rola até um novo ponto, 3 metros para a direita, como você vê na Figura 3-1, diagrama B. A bola moveu-se e, portanto, ocorreu um deslocamento. Neste caso, o deslocamento tem apenas 3 metros para a direita. Sua posição estava em 0 metro e sua posição está em +3 metros.

Em termos físicos, geralmente você vê o deslocamento referido como a variável s (não me pergunte o porquê). Neste caso, s é igual a 3 metros.



Como qualquer outra medida na Física (exceto para certos ângulos), o deslocamento sempre tem unidades – geralmente, centímetros ou metros. Você também usa quilômetros, polegadas, pés, milhas ou até *anos-luz* (a distância que a luz percorre em um ano, uma grande distância não adequada para medir com um simples metro: 5.865.696.000.000 milhas, que tem 9.460.800.000.000 quilômetros ou 9.460.800.000.000.000 metros).

Os cientistas, sendo como são, gostam de entrar em mais detalhes. Geralmente, você vê o termo s_0 , que descreve a *posição inicial* (alternativamente referido como s_i , o i significa *inicial*). E você pode ver o termo s_f usado para descrever a *posição final*. Nesses termos, indo do diagrama A para o diagrama B na Figura 3-1, s_0 está na marca 0 do metro e s_f está em +3 metros. O deslocamento, s , é igual à posição final menos a posição inicial:

$$s = s_f - s_0 = +3 - 0 = 3 \text{ metros}$$



Os deslocamentos não têm que ser positivos; eles podem ser zero ou negativos também. Dê uma olhada na Figura 3-1, diagrama C, onde a bola de golfe sem repouso moveu-se para um novo local, medido como -4 metros no metro. Qual é o deslocamento aqui? Isso depende de qual ponto de partida você escolheu, que é sempre verdadeiro nos problemas de Física. O ponto de partida também é chamado de *origem* (de onde a ação origina-se) e, geralmente, você mesmo está livre para escolher a origem. Se você escolher a posição 0 no metro, uma escolha comum (porque é onde a bola iniciou), obterá o seguinte deslocamento:

$$s = s_f - s_0 = -4 - 0 = -4 \text{ metros}$$

Note que s é negativo!

Você também pode escolher origens diferentes da posição 0. Sem ver a Figura 3-1, o diagrama A, por exemplo, você pode decidir que a bola de golfe inicia na posição +3 metros na Figura 3-1, diagrama B, e quando ela se move para a posição -4 metros na Figura 3-1, diagrama C, você obtém este deslocamento:

$$s = s_f - s_0 = -4 - 3 = -7 \text{ metros}$$

O deslocamento depende de onde você define sua origem. Geralmente, sua escolha fica bem clara quando você trabalha em um problema. Mas o que acontece quando a situação não é clara nem linear?

Examinando eixos

O movimento que ocorre no mundo nem sempre é linear, como, por exemplo, a bola de golfe mostrada na Figura 3-1. O movimento pode ocorrer em duas ou três dimensões. E se você quiser examinar o movimento em duas dimensões, precisará de dois eixos cruzando-se, chamados de *eixos*. Você tem o eixo horizontal – o eixo x – e o eixo vertical – o eixo Y (para os problemas tridimensionais, observe um terceiro eixo – o eixo Z – ficando para cima, fora do papel).

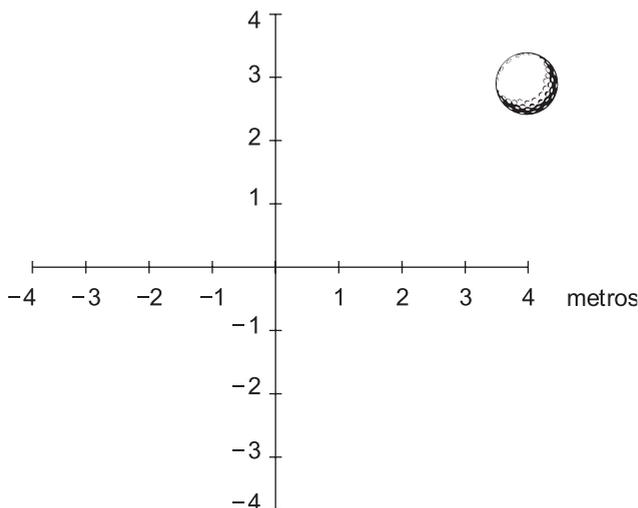
Dê uma olhada na Figura 3-2, onde uma bola de golfe move-se em duas dimensões. Ela inicia no centro do gráfico e sobe para a direita.

Em termos dos eixos, a bola de golfe move-se para +4 metros no eixo x e +3 metros no eixo Y , que é representado como o ponto (4, 3); a medida X vem primeiro, seguida da medida Y : (x, y).

Então, o que isso significa em termos de deslocamento? A mudança na posição X , Δx (Δ , a letra grega delta, significa “mudança ou diferença”), é igual à posição final menos a posição inicial. Se a bola de golfe iniciar no centro do gráfico – a origem do gráfico, local (0, 0) – você terá uma mudança no local x de

$$\Delta x = x_f - x_0 = +4 - 0 = 4 \text{ metros}$$

Figura 3-2:
Como você
em uma
partida de
golfe, nem
sempre os
objetos se
movem de
um modo
linear.



A mudança no local Y é de

$$\Delta y = y_f - y_0 = +3 - 0 = 3 \text{ metros}$$

Se você estiver mais interessado em descobrir a grandeza do deslocamento do que a mudança nos locais x e Y da bola de golfe, então a história é outra. Agora, a pergunta muda: qual a distância que a bola de golfe está de seu ponto inicial no centro do gráfico? Usando o teorema de Pitágoras, você pode encontrar a grandeza do deslocamento da bola de golfe, que é a distância que ela percorre do início ao fim. Eis como a equação funciona:

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5 \text{ metros}$$

Portanto, neste caso, a grandeza do deslocamento da bola de golfe é de exatamente 5 metros.



O teorema de Pitágoras determina que a soma das áreas dos quadrados nos catetos de um triângulo retângulo é igual à área do quadrado na hipotenusa. Visite: www.cut-the-knot.org/pythagorus/index.shtml; para obter mais informações.

Medindo a velocidade

Nas seções anteriores, você examinou o movimento dos objetos em uma e duas dimensões. Mas há mais no movimento do que apenas o movimento real. Quando o deslocamento ocorre, ele acontece em certa quantidade de tempo, significando que ocorre em certa *velocidade*. Quanto tempo leva para a bola na Figura 3-1, por exemplo, ir de sua posição inicial até a posição final? Se levar 12 anos, o diagrama para este livro já estaria pronto há muito tempo. Agora, 12 segundos? Parece muito melhor.

Medir a rapidez com a qual o deslocamento ocorre é o resto deste capítulo. Exatamente como você pode medir o deslocamento, pode medir a diferença no tempo do início ao fim do movimento e, normalmente, vê isso escrito como:

$$\Delta t = t_f - t_o$$

Aqui, t_f é o tempo final e t_o é o tempo inicial, e a diferença entre os dois é a quantidade de tempo que leva para algo acontecer, como, por exemplo, uma bola de golfe movendo-se para seu destino final. Os cientistas desejam saber tudo sobre a rapidez com a qual as coisas acontecem e isso significa medir a velocidade.

Particularidades da Velocidade: O Que é Velocidade, Afinal?



Você já pode ter uma ideia convencional definida de velocidade, supondo que você fale como um cientista:

$$\text{velocidade} = \text{distância} / \text{tempo}$$

Por exemplo, se você percorrer uma distância s em um tempo t , sua velocidade, v , será

$$v = s / t$$



A variável v realmente significa *velocidade* (um conceito que analiso no Capítulo 4), mas a verdadeira velocidade também tem uma direção associada, que a rapidez não tem. Por isso, a velocidade é um *vetor* (geralmente, você vê o vetor da velocidade representado como \vec{v}). Os vetores têm uma grandeza e uma direção, portanto, com a velocidade, você não sabe apenas a rapidez com a qual está movendo-se, mas, também, em qual direção. A rapidez é apenas uma grandeza (se você tiver certo vetor de velocidade, de fato, a rapidez será a grandeza desse vetor), portanto você a vê representada pelo termo v (sem negrito). A propósito, o deslocamento também é um vetor, e você pode ler mais sobre isso no Capítulo 4.

Ufa, foi bem fácil, certo? Tecnicamente falando (os físicos adoram falar tecnicamente), a rapidez é a mudança na posição dividida pela mudança no tempo, portanto você também poderá representá-la assim, se, digamos, estiver se movendo no eixo X:

$$v = \Delta x / \Delta t = (x_f - x_o) / (t_f - t_o)$$

Geralmente, você não vê a rapidez representada em gráficos no mundo real. A rapidez pode ter muitas formas, que você descobrirá nas seções a seguir.

Lendo o velocímetro: Velocidade instantânea

Você já tem uma ideia do que é velocidade; é o que você mede no velocímetro de seu carro, certo? Quando você está usando ferramentas, tudo que tem que fazer para ver sua velocidade é observar o velocímetro. Nele, você tem: 75 mph. Hmm, melhor diminuir um pouco – 65 mph agora. Você está vendo sua velocidade neste momento em particular. Em outras palavras, vê sua *velocidade instantânea*.



A velocidade instantânea é um termo importante ao compreender a física da velocidade, portanto lembre-se. Se você estiver a 65 mph agora, essa será sua velocidade instantânea. Se você acelerar para 75 mph, isso se tornará sua velocidade instantânea. A velocidade instantânea é sua velocidade em determinado instante do tempo. Dois segundos a partir de agora, sua velocidade instantânea poderá ser totalmente diferente.

Ficando firme: Velocidade uniforme

E se você continuar dirigindo a 65 mph para sempre? Conseguirá uma *velocidade uniforme* na Física (também chamada de *velocidade constante*), e isto é possível na parte oeste dos Estados Unidos, onde as estradas são linhas retas intermináveis, e você não tem que mudar sua velocidade.

O movimento uniforme é a variação de velocidade mais simples a descrever, pois nunca muda.

Desviando para a frente e para trás: Movimento não uniforme

O *movimento não uniforme* varia com o tempo; é o tipo de velocidade que você encontra com mais frequência no mundo real. Quando você está dirigindo, por exemplo, muda a velocidade com frequência e suas alterações na velocidade ganham vida em uma equação como esta, onde v_f é sua velocidade final e v_o é sua velocidade original:

$$\Delta v = v_f - v_o$$

A última parte deste capítulo é sobre a aceleração, que ocorre no movimento não uniforme (sendo a aceleração ou a desaceleração).

Disparando o cronômetro: Velocidade média

As equações da velocidade nem sempre têm ideias intangíveis. Você pode medir a velocidade de modo mais concreto. Digamos, por exemplo, que você queira andar de Nova Iorque até Los Angeles para visitar a família de seu tio, uma distância de mais ou menos 2.781 milhas. Se a viagem levar quatro dias, qual foi sua velocidade?

A velocidade é a distância percorrida dividida pelo tempo que leva, portanto sua velocidade para a viagem seria de

$$2.781 \text{ milhas} / 4 \text{ dias} = 695,3$$

Tudo bem, você calcula 695,3, mas 695,3 *o quê?*

Esta solução divide milhas por dias, portanto você sugere 695,3 milhas por dia. Não é exatamente uma unidade padrão de medida – Quanto seria em milhas por hora? Para encontrar, você pode retirar os “dias” da equação e colocar “horas” (ver Capítulo 2). Como um dia tem 24 horas, você pode multiplicar isso assim (note que os “dias” cancelaram-se, deixando milhas sobre horas ou milhas por hora):

$$(2.871 \text{ milhas} / 4 \text{ dias}) \times (1 \text{ dia} / 24 \text{ horas}) = 28,97 \text{ mph}$$

Você percorre 28,97 mph. Essa é uma resposta melhor, embora pareça bem lento, pois, quando você está dirigindo, está acostumado a andar a 65 mph. Você calculou uma *velocidade média* sobre a viagem inteira, obtida dividindo a distância total pelo tempo de viagem total, que inclui o tempo sem dirigir.



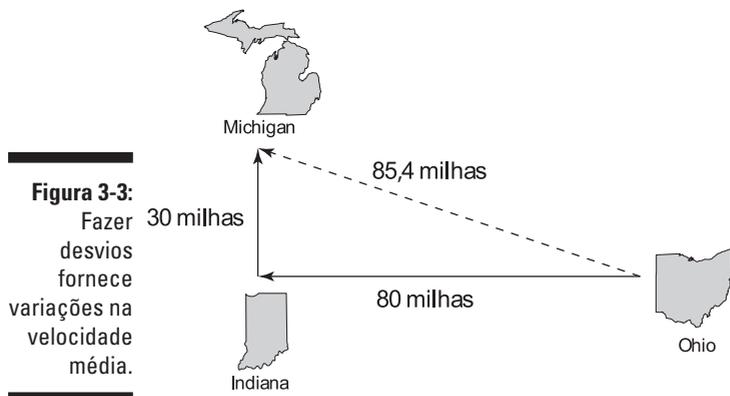
A velocidade média, algumas vezes, é escrita como \bar{v} ; uma barra sobre uma variável significa a *média* em termos físicos.

Opondo velocidade média versus movimento uniforme

A velocidade média difere da velocidade instantânea, a menos que você esteja viajando em movimento uniforme, neste caso, sua velocidade nunca varia. Na verdade, como a velocidade média é a distância total dividida pelo tempo total, pode ser muito diferente de sua velocidade instantânea.

Em uma viagem de Nova Iorque para Los Angeles, você pode parar em um hotel várias noites e, enquanto dorme, sua velocidade instantânea é de 0 milha por hora; mas, até nesse momento, sua velocidade média é de ainda 28,97 mph (veja a seção anterior para saber esse cálculo)! É por isso que você mede a velocidade média dividindo a distância inteira, 2.781 milhas, pelo tempo que leva a viagem, 4 dias.

A velocidade média também depende dos pontos inicial e final. Digamos, por exemplo, que enquanto você está dirigindo para Ohio em sua viagem pelo continente, deseja fazer um desvio para visitar sua irmã em Michigan, depois de deixar em Indiana uma pessoa que pediu carona. O caminho de sua viagem pode parecer com as linhas retas na Figura 3-3 – primeiro, 80 milhas até Indiana e, depois, 30 milhas até Michigan.



Se você dirigir 55 mph e tiver que cobrir $80 + 30 = 110$ milhas, levará 2 horas. Mas se você calcular a velocidade pegando a distância entre o ponto inicial e o ponto final, 85,4 milhas em linha reta, obterá:

$$85,4 \text{ milhas} / 2 \text{ horas} = 42,7 \text{ mph}$$

Você calculou sua velocidade média na linha pontilhada entre os pontos inicial e final da viagem e, se isso for o que realmente deseja, tudo bem. Mas se estiver interessado em sua velocidade média nos dois catetos da viagem, terá que medir o tempo que leva para um cateto e dividir pelo comprimento desse cateto para obter a velocidade média para essa parte da viagem.

Se você se mover em uma velocidade uniforme, sua tarefa será mais fácil. Poderá ver a distância inteira percorrida, que é de $80 + 30 = 110$ milhas, não apenas 85,4 milhas. E 110 milhas divididas por 2 horas são 55 mph, que, como você viaje em uma velocidade constante, é sua velocidade média nos dois catetos da viagem. Na verdade, como sua velocidade é constante, 55 mph é também sua velocidade instantânea em qualquer ponto na viagem.



Ao considerar o movimento, não é só a rapidez que importa, também a direção. É por isso que a velocidade é importante, pois permite registrar a rapidez de um objeto e sua direção. Unir velocidade e direção permite lidar com casos como os da viagem pelo continente, nos quais a direção pode mudar.

Aumentando a Velocidade (ou Diminuindo): Aceleração

Exatamente como a velocidade, você já sabe o básico sobre a aceleração. A *aceleração* é a rapidez com a qual sua velocidade muda. Quando você passa pela saída do estacionamento e ouve os pneus cantando, sabe o que virá em seguida – alguém está acelerando para cortá-lo. E, com certeza, o inconsequente aparecerá na sua frente, tirando um fino. Depois que ele passa, diminui ou *desacelera*, logo na sua frente, forçando-o a frear para desacelerar. É muito bom você saber tudo sobre Física.

Definindo aceleração

Em termos físicos, a aceleração, a , é a quantidade com a qual sua velocidade muda em uma dada quantidade de tempo, ou:

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Dadas as velocidades inicial e final, v_0 e v_f , os tempos inicial e final sobre os quais sua velocidade muda, t_0 e t_f , você também pode escrever a equação assim:

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_0) / (t_f - t_0)$$



A aceleração, como a velocidade (ver Capítulo 4), realmente é um vetor e, geralmente, é descrito como \mathbf{a} , no estilo vetorial. Em outras palavras, a aceleração, como a velocidade e a desaceleração, tem uma direção associada.

Determinando as unidades da aceleração

Você pode calcular as unidades da aceleração bem facilmente dividindo a velocidade pelo tempo para obter a aceleração:

$$a = (v_f - v_0) / (t_f - t_0)$$

Em termos de unidades, a equação fica assim:

$$a = (v_f - v_0) / (t_f - t_0) = \text{distância/tempo/tempo} = \text{distância/tempo}^2$$

Distância sobre o tempo *ao quadrado*? Não deixe que isso o derrube. Você acaba com o tempo ao quadrado no denominador, porque divide a velocidade pelo tempo. Em outras palavras, a aceleração é a proporção na qual sua velocidade muda, pois as proporções têm o tempo no denominador.



A unidade de aceleração é a distância dividida pelo tempo ao quadrado. Portanto, para a aceleração, você verá unidades de metros por segundo², centímetros por segundo², milhas por segundo², pés por segundo² ou, até, quilômetros por hora².

Por exemplo, digamos que você esteja dirigindo a 75 mph e vê luzes vermelhas piscando no espelho retrovisor. Você vai para o acostamento, levando cerca de 20 segundos para parar. O policial aparece em sua janela e diz: “Você está dirigindo a 75 mph em uma zona de 30 mph”. O que você responde?

Você pode calcular a rapidez com a qual desacelerou quando encostou, o que, sem dúvida alguma, impressionaria o policial – olhe para você e veja suas tendências de obediência à lei! Você pega sua calculadora e começa a fornecer dados. Comece convertendo 75 mph em algo que vê com mais frequência nos problemas de Física – centímetros por segundo, por exemplo. Primeiro, você converte em milhas por segundo:

$$75,0 \text{ mph} \times (1 \text{ hora} / 60 \text{ minutos}) \times (1 \text{ minuto} / 60 \text{ segundos}) = 0,0208 = 2,08 \times 10^{-2} \text{ milhas por segundo}$$

Em seguida, você tem que converter de milhas por segundo em centímetros por segundo. Você vê no Capítulo 2 que 1 polegada = 2,54 cm, portanto, comece convertendo de milhas por segundo para polegadas por segundo:

$$2,08 \times 10^{-2} \text{ mps} \times 5.280 \text{ pés} \times 12 \text{ polegadas} = 1.318 \text{ polegadas}$$

Sua velocidade é igual a 1.318 polegadas por segundo, mas você não impressionará o policial, a menos que converta em centímetros por segundo. Pegue sua calculadora novamente e faça esta conversão:

$$2,08 \times 10^{-2} \text{ mps} \times 5.280 \text{ pés} \times 12 \text{ pés} \times 2,54 \text{ centímetros} = 3.350 \text{ cm/s}$$

Tudo bem, então, a velocidade original era 3.350 centímetros por segundo e sua velocidade final era 0 centímetro por segundo, e você conseguiu essa alteração na velocidade em 20 segundos; desta forma, qual era sua aceleração? Você sabe que a aceleração é a mudança na velocidade dividida pela mudança no tempo, escrita assim:

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Ligando os números, fica assim:

$$a = \Delta v / \Delta t = 3.350 \text{ cm/seg} / 20 \text{ segundos} = 168 \text{ cm/seg}^2$$

Sua aceleração era de 168 cm/seg². Mas isso não pode estar certo! Você já pode ver o problema aqui; dê uma olhada na definição original da aceleração:

$$a = \Delta v / \Delta t (v_i - v_o) / (t_i - t_o)$$

Sua velocidade final era 0 e sua velocidade original era 3.350 cm/seg, portanto ligar os números aqui fornecerá esta aceleração:

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_o) / (t_f - t_o) = (0 - 3350 \text{ cm/seg}) / 20 \text{ segundos} = -168 \text{ cm/seg}^2$$

Em outras palavras, -168 cm/seg^2 , *não* $+168 \text{ cm/seg}^2$ – uma grande diferença em termos de resolver problemas de Física (e em termos de execução da lei). Se você desacelerou com $+168 \text{ cm/seg}^2$, ao invés de -168 cm/seg^2 , acabou indo a 150 mph no final de 20 segundos, não 0 mph. E, provavelmente, isso não deixaria o policial muito contente.

Agora, você tem sua aceleração. Você pode desligar sua calculadora e sorrir, dizendo: “Talvez, eu estivesse indo um pouco rápido, policial, mas sou muito obediente à lei. Por isso, quando ouvi a sirene, acelerei com -168 cm/seg^2 para encostar prontamente”. O policial pega sua calculadora e faz alguns cálculos rápidos. “Nada mal”, ele diz, impressionado. E você sabe que escapou.

Assim como a velocidade não vetorial, a aceleração vetorial tem muitas formas que afetam seus cálculos em várias situações da Física. Em diferentes problemas da Física, você tem que levar em conta se a aceleração é positiva ou negativa, média ou instantânea, uniforme ou não uniforme. As seguintes seções exploram essas variações.

Aceleração positiva e negativa

Não deixe que alguém pegue você no lado errado de um sinal numérico. As acelerações, como as velocidades, podem ser positivas ou negativas, e você tem que assegurar que tenha o sinal certo. Se você desacelerar até a parada completa do carro, por exemplo, sua velocidade original era positiva e sua velocidade é 0, portanto a aceleração é negativa porque uma velocidade positiva cai para 0.

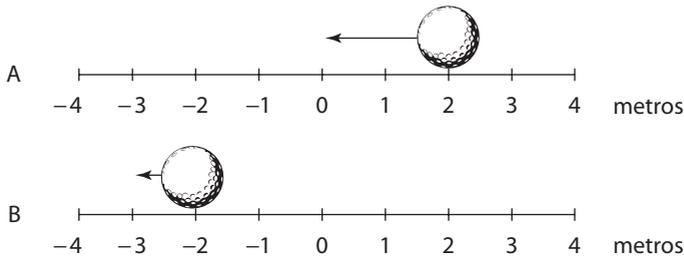


A aceleração, como a velocidade, tem um sinal, assim como as unidades.

E mais, não se engane pensando que uma aceleração negativa (desaceleração) sempre significa diminuir a velocidade ou que uma aceleração positiva sempre significa aumentar a velocidade. Por exemplo, veja a bola na Figura 3-4, que está movendo na direção negativa no diagrama A. No diagrama B, a bola ainda está se movendo na direção negativa, mas em uma velocidade mais lenta.

Figura 3-4:

A bola de golfe está viajando na direção negativa, mas com uma aceleração positiva, portanto, diminui a velocidade.



Como a velocidade negativa da bola diminuiu, a aceleração é *positiva* durante a diminuição da velocidade. Em outras palavras, para diminuir sua velocidade negativa, você tem que adicionar um pouco de velocidade positiva, o que significa que a aceleração é positiva.



O sinal da aceleração informa *como* a velocidade está mudando. Uma aceleração positiva informa que a velocidade está aumentando na direção positiva e uma aceleração negativa informa que a velocidade está aumentando na direção negativa.

Aceleração média e instantânea

Exatamente como você pode verificar a velocidade média e instantânea, pode verificar as *acelerações média e instantânea*. A aceleração média é a proporção da mudança na velocidade e a mudança no tempo. Você calcula a aceleração média, também escrita como \bar{a} , obtendo a velocidade final, subtraindo a velocidade original e dividindo o resultado pelo tempo total (tempo final menos tempo original):

$$\bar{a} = (v_f - v_o) / (t_f - t_o)$$

Esta equação fornece uma aceleração média, mas a aceleração pode não ter sido esse valor médio o tempo todo. Em qualquer ponto, a aceleração que você mede é a aceleração instantânea e esse número pode ser diferente da aceleração média. Por exemplo, quando vê pela primeira vez as luzes vermelhas da polícia piscando atrás de você, pode pressionar os freios, o que fornece uma grande desaceleração. Mas quando você encosta para parar, tira pouco o pé, portanto a desaceleração é menor; porém, a aceleração média é um valor simples, derivado da divisão da mudança total na velocidade pelo tempo total.

Aceleração uniforme e não uniforme

A aceleração pode ser uniforme ou não uniforme. A aceleração não uniforme requer uma mudança na aceleração. Por exemplo, quando você está dirigindo, encontra sinais de trânsito ou semáforos com frequência e quando desacelera para e, então, acelera de novo, participa da aceleração não uniforme.

Outras acelerações são muito uniformes (em outras palavras, não mudam), como, por exemplo, a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra. Essa aceleração é de 9,8 metros por segundo² para baixo, em direção ao centro da Terra e não muda (se mudasse, muitas pessoas ficariam bem assustadas).

Relacionando Aceleração, Tempo e Deslocamento

Você lida com quatro quantidades de movimento neste capítulo: aceleração, velocidade, tempo e deslocamento. Você trabalha a equação padrão relacionando deslocamento e tempo na seção sobre deslocamento para obter a velocidade:

$$v = \Delta x / \Delta t = (x_f - x_o) / (t_f - t_o)$$

E você vê a equação padrão relacionando velocidade e tempo para obter a aceleração a partir da seção da velocidade:

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_o) / (t_f - t_o)$$

Mas as duas equações têm apenas um nível de profundidade, relacionando velocidade ao deslocamento e ao tempo, e aceleração à velocidade e ao tempo. E se você quiser relacionar a aceleração ao deslocamento e ao tempo?

Digamos, por exemplo, que você desiste da carreira de corredor em pistas ovais para tornar-se um corredor de pistas retas para analisar sua aceleração na pista reta. Depois de uma corrida de teste, você sabe a distância que percorreu – 0,25 milha ou cerca de 402 metros – e sabe o tempo que levou – 5,5 segundos. Portanto, qual foi a dificuldade da partida – a aceleração – quando você explodiu na pista? Boa pergunta. Você precisa relacionar a aceleração, tempo e deslocamento; a velocidade não está envolvida.

Você pode derivar uma equação que relaciona a aceleração, tempo e deslocamento. Para tornar isto mais simples, essa derivação não funciona em termos de $v_f - v_o$; você pode subtrair depois facilmente os valores iniciais.



Quando você está lidando com a álgebra, pode achar mais fácil trabalhar com quantidades simples, como, por exemplo, v ao invés de $v_f - v_o$, se possível. Geralmente, você pode transformar v em $v_f - v_o$, posteriormente, se for necessário.

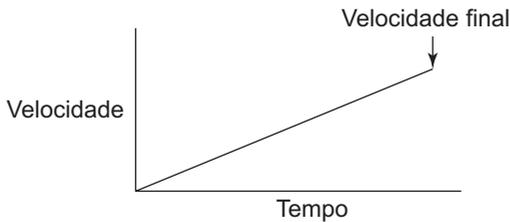
Relações não tão distantes

Você relaciona a aceleração, distância e tempo lidando com as equações até obter o que deseja. O deslocamento é igual à velocidade média multiplicada pelo tempo:

$$s = \bar{v} \times t = \bar{v}t$$

Você tem um ponto de partida. Mas qual é a velocidade média durante a corrida em pista reta da seção anterior? Você começou em 0 e terminou indo muito rapidamente. Como sua aceleração era constante, sua velocidade aumentou em linha reta de 0 até seu valor final, como mostrado na Figura 3-5.

Figura 3-5:
Aumentando a velocidade sob uma aceleração constante.



Em média, sua velocidade foi metade de seu valor final e você sabe disso porque havia uma aceleração constante. Sua velocidade final foi de:

$$v_f = a \times t = at$$

Tudo bem, você pode achar sua velocidade final, que é a sua velocidade média, porque acabou em uma linha reta, que foi de:

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (a \times t)$$

Até então, tudo certo. Agora, você pode ligar essa velocidade média à equação $s = \bar{v}t$ e obter:

$$s = \bar{v}t = \frac{1}{2} (v_f t)$$

E como sabe que $v_f = at$, poderá obter:

$$s = \bar{v}t = \frac{1}{2} v_f t = \frac{1}{2} (at)(t)$$

E isso se torna:

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

Você também pode colocar $t_f - t_o$, em vez de apenas o t comum:

$$s = \frac{1}{2} a(t_f - t_o)^2$$

Parabéns! Você elaborou uma das equações mais importantes que precisa saber ao trabalhar com os problemas de Física relacionados à aceleração, deslocamento, tempo e velocidade.

Comparando situações mais rápidas

E se você não começar na velocidade zero, mas ainda deseja relacionar a aceleração, tempo e deslocamento? E se estiver indo a 100 mph? Essa velocidade inicial certamente se somaria à distância final percorrida. Como a distância é igual à velocidade multiplicada pelo tempo, a equação fica assim (não se esqueça que isso supõe que a aceleração é constante):

$$s = v_0(t_f - t_o) + \frac{1}{2} (a)(t_f - t_o)^2$$

Bem complicado. Como em outras equações longas, não recomendo memorizar suas formas estendidas, a menos que tenha uma memória fotográfica. É suficiente decorar

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

Se você não iniciar em 0 segundo, terá que subtrair o tempo inicial para obter o tempo total no qual a aceleração está em vigor.



Se você não iniciar em repouso, terá que adicionar a distância que vem da velocidade inicial ao resultado também. Se puder, realmente ajudará a resolver os problemas usando tanto bom senso quanto for capaz, portanto terá controle sobre tudo, ao invés de tentar mecanicamente aplicar fórmulas sem saber o que está acontecendo, que é quando os erros acontecem.

Assim, qual foi sua aceleração quando dirigiu na corrida em pista reta que apresentei nas últimas seções? Bem, você sabe como relacionar a distância, aceleração e tempo, e o que deseja – você sempre trabalha a álgebra para que acabe relacionando todas as quantidades que conhece a uma quantidade que *não* conhece. Neste caso, você tem:

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

Você pode reorganizar isto com um pouco de álgebra; simplesmente dividindo ambos os lados por t^2 e multiplicando por 2 para obter

$$a = 2s / t^2$$

Ótimo! Ligando os números, você obtém:

$$a = 2s / t^2 = 2 (402 \text{ metros}) / (5,5 \text{ segundos})^2 = 27 \text{ metros/segundo}^2$$

Tudo bem, 27 metros por segundo². O que é isso em termos mais compreensíveis? A aceleração devido à gravidade, g , é de 9,8 metros por segundo², portanto é cerca de 2,7 g .

Relacionando Velocidade, Aceleração e Deslocamento

Impressionante, diz o livro de texto de Física esperto, você tem resolvido os problemas muito bem até agora. Mas, acho que te peguei. Imagine que você seja um corredor de pistas retas como exemplo. Fornecerei apenas a aceleração – 26,6 metros por segundo² – e sua velocidade final – 146,3 metros por segundo. Com essas informações, desejo que encontre a distância total percorrida. Peguei você, heim? “Não mesmo”, você diz, muito confiante. “Deixe-me pegar minha calculadora”.

Você sabe a aceleração e a velocidade final e deseja saber a distância total que leva para ter essa velocidade. Este problema parece um quebra-cabeça, porque as equações neste capítulo envolveram tempo até este ponto. Mas, se você precisar do tempo, sempre poderá determiná-lo. Você sabe a velocidade final, v_f , a velocidade inicial, v_o (que é zero), e sabe a aceleração, a . Como:

$$v_f - v_o = at$$

você sabe que

$$t = (v_f - v_o) / a = (146,3 - 0) / 26,6 = 5,5 \text{ segundos}$$

Agora, você tem o tempo. Você ainda precisa da distância e pode obtê-la assim:

$$s = \frac{1}{2} at^2 + v_o t$$

O segundo termo cai, pois $v_o = 0$, portanto tudo que você tem a fazer é ligar os números:

$$s = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2}(26,6)(5,5)^2 = 402 \text{ metros}$$

Em outras palavras, a distância total percorrida é de 402 metros ou um quarto de milha. Deve ser uma pista de quarto de milha.



Se você for um aficionado por equações (e quem não é?), poderá tornar isto mais simples com uma nova equação, a última deste capítulo. Você deseja relacionar a distância, aceleração e velocidade. Eis como funciona: primeiro, você determina o tempo:

$$t = (v_f - v_o) / a$$

Como o deslocamento $= \bar{v}t$ e $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_o + v_f)$, quando a aceleração é constante, você pode obter

$$s = \frac{1}{2}(v_o + v_f)t$$

Substituindo o tempo, você obtém

$$s = \frac{1}{2}(v_o + v_f)t = \frac{1}{2}(v_o + v_f)[(v_f - v_o) / a]$$

Depois de fazer a álgebra, obtém

$$s = \frac{1}{2}(v_o + v_f)t = \frac{1}{2}(v_o + v_f)[(v_f - v_o) / a] = (v_f^2 - v_o^2) / 2a$$

Movendo $2a$ para o outro lado da equação, você obtém uma importante equação de movimento:

$$v_f^2 - v_o^2 = 2as = 2a(x_f - x_o)$$

Puxa, se você puder memorizar isto, será capaz de relacionar a velocidade, aceleração e distância.

Agora, pode se considerar um mestre do movimento.

Capítulo 4

Seguindo Direções: Para Qual Caminho Você Está Indo?

Neste Capítulo

- ▶ Dominando a adição e a subtração com vetores
- ▶ Colocando vetores em coordenadas numéricas
- ▶ Mergulhando vetores em componentes
- ▶ Identificando o deslocamento, aceleração e velocidade como vetores
- ▶ Completando um exercício na velocidade gravitacional

Não será fácil chegar onde você quer – a pé, de bicicleta, carro, avião – se não souber qual *caminho* percorrer. A distância não é o que importa; você precisa saber a distância e em qual direção deseja ir. O Capítulo 3 é sobre forças, tais como deslocamento, velocidade e aceleração, com equações como, por exemplo, $s = v_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}a(t_f - t_0)^2$, fornecendo sua distância. Trabalhando com essas forças, você obterá respostas como 27 metros por segundo² ou 42,7 mph. Esses valores são bons, mas e a direção?

No mundo real, você precisa saber qual caminho irá percorrer. Os *vetores* são para isso. Muitas pessoas que lutaram contra com os vetores decidiram que, simplesmente, não gostam deles, o que é um erro – os vetores são fáceis de se lidar, e você fará isso neste capítulo. Divido os vetores de cima para baixo e relaciono as forças do movimento ao conceito de vetores.

Conquistando os Vetores

No Capítulo 3, você trabalhou com números simples ou medidas chamadas *grandezas* na Física. Se você medir um deslocamento de 3,0 metros, por exemplo, esse deslocamento terá uma grandeza de 3,0 metros. Os *vetores* são a próxima etapa; eles adicionam direção a uma grandeza. Eles imitam a vida diária – quando uma pessoa o guia, ela pode dizer algo como: “O grupo de busca seguiu 15 milhas nessa direção” e ponto, fornecendo uma grandeza (uma medida) e uma direção (apontando). Quando você está ajudando alguém a suspender uma porta, a pessoa pode dizer: “Empurre firme para a

esquerda!”. Outro vetor. Quando desvia para evitar a colisão com alguém em seu carro, você acelera ou desacelera e vira em outra direção. Mais outro vetor.



Muitas situações na vida diária exibem vetores, como, por exemplo, fornecer direções, instruções para suspender uma porta ou desviar para evitar um acidente. E como a Física imita a vida diária, muitos conceitos na Física são vetores também, tais como velocidade, aceleração, força e muito mais. Por isso, você deve acolher os vetores, pois os vê em praticamente qualquer curso de Física feito. Os vetores são fundamentais.

Pedindo direções: Fundamentos do vetor



Quando você tem um vetor, tem que se lembrar de duas quantidades: sua direção e sua grandeza. Tecnicamente falando, as forças que têm apenas uma quantidade, como, por exemplo; a velocidade, são chamadas *escalares*. Se você adicionar uma direção a um escalar, criará um vetor.

Visualmente, você vê vetores desenhados como setas na Física, o que é perfeito, porque uma seta tem uma direção clara e uma grandeza clara (o comprimento da seta). Dê uma olhada na Figura 4-1. A seta representa um vetor que inicia no pé e termina na cabeça.

Figura 4-1:
A seta, um
vetor, tem
direção e
grandeza.



Você pode usar os vetores para representar uma força, aceleração, velocidade etc. Na Física, você usa **A** para representar um vetor. Em alguns livros, você vê o símbolo com uma seta, assim:

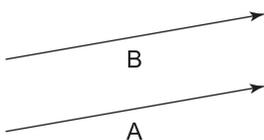
$$\vec{A}$$

A seta significa que este não é apenas um valor escalar, que seria representado por **A**, mas, também, alguma coisa com direção.

Digamos que você fale para alguns espertalhões que sabem tudo sobre vetores. Quando eles pedirem para você fornecer um vetor, **A**, você fornecerá não apenas sua grandeza, como também sua direção, pois precisa dessas duas partes de informações juntas para definir esse vetor. Isso irá impressioná-los no final! Por exemplo, você pode dizer que **A** é um vetor a 15 graus (15°) a partir do horizonte com uma grandeza de 12 metros por segundo. Os sabichões sabem tudo, inclusive que **A** é um vetor de velocidade.

Dê uma olhada na Figura 4-2, que apresenta dois vetores, **A** e **B**. Eles parecem bem iguais – o mesmo comprimento e a mesma direção. Na verdade, esses vetores são *iguais*. Os dois vetores serão iguais se tiverem a mesma grandeza e direção, e você pode escrever da seguinte forma

Figura 4-2:
Duas setas
(e vetores)
com a
mesma
grandeza e
direção.



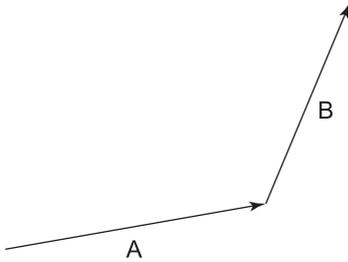
Você está a caminho de se tornar um profissional do vetor. Você já sabe que, quando vê o símbolo **A**, está lidando com um item que tem uma grandeza e uma direção – ou um vetor – e que dois vetores serão iguais se tiverem a mesma grandeza e direção. Porém, há mais. E se, por exemplo, alguém disser que o hotel que você está procurando está a 20 milhas diretamente ao norte e, *então*, a 20 milhas diretamente a leste? A que distância está o hotel e em qual direção?

Reunindo as direções: Adicionando vetores

Você pode adicionar dois vetores de direção e, quando fizer isso, obterá um *vetor resultante* – a soma dos dois – que fornece a distância até seu destino e a direção para esse destino.

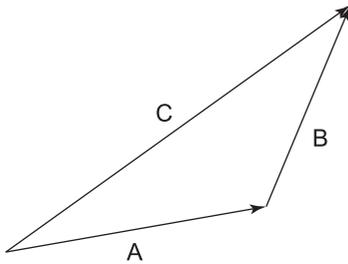
Suponha, por exemplo, que um transeunte informe-o que, para chegar ao seu destino, primeiro você tem que seguir o vetor **A** e, então, o vetor **B**. Onde é exatamente esse destino? Você resolve este problema exatamente como encontra o destino todos os dias. Primeiro, vai para o final do vetor **A** e, nesse ponto, vai para o final do vetor **B**, como vê na Figura 4-3.

Figura 4-3:
Ir do final de um vetor até a cabeça de um segundo, leva-o até seu destino.



Quando você chega ao final do vetor **B**, a que distância está de seu ponto de partida? Para descobrir, você desenha um vetor, **C**, de seu ponto inicial até seu ponto final, como vê na Figura 4-4.

Figura 4-4:
Obtenha a soma dos dois vetores criando um novo vetor.



O novo vetor, **C**, representa o resultado de sua viagem completa, do início ao fim. Para obter **C**, tudo que você tem que fazer é desenhar os dois vetores **A** e **B** e, então, desenhar **C** como o vetor resultante.



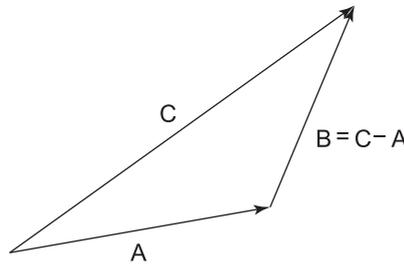
Você torna simples a adição dos vetores colocando um na extremidade do outro e desenhando o novo vetor ou a soma do início do primeiro vetor até o final do segundo. Em outras palavras, $C = A + B$. **C** é chamado de soma, resultado ou vetor resultante. Mas, se apenas uma opção o chateia, existem outros modos de combinar os vetores também – você pode subtraí-los se quiser.

Separando a distância: Subtraindo vetores

E se alguém fornecer a você o vetor **C** e o vetor **A** da Figura 4-4 e disser: “Você pode obter sua diferença?”. A diferença é o vetor **B**, pois quando você soma os vetores **A** e **B**, acaba com o vetor **C**. Para mostrar à pessoa o que você quer dizer, você explica que subtrai **A** de **C** assim: $C - A$. Você não encontra a subtração de vetores com frequência em problemas de Física, mas ela aparece, portanto vale a pena ver.

Para subtrair dois vetores, você coloca seus pés (a parte da seta sem ponta) juntos – você não coloca o pé de um na cabeça do outro, como faz ao adicionar vetores – e, então, desenha o vetor resultante, que é a diferença dos dois vetores, da cabeça do vetor que está subtraindo (**A**) até a cabeça do vetor *do qual* o subtraiu (**C**). Para fazer as cabeças a partir da parte final, verifique a Figura 4-5, na qual você subtrai **A** de **C** (em outras palavras, $C - A$). Como pode ver, o resultado é **B**, pois $C = A + B$.

Figura 4-5:
Subtraindo dois vetores, colocando seus pés juntos e desenhando o resultado.



Outro modo (mais fácil para algumas pessoas) de fazer a subtração dos vetores é inverter a direção do segundo vetor (**A** em $C - A$) e usar a adição dos vetores (isto é, iniciar com o primeiro vetor [**C**], colocar o pé do vetor invertido [**A**] na cabeça do primeiro vetor e desenhar o vetor resultante).

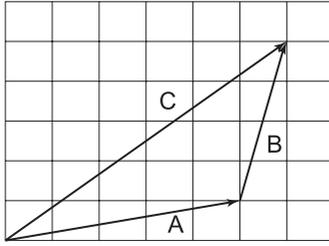
Como pode ver, a adição e a subtração dos vetores são possíveis com os mesmos vetores, nos mesmos problemas. Na verdade, todos os tipos de operações matemáticas são possíveis com os vetores. Isso significa que na forma de equação, você pode lidar com os vetores exatamente como lida com os escalares, como, por exemplo, $C = A + B$, $C - A = B$ etc. Isso parece bem numérico, e é. Você pode obter número com os vetores, exatamente como pode com os escalares.

Colocando Números nos Vetores

Os vetores podem parecer bons como setas, mas este não é exatamente o modo mais preciso de lidar com eles. Você pode obter números nos vetores, separando-os quando precisar. Dê uma olhada no problema da adição dos vetores, $A + B$, mostrado na Figura 4-6. Agora que você tem os vetores representados em um gráfico, pode ver como realmente é fácil sua adição.

Suponha que as medidas na Figura 4-6 estejam em metros. Isso significa que o vetor **A** está a 1 metro para cima e 5 para a direita, e o vetor **B** está a 1 metro para direita e 4 para cima. Para adicioná-los e o resultado, o vetor **C**, você soma as partes horizontais e as partes verticais.

Figura 4-6:
Use as coordenadas vetoriais para lidar com os vetores facilmente.



O vetor resultante, **C**, está a 6 metros à direita e a 5 metros para cima. Você pode ver como fica na Figura 4-6 – para obter a parte vertical da soma, **C**, simplesmente adicione a parte vertical de **A** à parte vertical de **B**. E para obter a parte horizontal da soma, você adicionará a parte horizontal de **A** à parte horizontal de **B**.



Se a adição dos vetores ainda parecer obscura, você poderá usar uma notação que foi inventada para os vetores para ajudar os físicos e os leitores do *Para Leigos* a fazer isso corretamente. Como **A** está a 5 metros para a direita (a direção do eixo X positivo) e a 1 para cima (a direção do eixo Y positivo), você poderá expressá-lo com as coordenadas (x, y), assim:

$$\mathbf{A} = (5, 1)$$

E como **B** está a 1 metro para a direita e a 4 para cima, você poderá expressá-lo com as coordenadas (x, y), assim:

$$\mathbf{B} = (1, 4)$$

Ter uma notação é ótimo, pois torna muito simples a soma vetorial. Para adicionar dois vetores, você apenas soma suas partes X e Y, respectivamente, para obter as partes X e Y do resultado:

$$\mathbf{A} = (5, 1) + \mathbf{B} = (1, 4) = \mathbf{C} (6, 5)$$

Portanto, o segredo da adição vetorial é dividir cada vetor em suas partes X e Y e, então, somar isso separadamente para obter as partes X e Y do vetor resultante? Só isso. Agora, você pode obter quantos números quiser, pois está apenas adicionando ou subtraindo números. Pode requerer um pouco de trabalho obter X e Y, mas é uma etapa necessária. E quando você tiver o resultado, irá sentir-se confortável.

Para ter outro exemplo, suponha que você esteja procurando um hotel que está a 20 milhas diretamente ao norte e, então, a 20 milhas diretamente a leste. Qual é o vetor que aponta para o hotel a partir de seu local inicial? Levando em conta as informações de suas coordenadas, este é um problema fácil. Digamos que a direção leste

esteja no eixo X positivo e que o norte esteja no eixo Y positivo. A Etapa 1 das direções de sua viagem é 20 milhas diretamente ao norte e a Etapa 2 é 20 milhas diretamente a leste. Você pode escrever o problema na notação vetorial assim (leste [X positivo], norte [Y positivo]):

Etapa 1: (0, 20)
Etapa 2: (20, 0)

Para adicionar esses dois vetores, some as coordenadas:

$$(0, 20) + (20, 0) = (20, 20)$$

O vetor resultante é (20, 20). Ele aponta de seu ponto inicial diretamente para o hotel.



Para ter outro método numérico rápido, você pode executar uma multiplicação simples de vetores. Por exemplo, digamos que você esteja dirigindo a 150 mph para o leste em uma pista de corridas e vê um competidor no espelho retrovisor. Tudo bem, você pensa; você simplesmente dobrará sua velocidade:

$$2(0, 150) = (0, 300)$$

Agora, você está voando a 300 mph na mesma direção. Neste problema, você multiplica um vetor por um escalar.

Dividindo Vetores em Componentes

Os problemas de Física nunca dizem diretamente o que você quer saber. Observe o primeiro vetor visto neste capítulo – o vetor **A** na Figura 4-1. Ao invés de dizer que o vetor **A** é a coordenada (4, 1) ou algo parecido, um problema pode dizer que uma bola está rolando em uma mesa em 15° com uma velocidade de 7,0 metros por segundo e pergunta quanto tempo levará para a bola sair da borda da mesa, se essa borda estiver a 1,0 metro de distância à direita. Dadas as informações, você poderá encontrar os componentes que criam os problemas vetoriais.

Encontrando os componentes do vetor, dados as grandezas e os ângulos

Você pode começar a encontrar informações vetoriais difíceis dividindo um vetor em suas partes. Quando você divide um vetor em partes, elas são chamadas de seus *componentes*. Por exemplo, no vetor (4, 1), o componente do eixo X é 4 e o componente do eixo Y é 1.

Geralmente, um problema de Física fornece um ângulo e uma grandeza para definir um vetor; você mesmo tem que encontrar os componentes. Se você souber que uma bola está rolando em uma mesa em 15° com uma velocidade de 7,0 metros por segundo e quiser descobrir quanto tempo ela levará para sair da borda a 1,0 metro à direita, o que precisa é a direção do eixo X. Portanto, o problema divide-se para encontrar quanto tempo a bola levará para rolar 1,0 metro na direção X. Para descobrir, você precisa saber com que rapidez a bola está se movendo na direção X.

Você já sabe que a bola está rolando em uma velocidade de 7,0 metros por segundo em 15° na horizontal (no eixo x positivo), que é um vetor: 7,0 metros por segundo em 15° fornece uma grandeza e uma direção. O que você tem aqui é uma *velocidade* – a versão vetorial da rapidez. A rapidez da bola é a grandeza de seu vetor de velocidade v , e quando você adiciona uma direção a essa rapidez, obtém o vetor de velocidade \mathbf{v} .

Aqui, você não precisa apenas da velocidade, mas, também, do *componente X* da velocidade da bola para encontrar a rapidez com a qual a bola está viajando até a borda da mesa. O componente X é um escalar (um número, não um vetor) e é escrito assim: v_x . O componente Y do vetor de velocidade da bola é v_y . Portanto, você pode dizer que:

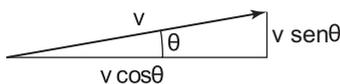
$$\mathbf{v} = (v_x, v_y)$$

É assim que você expressa a divisão de um vetor em seus componentes. Então, o que é v_x aqui? E, neste sentido, o que é v_y , o componente Y da velocidade? O vetor tem um comprimento (7,0 metros por segundo) e uma direção ($\theta = 15^\circ$ na horizontal). E você sabe que a borda da mesa está a 1,0 metro à direita. Como pode ver na Figura 4-7, você tem que usar alguma trigonometria (ah, não!) para determinar esse vetor em seus componentes. Sem sofrimentos; a trigonometria é fácil depois que você obtém os ângulos vistos na Figura 4-7. A grandeza de um vetor \mathbf{v} é expressa como v (se sua aula de Física usar v , você usará $|\mathbf{v}|$) e, na Figura 4-7, você pode ver que:

$$v_x = v \cos \theta$$

$$v_y = v \sin \theta$$

Figura 4-7:
Dividir um vetor em seus componentes permite adicioná-los ou subtraí-los facilmente.





Vale a pena conhecer as duas equações dos componentes vetoriais, pois você as vê *muito* em qualquer curso de Física para iniciantes. Saiba como funcionam e sempre as tenha à mão.

Você pode ir além, relacionando cada lado do triângulo entre si (e se souber que $\tan \theta = \text{sen } \theta / \text{cos } \theta$, poderá derivar tudo isso das duas equações anteriores quando for requerido; não precisa memorizar tudo):

$$v_x = v \cos \theta = v_y / \tan \theta$$

$$v_y = v \text{sen } \theta = v_x \tan \theta$$

$$v = v_y / \text{sen } \theta = v_x / \text{cos } \theta$$

Você sabe que $v_x = v \cos \theta$, portanto pode encontrar o componente X da velocidade da bola, v_x , assim:

$$v_x = v \cos \theta = v \cos 15^\circ$$

Ligar os números fornecerá:

$$v_x = v \cos \theta = v \cos 15^\circ = (7,0)(0,96) = 6,7 \text{ metros por segundo}$$

Agora, você sabe que a bola está viajando a 6,7 metros por segundo para a direita. E como a borda da mesa está a 1,0 metro de distância,

$$1,0 \text{ metro} / 6,7 \text{ metros por segundo} = 0,15 \text{ segundo}$$

Como você sabe com que rapidez a bola está indo na direção X, agora sabe a resposta para o problema: levará 0,15 segundo para que a bola caia da borda da mesa. E o componente Y da velocidade? Isso é fácil de encontrar também:

$$v_y = v \text{sen } \theta = v \text{sen } 15^\circ = (7,0)(0,26) = 1,8 \text{ metro por segundo}$$

Encontrando grandezas e ângulos, dados os componentes do vetor

Algumas vezes, você tem que encontrar os ângulos de um vetor, ao invés dos componentes. Por exemplo, suponha que você esteja procurando um hotel que esteja a 20 milhas diretamente ao norte e, então, 20 milhas diretamente a leste. Qual é o ângulo que o hotel está a partir de seu local atual e a que distância? Você pode escrever este problema na notação vetorial, assim (veja a seção “Colocando números nos vetores”):

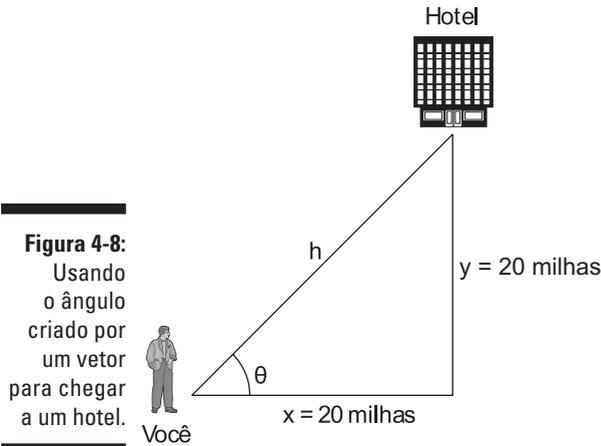
Etapa 1: (0, 20)

Etapa 2: (20, 0)

Ao somar esses vetores, você obterá este resultado:

$$(0, 20) + (20, 0) = (20, 20)$$

O vetor resultante é $(20, 20)$. Esse é um modo de especificar um vetor – use seus componentes. Mas este problema não está pedindo os resultados em termos de componentes. A questão deseja saber o ângulo em que está o hotel a partir de seu local atual e a que distância. Em outras palavras, vendo a Figura 4-8, o problema pergunta: “Qual é h e qual é θ ?”



Encontrar h não é tão difícil, pois você pode usar o teorema de Pitágoras:

$$h = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Ligar os números fornecerá

$$h = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 28,3 \text{ milhas}$$

O hotel está a 28,3 milhas de distância. E o ângulo θ ? Por causa de seu conhecimento superior de trigonometria, você sabe que:

$$x = h \cos \theta$$

$$y = h \sin \theta$$

Em outras palavras, você sabe que:

$$x / h = \cos \theta$$

$$y / h = \sin \theta$$

Agora, tudo que você precisa fazer é obter o seno ou o cosseno inverso (você realmente não precisa memorizar isso; se já souber que $x = h \cos \theta$ e $y = h \sin \theta$, poderá derivar isso quando precisar):

$$\theta = \text{sen}^{-1}(y / h)$$

$$\theta = \text{cos}^{-1}(x / h)$$

Como você obtém o seno inverso (sen^{-1}) ou o cosseno inverso (cos^{-1})? Veja sua calculadora e procure os botões sen^{-1} e cos^{-1} ! Simplesmente digite o número do qual deseja o seno ou o cosseno inverso e pressione o devido botão. Neste caso, você pode encontrar o ângulo θ assim:

$$\theta = \text{sen}^{-1}(y / h) = \text{sen}^{-1}(20 / 28,3) = 45^\circ$$

Agora, você sabe tudo que há para saber: o hotel está a 28,3 milhas de distância, em um ângulo de 45° . Outro triunfo da Física!



Se você for um mestre da trigonometria, poderá usar a tangente para descobrir o ângulo θ ; não precisa fazer nenhuma etapa intermediária para encontrar h primeiro:

$$y = x \tan \theta$$

$$\theta = \tan^{-1}(y / x)$$

Revelando as Identidades dos Vetores

Você tem duas maneiras de descrever os vetores para resolver os problemas de Física. A primeira é em termos de seus componentes X e Y. A segunda é em termos de uma grandeza e um ângulo (o ângulo geralmente é dado em graus, de 0° a 360° , onde 0° está no eixo positivo). Saber como converter entre essas duas formas é muito importante, pois, para executar a adição de vetores, você precisa da forma do componente, mas os problemas de Física geralmente fornecem os vetores na forma de grandeza/ângulo.



Eis como você pode converter a forma grandeza/ângulo de um vetor na forma componente:

$$h = (x, y) = (h \cos \theta, h \sin \theta)$$



Esta equação supõe que θ é o ângulo entre o componente horizontal e a hipotenusa (o lado mais longo de um triângulo, oposto ao ângulo reto), que você vê na Figura 4-8. Se você não tiver esse ângulo, poderá derivá-lo lembrando que adicionar os ângulos em um triângulo fornece um total de 180° . E em um triângulo retângulo, como o da Figura 4-8, o ângulo reto = 90° , portanto os outros dois ângulos têm que somar até 90° também.



Se você tiver a forma do componente (x, y) de um vetor, poderá obter sua grandeza e ângulo assim:

$$h = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \text{sen}^{-1}(y / h) = \text{cos}^{-1}(x / h) = \text{tan}^{-1}(y / x)$$

Este é o tipo de coisa que você deve ter na manga, pois as conversões derrubam muitas pessoas. É onde geralmente vejo as pessoas, que, realmente, estavam dominando o material, começarem a se afastar – tudo porque não dominavam a conversão de um vetor em componentes.

Você também deve lembrar que os vetores, embora sejam principalmente bons para resolver os problemas de Física, têm identidades próprias. Adivinhe? Praticamente todas as quantidades (exceto a velocidade) que cobri no Capítulo 3 são realmente vetores, não escalares. O deslocamento não é um escalar – a Física trata-o como um vetor e, como tal, tem uma grandeza e uma direção associadas.

O deslocamento é um vetor

Em vez de escrever o deslocamento como s , você deve escrevê-lo como \mathbf{s} , um vetor com grandeza e direção (se você estiver escrevendo no papel poderá colocar uma seta sobre o s para indicar seu status de vetor). Quando você estiver falando sobre o deslocamento no mundo real, a direção será tão importante quanto a grandeza.

Por exemplo, digamos que seus sonhos tenham se tornado realidade: Você é um grande herói do beisebol ou do softbol, movimentado-se lentamente em outra linha no campo externo. Você vai para a primeira base, que sabe estar a 90 pés de distância. Mas 90 pés em qual direção? Sabendo como é a Física vital, você sabe que a primeira base está a 90 pés de distância em um ângulo de 45° , como pode ver na Figura 4-9. Agora, você está pronto, tudo porque sabe que o deslocamento é um vetor. Neste caso, eis o vetor de deslocamento:

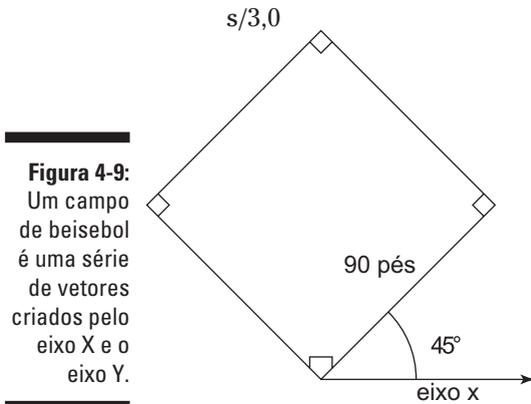
$$\mathbf{s} = 90 \text{ pés a } 45^\circ$$

O que é isso em componentes?

$$\mathbf{s} = (s \cos \theta, s \sin \theta) = (63 \text{ pés}, 63 \text{ pés})$$

A velocidade é outro vetor

Imagine que você simplesmente alcançou a base no campo de beisebol e está correndo na linha da primeira base ou no vetor s , a 90 pés em um ângulo de 45° no eixo X positivo. Mas, quando corre, você se pergunta: “minha velocidade fará com que eu evite o jogador da primeira base?”. Uma boa pergunta, pois a bola está a caminho a partir da segunda e terceira bases. Pegando sua calculadora, você descobre que levará cerca de 3 segundos para alcançar a primeira base a partir da base local; portanto, qual é sua velocidade? Para encontrar sua velocidade, você dividirá rapidamente o vetor s pelo tempo que leva para alcançar a primeira base:



Esta expressão representa um vetor de deslocamento dividido por um tempo e o tempo é apenas um escalar. O resultado pode ser um vetor também. E é: velocidade ou v :

$$s / 3,0 = 90 \text{ pés a } 45^\circ / 3,0 \text{ segundos} = 30 \text{ pés por segundo a } 45^\circ = v$$



Sua velocidade é de 30 pés por segundo a 45° e é um vetor, v . Dividir um vetor por um escalar fornecerá um vetor com unidades diferentes e a mesma direção. Neste caso, você vê que dividir um vetor de deslocamento, s , por um tempo, fornecerá um vetor de velocidade, v . Tem a mesma grandeza quando você dividiu uma distância por um tempo, mas, agora, você vê uma direção associada também, pois o vetor de deslocamento, s , é um vetor. Portanto, você acaba com um resultado vetorial, ao invés dos escalares vistos no Capítulo 3.

Porém, com sua visão de Física rápida, você decidirá que essa velocidade não será suficiente para levá-lo com segurança à primeira base, pois o primeiro jogador da base tem a bola e está vindo em sua direção. Uma direção reta é errada. O que você pode fazer? Você tem que *desviar*!

Aceleração: Sim, outro vetor

O que acontece quando você desvia, seja em um carro ou andando? Você acelera em uma direção diferente. E, exatamente como o deslocamento e a velocidade, a aceleração é um vetor, a .

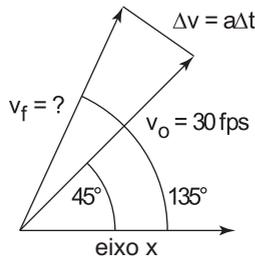
Suponha que você acabou de alcançar uma base em um jogo de softball e está correndo para a primeira base. Você descobre que precisa do componente Y de sua velocidade a pelo menos, 25 pés por segundo, para evitar o primeiro jogador que tem a bola e está esperando-o por causa de um arremesso ruim na linha de base, e que você desvia em 90° para seu caminho atual com uma aceleração de $60 \text{ pés por segundo}^2$ (em uma tentativa desesperada de esquivar-se do primeiro jogador). Essa aceleração será suficiente para mudar sua velocidade, para aquilo que você precisa, em um décimo de segundo antes de o jogador da primeira base tocá-lo com a bola? Com certeza, o desafio cabe a você!

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \Delta t$$

Agora, você pode calcular a mudança em sua velocidade a partir de sua velocidade original, como mostrado na Figura 4-10 (onde fps = pés por segundo).

Figura 4-10:

Você pode usar a aceleração e mudar a tempo de encontrar uma mudança na velocidade.



Encontrar sua nova velocidade, \mathbf{v}_f , torna-se uma questão de adição vetorial. Isso significa que você tem que dividir sua velocidade original, \mathbf{v}_0 , e mudar sua velocidade, $\Delta \mathbf{v}$, para os componentes. É assim que \mathbf{v}_0 fica igual a:

$$\mathbf{v}_0 = (v_0 \cos \theta, v_0 \sin \theta) = (30 \text{ fps} \cos 45^\circ, 30 \text{ fps} \sin 45^\circ) = (21,2 \text{ fps}, 21,2 \text{ fps})$$

Você está quase lá. Agora, e $\Delta \mathbf{v}$, a mudança em sua velocidade? Você sabe que $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \Delta t$ e que $\mathbf{a} = 60 \text{ pés por segundo}^2$ a 90° em seu caminho atual, como mostrado na Figura 4-10. Você pode encontrar a grandeza de $\Delta \mathbf{v}$, pois $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{a} \Delta t = (60 \text{ pés por segundo}^2)(0,1 \text{ segundo}) = 6 \text{ pés por segundo}$.

Mas e o ângulo de $\Delta \mathbf{v}$? Se você observar a Figura 4-10, poderá ver que $\Delta \mathbf{v}$ está em um ângulo de 90° em seu caminho atual, estando, ele próprio, em um ângulo de 45° a partir do eixo X positivo; portanto, $\Delta \mathbf{v}$ está em um ângulo total de 135° em relação ao eixo X positivo. Reunir tudo isso significa que você pode determinar $\Delta \mathbf{v}$ em seus componentes:

$$\Delta \mathbf{v} = 6 \text{ fps} = (\Delta v \cos 135^\circ, \Delta v \sin 135^\circ) = (-4,2 \text{ fps}, 4,2 \text{ fps})$$

Agora, você tem tudo que precisa para executar a adição vetorial para encontrar sua velocidade final:

$$\mathbf{V}_o + \Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_f = (21,2 \text{ fps}, 21,2 \text{ fps}) + (-4,2 \text{ fps}, 4,2 \text{ fps}) = (17,0, 25,4)$$

Você terminou: $\mathbf{v}_f = (17,0 \text{ fps}, 25,4 \text{ fps})$. O componente Y de sua velocidade final é mais do que você precisa, que é 25,0 pés por segundo. Tendo completado seu cálculo, você afasta sua calculadora e desvia como o planejado. E, para a surpresa de todos, funciona – você evita o homem da primeira base surpreso e vai para a primeira base com segurança, sem sair da linha de base (um desvio apertado de sua parte!). A multidão grita, e você inclina seu boné, sabendo que tudo é devido ao seu conhecimento superior de Física. Depois que o barulho diminui, você dá uma olhada sagaz na segunda base. Você pode alcançá-la no próximo lance? É hora de calcular os vetores, portanto você pega sua calculadora de novo (o que não é muito agradável para a multidão).

Eis como lidar com as equações em termos de vetores para o deslocamento, velocidade e aceleração. Você transforma todas as equações que usam essas quantidades como escalares, no Capítulo 3, em equações vetoriais assim:

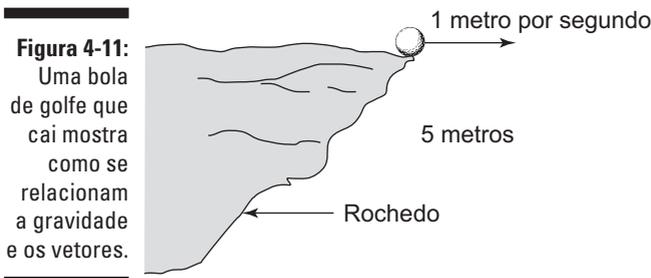
$$\mathbf{s} = \mathbf{v}_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2} \mathbf{a}(t_f - t_0)^2$$



Note que o deslocamento total é uma combinação de onde a velocidade, como vetor, leva você em um determinado momento, adicionado ao deslocamento que você obtém com a aceleração constante.

Deslizando no Arco-íris da Gravidade: Um Exercício de Velocidade

Embora você descubra como trabalhar com a gravidade no Capítulo 6, deve dar uma olhada aqui, porque os problemas da gravidade apresentam bons exemplos de trabalho com vetores em duas dimensões. Imagine que uma bola de golfe viajando na horizontal, a 1,0 metro por segundo, esteja para ser arremessada de um rochedo de 5 metros de altura, como mostrado na Figura 4-11. A pergunta: qual distância, da base do rochedo, ela alcançará e qual será sua velocidade total? Primeiro, você tem que descobrir por quanto tempo a bola de golfe estará voando.



É hora de reunir os fatos. Você sabe que a bola de golfe tem o vetor de velocidade $(1, 0)$ e que está voando a 5,0 metros do chão. Quando ela cai, diminui com uma aceleração constante, g , a aceleração devido à gravidade, que é de 9,8 metros por segundo².

Portanto, como você pode descobrir qual distância, da base do rochedo, a bola de golfe alcançará? Um modo de resolver este problema é determinar quanto tempo ela leva para atingir o chão. Como a bola de golfe apenas acelera na direção Y (direto para baixo), o componente X de sua velocidade, v_x , não muda, significando que a distância horizontal que ela atinge será de $v_x t$, onde t é o tempo no qual a bola de golfe está no ar. A gravidade está acelerando a bola quando ela cai, portanto a seguinte equação, que relaciona o deslocamento, aceleração e tempo, é boa de usar:

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

Neste caso, a distância para que ela caia é de 5,0 metros e a grandeza de a é g , a aceleração devido à gravidade (9,8 metros por segundo²). Assim, a equação divide-se em:

$$5,0 \text{ metros} = \frac{1}{2} gt^2$$

significando que o tempo que a bola de golfe leva para atingir o chão é de

$$t = \sqrt{\frac{2(5,0)}{9,8}} \text{ segundos} = 1,0 \text{ segundo}$$

Você descobre que a bola de golfe estará voando por 1,0 segundo. Tudo bem, é um progresso. Como o componente X da velocidade da bola não variou durante esse tempo, você poderá calcular a distância percorrida na direção X, assim:

$$x = v_x t$$

Ligar os números fornecerá

$$x = (1,0)(1,0) = 1,0 \text{ metro}$$

A bola de golfe atingirá 1,0 metro a partir da base do rochedo.

É hora de descobrir qual será a velocidade da bola de golfe. Você já sabe metade da resposta, pois o componente X de sua velocidade, v_x , não é afetado pela gravidade, portanto não muda. A gravidade está empurrando a bola de golfe na direção Y, não na X, que significa que a velocidade final da bola de golfe será assim: $(1,0, ?)$. Então, você tem que descobrir o componente Y da velocidade ou ? no vetor $(1,0, ?)$. Para tanto, poderá usar a seguinte equação:

$$\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_o = \mathbf{a}t$$

Neste caso, $v_0 = 0$, a aceleração é g , e você deseja a velocidade final da bola na direção Y , então a equação fica assim:

$$v_y = gt$$

Ligar os números fornecerá

$$v_y = gt = (9,8)(1,0) = 9,8 \text{ metros/segundo}$$



Mas, adivinhe? A aceleração devido à gravidade, g , também é um vetor, \mathbf{g} . Isso faz sentido, pois \mathbf{g} é uma aceleração. Esse vetor aponta para o centro da Terra – isto é, na direção Y negativa e na superfície da Terra, seu valor é $-9,8$ metros por segundo².

O sinal negativo aqui indica que g está apontando para baixo, em direção a Y negativo. Portanto, o resultado real é

$$v_y = gt = (-9,8)(1,0) = -9,8 \text{ metros/segundo}$$

O vetor de velocidade final da bola de golfe quando ela atinge o chão é de $(1,0, -9,8)$ metros por segundo. Você ainda precisa encontrar a velocidade da bola de golfe quando ela atinge o ponto, que é a grandeza de sua velocidade. Você pode descobrir isso bem facilmente:

$$v_f = \sqrt{1,0^2 + 9,8^2} = 9,9 \text{ metros por segundo}$$

Você venceu! A bola de golfe alcançou 1,0 metro a partir da base do rochedo, e sua velocidade nesse tempo será de 9,9 metros por segundo. Nada mal.

Parte II

Que as Forças da Física Estejam Com Você

A 5ª Onda

Por Rich Tennant



Nesta parte...

A Parte II fornece os fatos concretos das famosas leis, como, por exemplo, “Para toda ação, há uma reação igual e oposta”. O assunto das forças é onde brilha Isaac Newton. Suas leis e as equações nesta parte permitem que você preveja o que acontecerá quando aplica uma força em um objeto. Massa, aceleração, fricção – todas as forças estão aqui.

Capítulo 5

Quando o Empurrão Torna-se Impulso: Força

Neste Capítulo

- ▶ Ficando forte
- ▶ Descobrimos os três empregos da força de Newton
- ▶ Utilizando vetores de força com as leis de Newton

Este capítulo é onde você encontra as três famosas leis do movimento de Newton. Você já ouviu falar nessas leis de várias formas, como, por exemplo, “Para toda ação, há uma reação igual e oposta”. Isso não está muito certo; é melhor assim: “Para toda *força*, há uma *força* igual e oposta”, e este capítulo existe para corrigir o erro. Neste capítulo, uso as leis de Newton como um veículo para focar na força e como ela afeta o mundo.

Forçando o Problema

Você não pode fugir das forças em seu cotidiano; você usa a força para abrir portas, digitar em um teclado, dirigir um carro, pilotar uma escavadora contra uma parede, subir as escadas da Igreja da Penha (não todas, necessariamente), tirar sua carteira do bolso – até para respirar ou falar. Sem saber, leva em conta a força quando cruza pontes, anda sobre o gelo, leva um cachorro-quente até sua boca, retira a tampa de uma jarra ou pisca seus cílios para seu amor. A força está associada integralmente ao fazer os objetos moverem-se e a Física tem um grande interesse em compreender como ela funciona.

A força é *divertida*. Como outros tópicos da Física, você pode achar que é difícil, mas apenas antes de conhecê-la. Como os velhos colegas deslocamento, rapidez e aceleração (ver Capítulos 3 e 4), a força é um vetor, significando que tem uma grandeza e uma direção (diferente, digamos, da rapidez, que tem apenas grandeza).



O Sr. Isaac Newton foi o primeiro a colocar interação entre força, massa e aceleração na forma de equação no século XVII. (ele também é famoso pelas maçãs que caem de árvores e da consequente expressão matemática da gravidade; veja o Capítulo 6, onde Newton também brilha).

Newton e a velocidade da luz

As leis de Newton foram muito revistas pelo colega Albert Einstein e sua teoria da relatividade. A teoria da relatividade mostra como as leis de Newton não continuam igualmente quando você está se movendo em velocidades próximas à da luz. A ideia da teoria é que a velocidade da luz é a mais rápida possível, significando que qualquer interação pode ocorrer apenas nessa velocidade ou inferior; portanto, quando você está chegando perto dessa velocidade, tem que levar em conta o fato de que essas

interações serão afetadas. Quando você mede o comprimento de uma nave espacial, do nariz até a cauda quando ela está em movimento, por exemplo, sua cauda terá se movido apreciavelmente quando você puder medir com seu metro, portanto, o comprimento medido será diferente com o foguete imóvel perto de você. Como poderá ver no Capítulo 21, a teoria da relatividade de Einstein acaba retificando bastante a visão da Física de Newton.

Como em todos os avanços na Física, Newton fazia primeiro as observações, modelava-as mentalmente e, então, expressava esses modelos em termos matemáticos. Se você tiver vetores na manga (ver Capítulo 4), a matemática será muito fácil.



Newton expressava seu modelo usando três afirmações, que ficaram conhecidas como as leis de Newton. Porém, as afirmações realmente não são leis; a ideia é que elas sejam “leis da natureza”, mas não se esqueça que a Física apenas modela o mundo e, como tal, está sujeita a uma revisão posterior.

Para seu Primeiro Truque, a Primeira Lei do Movimento de Newton

Tambores rufando, por favor. As leis de Newton explicam o que acontecem com as forças e o movimento, e sua primeira lei afirma: “Um objeto continuará em estado de repouso ou em estado de movimento com velocidade constante em uma linha reta, a menos que seja levado a mudar esse estado por uma força resultante”. Qual é a tradução? Se você não aplicar uma força em um objeto em repouso ou em movimento, ele ficará em repouso ou nesse mesmo movimento em linha reta. Para sempre.

Por exemplo, ao marcar um gol no hóquei, o disco de hóquei desliza em direção ao gol, em linha reta, porque o gelo sobre o qual ele desliza é praticamente sem atrito. Se você tiver sorte, o disco não entrará em contato com a raquete do goleiro adversário, que faria com que seu movimento fosse mudado.



Na vida cotidiana, os objetos não se movem sem esforço no gelo. A maioria dos objetos à sua volta está sujeita ao atrito, portanto, quando você desliza uma caneca de café em sua mesa, ela se move por um momento e, depois, diminui até parar (ou derrama – não tente fazer isso em casa). Isso não quer dizer que a primeira lei de Newton seja inválida, apenas que o atrito fornece uma força para mudar o movimento da caneca até pará-la.



Dizer que se você não aplicar uma força em um objeto em movimento ele ficará em movimento para sempre, parece muito com uma máquina de movimento contínuo. Contudo, você simplesmente não pode fugir das forças que, basicamente, afetarão um objeto em movimento, mesmo que esse objeto esteja em um espaço interplanetário. Mesmo os limites mais distantes do espaço, o repouso da massa no Universo puxa você, mas muito levemente. E isso significa que seu movimento é afetado. Em grande parte para o movimento contínuo.

O que a primeira lei de Newton realmente diz é que o único modo de fazer algo mudar seu movimento é usar a força. Em outras palavras, a força é a causa do movimento. Também diz que um objeto em movimento tende a ficar em movimento, o que introduz a ideia de inércia.

Continuando: Inércia e massa

A *inércia* é a tendência natural de um objeto de ficar em repouso ou em movimento constante, em linha reta. A inércia é uma qualidade da massa e a massa de um objeto realmente é apenas uma medida de sua inércia. Para fazer um objeto se mover – isto é, mudar seu estado atual de movimento – você tem que aplicar uma força para superar sua inércia.

Digamos, por exemplo, que você esteja de férias em sua casa de verão, observando duas embarcações na doca: um bote e um navio petroleiro. Se você aplicar a mesma força em cada um com seu pé, as embarcações responderão de modos diferentes. O bote irá afastar-se e deslizará na água. O petroleiro irá mover-se mais lentamente (com a perna forte que você tem!). É porque ambos têm massas diferentes e, portanto, quantidades diferentes de inércia. Ao responder à mesma força, um objeto com pouca massa – e uma pequena quantidade de inércia – irá acelerar mais rapidamente do que um objeto com grande massa, que tem uma quantidade grande de inércia.

Às vezes, a inércia, a tendência da massa de preservar seu estado atual de movimento, pode ser um problema. Os caminhões frigoríficos de carne, por exemplo, têm grandes quantidades de carne congelada penduradas no teto e quando os motoristas dos caminhões começam a fazer curvas, eles criam um movimento de pêndulo que não para. Os caminhões com motoristas inexperientes podem acabar tombando por causa da inércia da carga congelada que balança na traseira.



Como a massa tem inércia, ela resiste em mudar seu movimento e, por isso, há a necessidade de aplicar forças para ter velocidade e aceleração. A massa liga a força e a aceleração.

Medindo a massa

As unidades de massa (e, portanto, a inércia) dependem de seu sistema de medida. No sistema metro-quilograma-segundo (MKS) ou no Sistema Internacional de Unidades (SI), a massa é medida em

quilogramas (com a influência da gravidade, um quilograma de massa pesa cerca de 2,205 libras). No sistema centímetro-grama-segundo (CGS), o grama é realçado e são precisos mil gramas para formar um quilograma.

Qual é a unidade de massa no sistema pé-libra-segundo? Segure-se: é a *libra-massa*. Com a influência da gravidade, uma libra-massa tem um peso de mais ou menos 32 libras. É igual em massa à 14,59 quilogramas.



Massa não é igual a peso. Massa é uma medida da inércia; quando você coloca essa massa em um campo gravitacional, obtém o peso. Portanto, por exemplo, uma libra-massa é uma determinada quantidade de massa. Quando você sujeita essa libra-massa a uma tração gravitacional na superfície da Terra, ela tem peso. E esse peso tem cerca de 32 libras.

Senhoras e Senhores, a Segunda Lei do Movimento de Newton

A primeira lei de Newton é legal, mas não fornece muita matemática. Assim, os físicos precisam de mais. E Newton oferece sua segunda lei: quando uma força resultante, ΣF , age em um objeto de massa m , a aceleração dessa massa pode ser calculada usando a fórmula $\Sigma F = ma$. Tradução: força é igual a massa vezes aceleração. O Σ que você vê significa “soma”, portanto $\Sigma F = ma$ em termos leigos é “a soma de todas as forças em um objeto, ou a *força resultante*, igual a massa vezes a aceleração”.

A primeira lei de Newton – um corpo em movimento fica em movimento em uma linha reta, a menos que uma força atue sobre ele – realmente é apenas um caso especial da segunda lei de Newton, onde $\Sigma F = 0$. Isso significa que a aceleração = 0 também, que é a primeira lei de Newton. Por exemplo, veja o disco de hóquei na Figura 5-1 e imagine que ele está lá, na frente de uma rede. Os dois devem se encontrar.

Em um movimento totalmente consciente, você decide aplicar seu conhecimento de Física. Você pega sua cópia deste livro e consulta o que ele tem a dizer sobre as leis de Newton. Descobre que, se aplicar a força de sua raquete no disco por um décimo de segundo, poderá acelerá-lo na devida direção. Você experimenta e com certeza o disco voa para a rede. Ponto! A Figura 5-1 mostra como você fez o gol. Você aplicou uma força no disco, que tem certa massa e ele partiu – acelerando na direção empurrada.

Figura 5-1:
Acelerando
um disco de
hóquei



Qual é sua aceleração? Isso depende da força aplicada, pois $\Sigma F = ma$. Mas para medir a força, você tem primeiro que decidir sobre as unidades.

Nomeando as unidades da força

Então, quais são as unidades da força? Bem, $\Sigma F = ma$, portanto, no sistema MKS ou SI, a força tem que ter estas unidades:

$$\text{kg-metros/seg}^2$$

Como a maioria das pessoas acha que esta linha de unidade parece um pouco complicada, as unidades MKS receberam um nome especial: *Newtons* (nomeadas segundo quem?). Os Newtons são, geralmente, abreviados como, simplesmente, N. No sistema CGS, $\Sigma F = ma$ fornece o seguinte para as unidades de força:

$$\text{g-centímetros/seg}^2$$

Novamente, essas unidades são um pouco difíceis, portanto as unidades CGS também receberam um nome especial: dinas. E $1,0 \times 10^5$ dinas = 1,0 Newton. No sistema pé-libra-segundo, a unidade de força é fácil – é apenas a libra. Por causa de $\Sigma F = ma$, uma libra é igual a estas unidades:

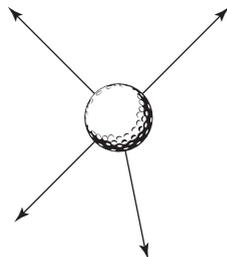
$$\text{libra-massa-pé/seg}^2$$

Para você ter uma ideia dos Newtons, uma libra tem cerca de 4,448 N.

Reunindo as forças resultantes

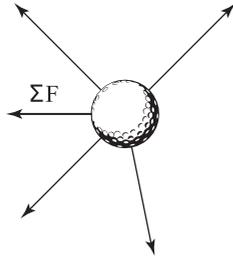
A maioria dos livros abrevia $\Sigma F = ma$ como, simplesmente, $F = ma$, que é o que faço também, mas devo observar que F significa força resultante. Um objeto no qual você aplica uma força responde à *força resultante* – isto é, a soma vetorial de todas as forças que atuam sobre ele. Veja, por exemplo, todas as forças que agem na bola na Figura 5-2, representadas por setas. Em qual caminho a bola de golfe acabará sendo acelerada?

Figura 5-2:
Uma bola voando enfrenta muitas forças atuando sobre ela.



Como a segunda lei de Newton fala sobre a força resultante, o problema fica mais fácil. Tudo que você tem que fazer é adicionar as várias forças como vetores para obter o resultante ou vetor de força resultante, ΣF , como mostrado na Figura 5-3. Quando você quiser saber como a bola se moverá, poderá aplicar a equação $\Sigma F = ma$.

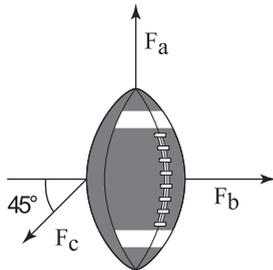
Figura 5-3:
O vetor de força resultante decompõe todas as forças para coincidir com o voo da bola.



Calculando o deslocamento, dados um tempo e uma aceleração

Suponha que você esteja em sua tradicional expedição semanal de Física, coletando dados. Andando com sua prancheta e jaleco branco de laboratório, você encontra uma partida de futebol. Muito interessante, você pensa. Em certa situação, você observa que a bola de futebol, embora comece a partir do repouso, tem três jogadores aplicando forças sobre ela, como vê na Figura 5-4.

Figura 5-4:
Diagrama de corpo livre de todas as forças que atuam em uma bola de futebol, em determinado momento.



Em Física, a Figura 5-4 é chamada de *diagrama de corpo livre*. Esse tipo de diagrama mostra todas as forças que atuam em um objeto, facilitando determinar seus componentes e encontrar a força resultante.

Intrometendo-se intrepidamente na massa dos jogadores em movimento, arriscando insultos em nome da ciência, você mede a grandeza dessas forças e marca-as em sua prancheta:

$$F_a = 150\text{N}$$

$$F_b = 125\text{N}$$

$$F_c = 165\text{N}$$

Você mede a massa da bola de futebol como tendo exatamente 1,0 quilograma. Agora, você imagina: onde estará a bola de futebol em um segundo? Eis as etapas para calcular o deslocamento de um objeto em determinado momento, com determinada aceleração constante:

1. **Encontre a força resultante, ΣF , adicionando todas as forças que atuam no objeto, usando a adição vetorial (veja o Capítulo 4 para saber mais sobre a adição de vetores).**
2. **Use $\Sigma F = ma$ para determinar o vetor de aceleração.**
3. **Use $s = v_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}a(t_f - t_0)^2$ para obter a distância percorrida no tempo especificado (veja o Capítulo 3 para encontrar esta equação original).**

É hora de pegar sua calculadora. Como você deseja relacionar força, massa e aceleração, a primeira coisa a fazer é encontrar a força resultante na massa. Para tanto, você precisa dividir os vetores da força vistos na Figura 5-4 em seus componentes e, depois, somar esses componentes para obter a força resultante (veja o Capítulo 4, para obter mais informações sobre como dividir os vetores em seus componentes).

Determinar F_a e F_b é fácil, pois F_a está diretamente para cima – no eixo Y positivo – e F_b está para a direita – no eixo X positivo. Isso significa que:

$$F_a = (0, 150N)$$

$$F_b = (125N, 0)$$

Encontrar os componentes de F_c é um pouco mais capcioso. Você precisa dos componentes X e Y dessa força assim:

$$F_c = (F_{cx}, F_{cy})$$

F_c está em um ângulo de 45° em relação ao eixo X negativo, como você vê na Figura 5-4. Se você medir tudo a partir do eixo X positivo, obterá um ângulo de $180^\circ + 45^\circ = 225^\circ$. É assim que você divide F_c :

$$F_c = (F_{cx}, F_{cy}) = (F_c \cos \theta, F_c \sin \theta)$$

Ligar os números fornecerá:

$$F_c = (F_{cx}, F_{cy}) = (F_c \cos \theta, F_c \sin \theta) = (165N \cos 225^\circ, 165N \sin 225^\circ) = (-117N, -117N)$$



Veja os sinais aqui – os dois componentes de F_c são negativos. Você não pode seguir assim para o ângulo de F_c sendo $180^\circ + 45^\circ = 225^\circ$ sem uma consideração extra, mas sempre pode fazer uma verificação rápida dos sinais de seus componentes vetoriais. F_c aponta para baixo e para a direita, nos eixos X e Y negativos. Isso significa que os dois componentes desse vetor, F_{cx} e F_{cy} , têm que ser negativos. Vi muitas pessoas ficarem com sinais errados para os componentes vetoriais porque não pensaram em assegurar se seus números coincidiam com a realidade.



Sempre compare os sinais de seus componentes vetoriais com suas direções reais nos eixos. É uma verificação rápida e, posteriormente, evita muitos problemas.

Agora, você sabe que:

$$F_a = (0, 150\text{N})$$

$$F_b = (125\text{N}, 0)$$

$$F_c = (-117\text{N}, -117\text{N})$$

Você está pronto para uma soma vetorial:

$$\begin{array}{r} F_a = (0, 150\text{N}) \\ + F_b = (125\text{N}, 0) \\ + F_c = (-117\text{N}, -117\text{N}) \\ \hline \Sigma F = (8\text{N}, 33\text{N}) \end{array}$$

Você calcula que a força resultante, ΣF , é (8N, 33N). Isso também fornecerá a direção na qual a bola de futebol se moverá. A próxima etapa é encontrar a aceleração da bola. Você sabe isso por causa de Newton:

$$\Sigma F = (8\text{N}, 33\text{N}) = ma$$

Significando que

$$\Sigma F / m = (8\text{N}, 33\text{N}) / m = a$$

Como a massa da bola de futebol é de 1,0 kg, o problema é resolvido assim:

$$\Sigma F / m = (8\text{N}, 33\text{N}) / 1,0 \text{ kg} = (8 \text{ m/s}^2, 33 \text{ m/s}^2) = a$$

Você está fazendo um bom progresso; agora, você sabe a aceleração da bola de futebol. Para descobrir onde ela estará em 1 segundo, poderá aplicar a seguinte equação (encontrada no Capítulo 3), onde s é a distância:

$$s = v_0(t_i - t_0) + \frac{1}{2}a(t_i - t_0)^2$$

Ligar os números fornecerá:

$$s = v_0(t_i - t_0) + \frac{1}{2}a(t_i - t_0)^2 = \frac{1}{2} (8\text{m/s}^2, 33 \text{ m/s}^2)(1,0 \text{ seg})^2 = (8\text{m}, 33\text{m})$$

Bem, bem, bem! No final de 1 segundo, a bola de futebol estará a 8 metros no eixo X positivo e 33 metros no eixo Y positivo. Você pega seu cronômetro no bolso do seu casaco e mede 1 segundo.

Certamente, você estará certo. A bola move-se 8 metros na linha lateral e 33 metros na linha do gol. Satisfeito, você coloca seu cronômetro de volta no bolso e uma marca de verificação na prancheta. Outro experimento de Física bem-sucedido.

Calculando a força resultante, dados um tempo e uma velocidade

Na seção anterior, você calculou o deslocamento de um objeto em dado tempo com determinada aceleração constante. Mas, e se quiser ir em outra direção descobrindo quanta força é necessária em um momento específico para produzir uma determinada velocidade? Digamos, por exemplo, que você queira acelerar seu carro de 0 a 60 mph em 10 segundos; quanta força é necessária? Você começa convertendo 60 mph em pés por segundo. Primeiro, converte em milhas por segundo:

$$(60 \text{ mph}) \times (1 \text{ hora} / 60 \text{ minutos}) \times (1 \text{ minuto} / 60 \text{ segundos}) = 1,67 \times 10^{-2} \text{ milhas por segundo}$$

Observe que as horas e os minutos são cancelados, deixando-o com milhas e segundos para as unidades. Em seguida, você obtém o resultado para pés por segundo:

$$1,67 \times 10^{-2} \text{ milhas por segundo} \times 5.280 \text{ pés por milha} = 88 \text{ pés por segundo}$$

Você deseja chegar a 88 pés por segundo em 10 segundos. Se o carro pesar 2.000 libras, de quanta força você precisará? Primeiro, você encontra a aceleração com a seguinte equação do Capítulo 3:

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_o) / (t_f - t_o)$$

Ligando alguns números, você obterá:

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_o) / (t_f - t_o) = 88 \text{ pés por segundo} / 10 \text{ segundos} = 8,8 \text{ pés por segundo}^2$$

Você calcula que 8,8 pés/segundo² é a aceleração necessária. A partir da segunda lei de Newton, você sabe que:

$$\Sigma F = ma$$

E sabe que o peso do carro é de 2.000 libras. Qual é esse peso no sistema de unidades pé-libra-segundo ou libras-massa? Nesse sistema de unidades, você pode encontrar a massa de um objeto dado seu peso, dividindo pela aceleração devido à gravidade - 32,17 pés/segundo² (convertidos a partir de 9,8 metros/segundo²) – número fornecido na maioria dos problemas de Física):

$$2.000 \text{ libras} / 32 \text{ pés por segundo}^2 = 62,5 \text{ libras-massa}$$

Você tem tudo que precisa saber. Tem que acelerar 62,5 libras-massa por 8,8 pés por segundo²; portanto, quanta força você precisa? Simplesmente, multiplique para obter sua resposta:

$$\Sigma F = ma = (62,5 \text{ libras-massa}) (8,8 \text{ pés/segundo}^2) = 550 \text{ libras}$$

O carro precisa fornecer uma força de 550 libras para esses 10 segundos para acelerar você na velocidade desejada: 60 mph.



Note que esta solução ignora, de modo irritante, pequenas questões, tais como: atrito e descida na estrada; você terá essas questões no Capítulo 6. Mesmo em uma superfície plana, o atrito seria grande neste exemplo, portanto você precisaria, talvez, de 30 % mais do que 550 libras de força na vida real.

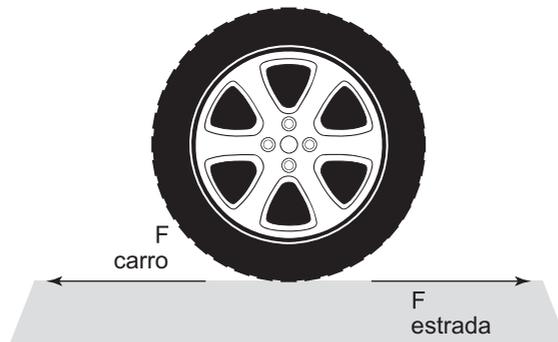
Grand Finale de Newton: A Terceira Lei do Movimento

A terceira lei de Newton é famosa, especialmente nos círculos de luta e aula para motoristas, mas você pode não a reconhecer em toda sua glória da Física: sempre que um corpo exerce uma força em um segundo corpo, o segundo corpo exerce uma força diretamente oposta, de igual grandeza no primeiro corpo.

A versão mais popular disto, que estou certo que você já ouviu muitas vezes, é: “Para toda ação, há uma reação igual e oposta”. Mas, para a Física, é melhor expressar a versão originalmente pretendida e em termos de forças e não “ações” (que, a partir do que vi, pode significar, aparentemente tudo, desde tendências de votos até previsões de temperatura).

Por exemplo, digamos que você esteja em seu carro, aumentando a velocidade com uma aceleração constante. Para tanto, seu carro tem que exercer uma força contra a estrada; do contrário, você não estaria acelerando. E a estrada tem que exercer a mesma força em seu carro. Você pode ver como é esse cabo de guerra, no pneu, na Figura 5-5.

Figura 5-5:
As forças resultantes atuando em um pneu de carro durante a aceleração.



Se seu carro não exercer a mesma força contra a estrada como a estrada exerce contra seu carro, você deslizaria, como quando a

estrada está coberta por gelo e não tem atrito suficiente para que exerça muita força contra seus pneus, como eles exercem contra a estrada. Neste caso, as duas forças estão equilibradas, mas isso não significa que nenhum movimento ocorre. Como uma força age em seu carro, ele acelera. É onde entra a força que seu carro exerce – faz com que seu carro acelere.

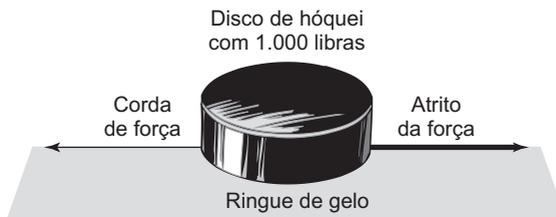
Então, por que a estrada não se move? Afinal, para toda força em um corpo, há uma força igual e oposta, assim a estrada sente a mesma força também. Você acelera... a estrada não deveria acelerar na direção oposta? Acredite se quiser, deveria; a lei de Newton está em efeito total. Seu carro empurra a Terra, afetando o movimento dela em uma quantidade ínfima. Porém, dado o fato de que a Terra é mais ou menos 6.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 tão pesada quanto seu carro, qualquer efeito não é muito notado.

A tensão não deve causar torcicolos: Atrito na terceira lei de Newton

Quando um jogador de hóquei empurra um disco, o disco acelera a partir do ponto de contato, assim como o jogador de hóquei. Se o disco de hóquei pesasse 1.000 libras, você notaria muito mais esse efeito; na verdade, o disco não se moveria muito, mas o jogador seria movido na direção oposta depois de atingi-lo (mais sobre o que acontece neste capítulo na Parte III deste livro).

Para a Física imaginária, digamos que o jogo de hóquei termina e você tem o trabalho de arrastar esse disco de hóquei com 1.000 libras para fora do ringue. Você usará uma corda para tanto, como mostrado na Figura 5-6.

Figura 5-6:
Puxando um disco com 1.000 libras, com uma corda, para exercer uma força igual em ambas as extremidades.



Os problemas de Física gostam muito de usar cordas, inclusive cordas com roldanas, pois, com cordas, a força aplicada em uma extremidade é igual a força que a corda exerce, no que você amarra na outra extremidade.

Neste caso, o disco de hóquei com 1.000 libras terá algum atrito que se opõe a você – não uma grande quantidade, dado que ele desliza sobre o gelo, mas, mesmo assim, algum. Portanto, a força resultante no disco é de:

$$\Sigma F = F_{\text{corda}} - F_{\text{atrito}}$$

Como F_{corda} é maior que F_{atrito} , o disco começará a se mover. Na verdade, se você puxar a corda com uma força constante, o disco irá acelerar, pois a força resultante é igual à sua massa vezes sua aceleração:

$$\Sigma F = F_{\text{corda}} - F_{\text{atrito}} = ma$$

Como uma força exercida no disco entra na aceleração e outra entra superando a força do atrito, a força exercida no disco é igual à força exercida em você (mas na direção oposta), como prevê a terceira lei de Newton:

$$F_{\text{corda}} = F_{\text{atrito}} + ma$$

Veja a situação completamente diferente. Quando você puxa uma corda em um sistema de roldanas para elevar um objeto, elevará a massa se exercer força suficiente para superar seu peso, Mg , onde g é a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra, 9,8 metros por segundo² (veja uma análise maior sobre isso, no Capítulo 6). Veja a Figura 5-7, onde uma corda passa por uma roldana e desce até uma massa M .

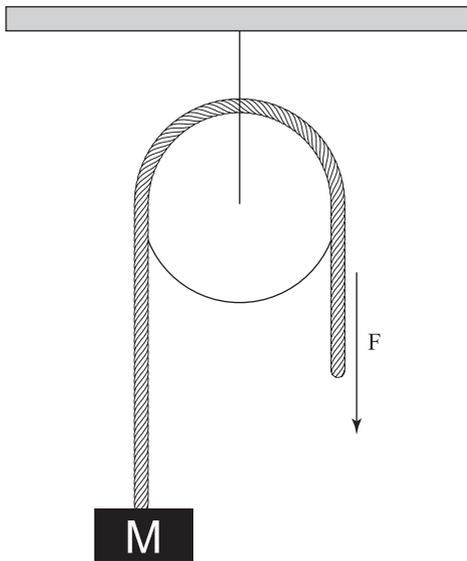


Figura 5-7:
Usando uma
roldana para
exercer
força.

A corda funciona não só para transmitir a força, F , exercida na massa, M , mas, também, mudar a direção dessa força, como você vê na figura. A força que você exerce para baixo é exercida na massa para cima, pois a corda, passando pela roldana, muda a direção da força. Neste caso, se F for maior que Mg , você poderá elevar a massa; de fato, se F for maior que Mg , a massa acelerará para cima – $F = M(g + a)$ = massa (aceleração resultante) neste caso.

Mas esta mudança de força ocasionada pela utilização da corda e da roldana tem um custo, uma vez que você não pode enganar a terceira lei de Newton. Suponha que você eleve a massa e pendure-a no ar. Neste caso, F deve ser igual a Mg para manter a massa imóvel. A direção de sua força está sendo mudada de baixo para cima. Como isso acontece?

Para descobrir, considere a força que o apoio da roldana exerce sobre o teto. Qual é essa força? Como a roldana não está acelerando em nenhuma direção, você sabe que $\sum F = 0$ na roldana. Isso significa que todas as forças na roldana, quando somadas, darão 0.

Do ponto de vista da roldana, duas forças puxam para baixo: a força F com a qual você puxa e a força Mg que a massa exerce sobre você (porque nada está se movendo no momento). São $2F$ para baixo. Para equilibrar todas as forças e obter um total de 0, o apoio da roldana deve exercer uma força de $2F$ para cima.



Nenhuma força pode ser exercida sem uma força de oposição igual e oposta (mesmo que parte dessa força de oposição faça um objeto acelerar). No exemplo anterior, a corda muda a direção da força aplicada, mas não de graça. Para mudar a direção de sua força de $-F$ (ou seja, para baixo) para $+F$ (para cima), o apoio da roldana tem que responder com uma força $2F$.

Analisando os ângulos e a força na terceira lei de Newton

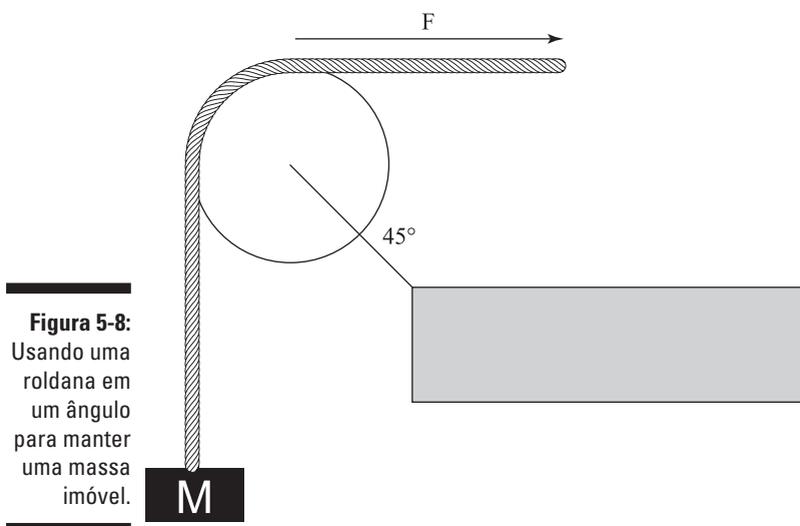
Para levar em conta os ângulos ao medir a força, você precisa fazer um pouco de soma vetorial. Veja a Figura 5-8. Nela, a massa M não está se movendo, e você está aplicando uma força F para mantê-la imóvel. Eis a pergunta: qual força o apoio da roldana está exercendo e, em qual direção, para manter a roldana onde ela está?

Você está sentado bem aqui. Como sabe que a roldana não está movendo, sabe que $\sum F = 0$ na roldana. Portanto, quais são as forças na roldana? Você pode considerar a força devido ao peso da massa, Mg . Colocando isso em termos de componentes vetoriais (ver Capítulo 4), fica assim (lembre-se de que o componente Y de F_{massa} tem que ser negativo, pois aponta para baixo, estando no eixo Y negativo):

$$F_{\text{massa}} = (0, -Mg)$$

Você também tem que considerar a força da corda na roldana, que, como você está mantendo a massa imóvel e a corda transmite a força que você está aplicando, deve ser Mg para a direita – no eixo X positivo. Essa força fica assim:

$$F_{\text{corda}} = (Mg, 0)$$



Você pode encontrar a força exercida na roldana pela corda e a massa, somando os vetores F_{massa} e F_{corda} :

$$F_{\text{massa}} = (0, -Mg) + F_{\text{corda}} = (Mg, 0) = F_{\text{massa + corda}} (Mg, -Mg)$$

$(Mg, -Mg)$ é a força exercida pela massa e pela corda. Você sabe que:

$$\Sigma F = 0 = F_{\text{massa + corda}} + F_{\text{apoio}}$$

onde F_{apoio} é a força do suporte da roldana na roldana. Isso significa que

$$F_{\text{apoio}} = -F_{\text{massa + corda}}$$

Portanto, F_{apoio} deve ser igual a:

$$-F_{\text{massa + corda}} = -(Mg, -Mg) = (-Mg, Mg)$$

Como você pode verificar na a Figura 5-8, as direções deste vetor fazem sentido (o que você deve verificar sempre) – o apoio da

roldana deve exercer uma força para a esquerda e para cima para manter a roldana onde ela está.

Você também pode converter F_{apoio} em forma de grandeza e direção (ver Capítulo 4), fornecendo uma grandeza total da força. A grandeza é igual a:

$$F_{\text{apoio}} = \sqrt{(-Mg)^2 + (Mg)^2} = \sqrt{2Mg}$$

Note que essa grandeza é maior do que a força que você exerce ou que a massa exerce na roldana, pois o apoio da roldana tem que mudar a direção dessas forças.

E a direção de F_{apoio} ? Você pode ver na Figura 5-8 que F_{apoio} tem que estar para a esquerda e para cima, mas você deve ver se a matemática confirma isso. Se θ for o ângulo de F_{apoio} em relação ao eixo X positivo, F_{apoio_x} , o componente X de F_{apoio} deverá ser:

$$F_{\text{apoio}_x} = F_{\text{apoio}} \cos \theta$$

Portanto:

$$\theta = \cos^{-1}(F_{\text{apoio}_x} / F_{\text{apoio}})$$

Você sabe que $F_{\text{suportex}} = -Mg$ para neutralizar a força exercida. Como:

$$F_{\text{apoio}} = \sqrt{2Mg}$$

você pode calcular que:

$$F_{\text{apoio}_x} = -Mg = \frac{-F_{\text{apoio}}}{\sqrt{2}}$$

Agora, tudo que você tem que fazer é ligar os números:

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{F_{\text{apoio}_x}}{F_{\text{apoio}}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{-F_{\text{apoio}}}{\sqrt{2} F_{\text{apoio}}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{-1}{\sqrt{2}}\right) = -135^\circ$$

A direção de F_{apoio} é -135° em relação ao eixo x positivo – exatamente o que você esperava!



Se você ficar confuso com os sinais ao fazer este tipo de trabalho, verifique suas respostas contra as direções reais dos vetores de força realmente vão. Imagens valem mais que mil palavras, até na Física!

Encontrando o equilíbrio

Na Física, um objeto está em equilíbrio quando tem zero aceleração – quando as forças resultantes atuando sobre ele são zero. O objeto realmente não tem que estar em repouso – ele pode estar viajando a 1.000 mph, desde que a força resultante sobre ele seja zero e não esteja acelerando. As forças podem estar atuando no objeto, mas elas se somam, como vetores, resultando em zero.

Por exemplo, veja a Figura 5-9, onde você iniciou sua própria mercearia e comprou um fio calculado com 15N para manter o letreiro.

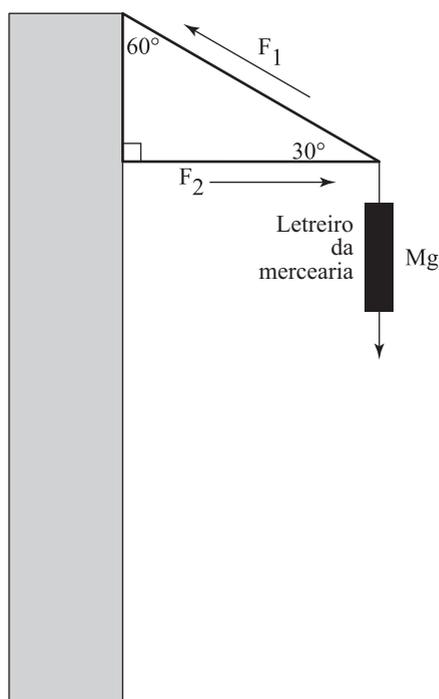


Figura 5-9:
Segurar um letreiro requer o equilíbrio das forças envolvidas.

O letreiro pesa apenas 8N, portanto mantê-lo não deve ser um problema, certo? Obviamente, você pode dizer a partir de minhas palavras que tem um problema aqui. Calmamente, você pega sua calculadora para descobrir qual força o fio, F_1 no diagrama, tem que exercer sobre o letreiro para suportá-lo. Você deseja que o letreiro fique equilibrado, significando que a força resultante sobre ele é zero. Assim, o peso inteiro do letreiro, Mg , tem que estar equilibrado pela força para cima, exercida sobre ele.

Neste caso, a única força para cima atuando no letreiro é o componente Y de F_1 , onde F_1 é a tensão no fio, como você pode ver na Figura 5-9. A força exercida pelo suporte horizontal, F_2 , é apenas horizontal, portanto não pode fazer nada por você na

direção vertical. Usando seu conhecimento de trigonometria (ver Capítulo 4), você pode determinar, a partir da figura, que o componente Y de F_1 é

$$F_{1y} = F_1 \sin 30^\circ$$

Para segurar o letreiro, F_{1y} deve igualar o peso do letreiro, Mg :

$$F_{1y} = F_1 \sin 30^\circ = Mg$$

Isso o informa que a tensão no fio, F_1 , deve ser

$$F_1 = Mg / \sin 30^\circ$$

Você sabe que o peso do letreiro é de 8N, portanto,

$$F_1 = Mg / \sin 30^\circ = 8N / \frac{1}{2} = 16N$$

Oh, oh. Parece que o fio terá que ser capaz de manter uma força de 16N, não apenas os 8N para os quais está calculado. Moral da história? Você precisa conseguir um fio mais forte.

Suponha que consiga esse fio. Agora, você pode se preocupar com o suporte que fornece a força horizontal, F_{suporte} , vista no diagrama da Figura 5-9. Qual força esse suporte tem que ser capaz de fornecer? Bem, você sabe que a figura tem apenas duas forças horizontais: F_{suporte} e o componente de F_1 . E já sabe que $F_1 = 16N$. Você tem tudo que precisa para calcular F_{suporte} . Para começar, precisa determinar qual é o componente X de F_1 . Vendo a Figura 5-9 e usando um pouco de trigonometria, você pode ver que

$$F_{1x} = F_1 \cos 30^\circ$$

Esta é a força cuja grandeza deve ser igual a F_{suporte} :

$$F_{1x} = F_1 \cos 30^\circ = F_{\text{suporte}}$$

Isso informa que

$$F_{1x} = F_1 \cos 30^\circ = F_1 (0,866) = 16N(0,866) = 13,9N = F_{\text{suporte}}$$

O suporte usado tem que ser capaz de exercer uma força de 13,9N.



Para suportar um letreiro de apenas 8N, você precisará de um fio que suporte pelo menos 16N e um suporte que possa fornecer uma força de 13,9N. Veja a configuração aqui – o componente Y da tensão no fio tem que suportar todo o peso do letreiro e, como o fio está em um ângulo muito pequeno, você precisa de muita tensão nele para obter a força necessária. E para ser capaz de lidar com essa tensão, precisará de um suporte muito forte.

Capítulo 6

Que Resistência: Planos Inclinados e Atrito

Neste Capítulo

- ▶ Pulando na gravidade
- ▶ Examinando ângulos em um plano inclinado
- ▶ Ajustando as forças do atrito
- ▶ Medindo os centros de gravidade de um avião

A gravidade é o principal tópico deste capítulo. O Capítulo 5 mostrou quanta força você precisa para suportar uma massa contra a tração da gravidade, mas isso é apenas o começo. Neste capítulo, você descobrirá como lidar com a gravidade em declives e com o atrito em seus cálculos. E, também, verá como a gravidade desvia a trajetória dos objetos que voam.

Não Deixe que Isso o Coloque para Baixo: Lidando com a Gravidade

Quando você está na superfície da Terra, a tração da gravidade é constante e igual a mg , onde m é a massa do objeto sendo puxado pela gravidade e g é a aceleração devido à gravidade:

$$g = 9,8 \text{ metros por segundo}^2 = 32,2 \text{ pés por segundo}^2$$

A aceleração é um vetor, significando que tem uma direção e uma grandeza (ver Capítulo 4), portanto esta equação realmente se reduz a g , uma aceleração diretamente para baixo, caso você esteja na Terra. O fato de que $F_{\text{gravidade}} = mg$ é importante, pois diz que a aceleração de um corpo que cai não depende de sua massa:

$$F_{\text{gravidade}} = ma = mg$$

Em outras palavras:

$$ma = mg$$



Portanto, $a = g$, não importando o peso do objeto (um objeto mais pesado não cai mais rapidamente do que um mais leve). A gravidade fornece a qualquer corpo que cai livremente a mesma aceleração para baixo (g perto da superfície da Terra).

Esta análise fica bem perto do chão, err, Terra, onde a aceleração devido à gravidade é constante. Mas o Capítulo 7 entrará em órbita, vendo a gravidade do ponto de vista da Lua. Quanto mais você se distancia da Terra, menos gravidade afeta-o. Para este capítulo, a gravidade age para baixo, mas isso não significa que você pode usar apenas equações como, por exemplo, $F_{\text{gravidade}} = mg$, para observar o que sobe quando deveria descer. Você também pode começar a lidar com os objetos que sobem em ângulos.

Inclinação Vertical: Um Plano Inclinado

Muitos problemas baseados na gravidade, na Física introdutória, envolvem declives, portanto vale a pena vê-los. Verifique a Figura 6-1. Nela, um carrinho está para descer uma rampa. O carrinho viaja não apenas na vertical, como também na rampa, que está inclinada com um ângulo θ .

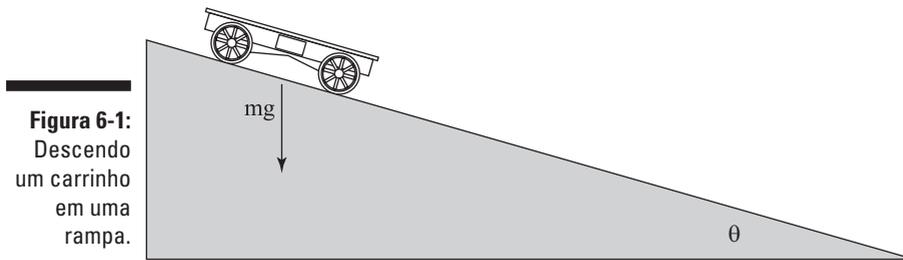


Figura 6-1:
Descendo
um carrinho
em uma
rampa.

Digamos, por exemplo, que $\theta = 30^\circ$ e que o comprimento da rampa é de 5,0 metros. Com que rapidez o carrinho chegará na parte inferior da rampa? A gravidade acelerará o carrinho para baixo na rampa, mas não a força total da gravidade. Apenas o componente da gravidade atuando na rampa irá acelerar o carrinho.

Qual será o componente da gravidade atuando na rampa se a força vertical devido à gravidade no carrinho for F_g ? Veja a Figura 6-2, que detalha alguns ângulos e vetores (veja o Capítulo 4 para ter uma análise detalhada dos vetores). Para determinar o vetor F_g na rampa, você começará descobrindo o ângulo entre F_g e a rampa. É aqui que o conhecimento dos triângulos entra em cena (ver Capítulo 2) – os ângulos de um triângulo têm que somar 180° . O ângulo entre F_g e o solo é de 90° , e você sabe que o ângulo da rampa

com o solo deve ser de θ . E a partir da Figura 6-2, sabe que o ângulo entre F_g e a rampa deve ser de $180^\circ - 90^\circ - \theta$ ou $90^\circ - \theta$.

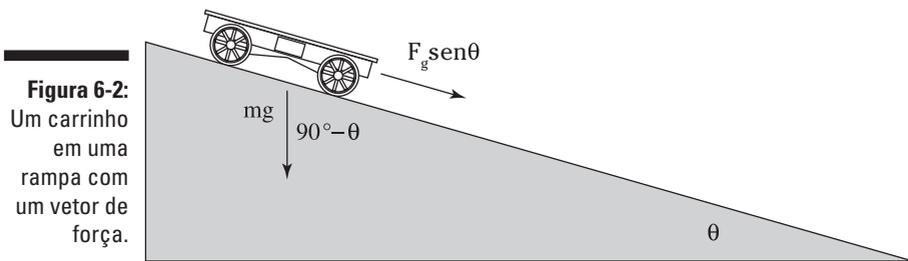


Figura 6-2: Um carrinho em uma rampa com um vetor de força.

Descobrimos ângulos do modo fácil

Os professores de Física usam uma técnica ultrassecreta para descobrir quais são os ângulos entre os vetores e as rampas, e eu estou aqui para que você compartilhe o segredo. Os ângulos têm que ser relativos a θ de alguma maneira. Assim, o que acontecerá se θ for para zero? Neste caso, o ângulo entre F_g e a rampa da seção anterior será de 90° . O que acontecerá se θ tornar-se 90° ? Nesse caso, o ângulo entre F_g e a rampa será de 90° .



Com base nessas informações, você pode propor um exemplo muito bom no qual o ângulo entre F_g e a rampa seja de $90^\circ - \theta$. Portanto, quando você estiver perdido sobre como descobrir um ângulo em relação a outro, deixe que o outro ângulo vá para 90° e, então, 0° e veja o que acontece. É um atalho fácil.

Encontrando o componente de F_g em uma rampa

Agora, você está imaginando: “qual é o componente de F_g na rampa?”. Agora que você sabe que o ângulo entre F_g e a rampa é de $90^\circ - \theta$ (veja a seção anterior), poderá calcular o componente de F_g na rampa (ou, como se diz de *determinar* F_g na rampa):

$$F_g \text{ na rampa} = F_g \cos(90^\circ - \theta)$$

Se você adora trigonometria tanto quanto uma pessoa normal (ver Capítulos 2 e 4), também pode saber que (não é necessário saber isso; a equação anterior funciona muito bem):

$$\sin \theta = \cos(90^\circ - \theta)$$

Portanto:

$$F_g \text{ na rampa} = F_g \cos(90^\circ - \theta) = F_g \sin \theta \text{ na rampa}$$

Isto faz sentido, pois quando θ é zero, essa força é zero também, uma vez que a rampa é horizontal. E quando θ é 90° , essa força torna-se F_g , pois a rampa é vertical. A força que acelera o carrinho é de $F_g \text{ sen } \theta$ na rampa. O que isso fará com a aceleração do carrinho, se sua massa for de 800 kg? Muito fácil:

$$F_g \text{ sen } \theta = ma$$

Assim:

$$a = F_g \text{ sen } \theta / m$$

Isso fica ainda mais fácil quando você lembra que $F_g = mg$:

$$a = F_g \text{ sen } \theta / m = mg \text{ sen } \theta / m = g \text{ sen } \theta$$



Neste ponto, você sabe que $a = g \text{ sen } \theta$ do carrinho na rampa. Essa equação mantém-se para qualquer gravidade do objeto que acelera descendo uma rampa, caso o atrito não se aplique. A aceleração de um objeto em uma rampa, em um ângulo θ com o solo, é de $g \text{ sen } \theta$ na ausência de atrito.

Encontrando a velocidade em uma rampa

Todos os fãs da velocidade podem estar imaginando: “Qual é a velocidade do carrinho na parte inferior da rampa?”. Isso parece um trabalho para a seguinte equação (apresentada no Capítulo 3):

$$v_f^2 - v_o^2 = 2as$$

A velocidade inicial, v_o , é 0 e a distância, s , é 5,0 metros aqui, portanto você obtém:

$$v_f^2 = 2as = 2(g \text{ sen } \theta)(5,0 \text{ metros}) = 49 \text{ metros}^2 \text{ por segundo}^2$$

Isso é resolvido como $v_f = 7,0$ metros por segundo ou cerca de 15 mph. Não parece rápido demais até você tentar parar um automóvel com 800 kg com essa velocidade (não tente em casa). Na verdade, este exemplo é um pouco simplificado, pois um movimento entra na velocidade angular das rodas, etc. Mais sobre este tópico, no Capítulo 10.

Trabalhando com a aceleração

Rápido: com que rapidez um cubo de gelo, das Figuras 6-1 e 6-2, chegaria à parte inferior da rampa, caso o atrito não fosse um problema? Resposta: com a mesma velocidade calculada na seção anterior: 7,0 metros por segundo. A aceleração de um objeto em uma rampa, que está em um ângulo de θ em relação ao solo, é g

sen θ . A massa do objeto não importa – isto simplesmente leva em consideração o componente da aceleração devido à gravidade que atua na rampa. E depois de você saber a aceleração na superfície da rampa, que é uma distância s , poderá usar esta equação:

$$v_f^2 = 2as$$

A massa não entra.

Ficando Confuso com o Atrito

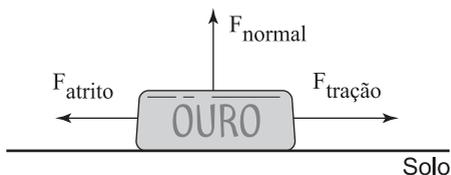
Você sabe tudo sobre atrito. É a força que detém o movimento – ou algo assim. Na verdade, o atrito é essencial para a vida diária. Imagine um mundo sem atrito: nenhum atrito ao dirigir um carro na estrada, nenhum atrito ao andar na calçada, nenhum atrito ao pegar aquele sanduíche de presunto. O atrito pode parecer um inimigo para o seguidor entusiasmado da Física, mas também é seu amigo.



O atrito vem da interação das irregularidades da superfície. Se você apresentar duas superfícies que têm muitas depressões e ondulações microscópicas, produzirá um atrito. E quanto mais pressionar essas duas superfícies, mais atrito criará quando as irregularidades se entrelaçarem cada vez mais.

A Física tem muito a dizer sobre como funciona o atrito. Por exemplo, imagine que você decide colocar sua riqueza em um lingote de ouro enorme, que você vê na Figura 6-3, apenas para que alguém roube sua fortuna. O ladrão aplica uma força no lingote para acelerá-lo, pois a polícia está atrás dele. Felizmente, a força do atrito vem para salvar você, pois o ladrão não consegue acelerar tão rapidamente quanto pensou – e o ouro arrasta-se pesadamente no solo.

Figura 6-3:
A força do atrito torna difícil mover objetos grandes.



Portanto, se você quiser ser quantitativo aqui, o que faria? Diria que a força de tração, $F_{\text{tração}}$, menos a força devido ao atrito, F_{atrito} , é igual à força resultante na direção do eixo X, que fornece a aceleração nessa direção:

$$F_{\text{tração}} - F_{\text{atrito}} = ma$$

Isso parece bem simples. Mas como você calcula F_{atrito} ? Começa calculando a força normal.

Calculando o atrito e a força normal

A força do atrito, F_{atrito} , sempre age em oposição à força aplicada quando você tenta mover um objeto. O atrito é proporcional à força com a qual um objeto é empurrado, contra a superfície sobre a qual está tentando deslizar.

Como você pode ver na Figura 6-3, a força com a qual o lingote de ouro é pressionado contra o solo é apenas seu peso ou mg . O solo pressiona de volta com a mesma força. A força que empurra para cima contra o lingote é chamada de *força normal* e seu símbolo é N . A força normal não é necessariamente igual à força devido à gravidade – é a força *perpendicular* à superfície sobre a qual um objeto está deslizando. Em outras palavras, a força normal é a força que empurra as duas superfícies, e quanto maior for a força normal, mais forte será a força devido ao atrito.

No caso da Figura 6-3, pois o lingote desliza no chão, a força normal tem a mesma grandeza do peso do lingote, portanto $F_{\text{normal}} = mg$. Você tem a força normal, que é a força que pressiona o lingote e o solo. Mas para onde você vai a partir deste ponto? Você encontra a força do atrito.

Conquistando o coeficiente do atrito

A força do atrito vem das características da superfície dos materiais que entram em contato. Como os físicos podem prever essas características teoricamente? Não podem. Você vê muitas equações gerais que preveem o comportamento geral dos objetos, como, por exemplo, $\Sigma F = ma$ (ver Capítulo 5). Mas o conhecimento detalhado das superfícies de contato não é algo que os físicos podem propor teoricamente, portanto desistem da teoria e afirmam que estas características você mesmo tem que medir.

O que você mede é como a força normal (veja a seção anterior) relaciona-se com a força de atrito. Acaba que, com um bom grau de precisão, as duas forças são proporcionais, e você pode usar uma constante, μ , para relacionar as duas:

$$F_{\text{atrito}} = \mu F_{\text{normal}}$$

Geralmente, você vê esta equação escrita nos seguintes termos:

$$F_F = \mu F_N$$

Essa equação informa que quando você tem a força normal, tudo que precisa fazer é multiplicá-la por uma constante para obter a força de atrito. Essa constante, μ , é chamada de *coeficiente do atrito* e é algo que você mede para uma determinada superfície – não um valor que pode pesquisar em um livro.

O coeficiente do atrito está na faixa de 0,0 a 1,0. O valor 0,0 será possível apenas se você tiver uma superfície sem nenhum atrito. A força máxima possível devido ao atrito, F_F , é F_N , a força normal. Entre outras coisas, isso significa que se você contar unicamente com a

força do atrito para mantê-lo no lugar, não poderá empurrar um carro com nenhuma força superior à de seu peso. Esse é o valor máximo e será possível apenas se $\mu = 1,0$ (se você trabalhar com vontade ao empurrar o carro, isso será um problema diferente, pois não está contando apenas com a força do atrito para mantê-lo no lugar).



$F_f = \mu F_N$ não é uma equação vetorial (ver Capítulo 4), pois a força devido ao atrito, F_f , não está na mesma direção da força normal, F_N . Como você pode ver na Figura 6-3, F_f e F_N são perpendiculares. F_N está sempre em ângulos retos em relação à superfície que fornece o atrito, pois é a força que pressiona as duas superfícies, e F_f está sempre nessas superfícies, pois é oposta à direção do deslizamento.



A força devido ao atrito é independente da área de contato entre as duas superfícies, significando que mesmo que você tenha um lingote com o dobro do comprimento e metade da altura, ainda terá a mesma força de atrito ao arrastá-lo no solo. Isso faz sentido, uma vez que, se a área de contato dobrar, você pode achar que há duas vezes mais atrito. Mas como você espalhou o ouro em um lingote mais longo, divide a força em cada centímetro quadrado, porque tem menos peso acima dele para empurrar.

Tudo bem, você está pronto para tirar seu jaleco e começar a calcular as forças devido ao atrito? Não tão rapidamente – finalmente, você deve decompor em dois coeficientes diferentes de atrito para cada tipo de superfície.

Compreendendo os atritos estático e cinético

Os dois coeficientes diferentes de atrito para cada tipo de superfície são o coeficiente do *atrito estático* e o coeficiente do *atrito cinético*.

A razão para ter dois coeficientes diferentes de atrito é que você envolve dois processos físicos diferentes. Quando duas superfícies são estáticas, ou não se movem e se pressionam, elas têm a chance de entrelaçarem-se no nível microscópico e isso é o *atrito estático*. Quando as superfícies estão deslizando, as irregularidades microscópicas não têm a mesma chance de se conectarem e você tem o *atrito cinético*. O que isso significa na prática é que você deve levar em conta dois coeficientes diferentes de atrito para cada superfície: um coeficiente de atrito estático, μ_s , e um coeficiente de atrito cinético, μ_k .

Iniciando o movimento com o atrito estático

Entre o atrito estático e o cinético, o atrito estático é mais forte, significando que o coeficiente de atrito estático para uma superfície, μ_s , é maior do que o coeficiente de atrito cinético, μ_k . Isso faz sentido porque o atrito estático ocorre quando duas superfícies têm uma chance de entrelaçarem-se totalmente no nível microscópico e o atrito cinético acontece quando as duas superfícies estão deslizando, portanto apenas as irregularidades mais macroscópicas podem se conectar.



Você cria o atrito estático quando está empurrando algo que inicia em repouso. Este é o atrito que você tem que superar para algo deslizar.

Por exemplo, digamos que o coeficiente de atrito estático entre o lingote da Figura 6-3 e o solo seja de 0,3 e que o lingote tenha uma massa de 1.000 kg (uma bela fortuna em ouro). Qual é força que um ladrão tem que exercer para mover o lingote? Você sabe, a partir da seção “Calculando o atrito e a força normal”, que:

$$F_F = \mu_s F_N$$

E como a superfície é plana, a força normal – a força que une as duas superfícies – está na direção oposta do peso do lingote e tem a mesma grandeza. Isso significa que:

$$F_F = \mu_s F_N = \mu_s mg$$

onde m é a massa do lingote e g é a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra. Conectar os números fornecerá:

$$F_F = \mu_s F_N = \mu_s mg (0.3)(1.000\text{kg})(9,8 \text{ metros por segundo}^2) = 2.940\text{N}$$

O ladrão precisa de 2.940N apenas para o lingote iniciar o movimento, mas qual é essa medida em libras? Existem 4,448 Newtons em uma libra, portanto isso é convertido em cerca de 661 libras de força. Uma força considerável para qualquer ladrão. O que acontece depois do ladrão forte colocar o lingote em movimento? Quanta força ele precisa para que continue se movendo? Ele precisa calcular o atrito cinético.

Sustentando o movimento com o atrito cinético

A força devido ao atrito cinético, que ocorre quando duas superfícies já estão deslizando, não é tão forte quanto o atrito estático, mas isso não significa que você pode prever qual será o coeficiente do atrito cinético, mesmo que saiba o coeficiente do atrito estático – você tem que medir as duas forças.



Você mesmo pode notar que o atrito estático é mais forte que o atrito cinético. Imagine que uma caixa que você está descarregando em uma rampa comece a deslizar. Para fazê-la parar, você pode colocar seu pé no caminho e depois de parar, a caixa muito provavelmente ficará onde está e não começará a deslizar de novo. É porque o atrito estático, que ocorre quando a caixa está em repouso, é maior que o atrito cinético, que acontece quando a caixa está deslizando.

Digamos que o lingote (da Figura 6-3), que pesa 1.000 kg, tenha um coeficiente de atrito cinético, μ_k , de 0,18. Quanta força o ladrão precisa para empurrar o lingote durante seu roubo? Você tem tudo que precisa – o coeficiente do atrito cinético:

$$F_F = \mu_k F_N = \mu_k mg$$

Apresentar em números fornecerá

$$F_f = \mu_k F_N = \mu_k mg (0.18)(1.000\text{kg})(9,8 \text{ metros por segundo}^2) = 1.764\text{N}$$

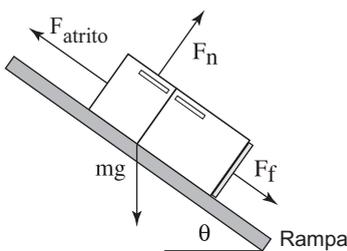
O ladrão precisa de 1.764N para manter seu lingote de ouro deslizando enquanto foge da polícia. Isso se converte em cerca de 397 libras de força (4,448N para uma libra) – não é exatamente o tipo de força que você pode manter enquanto tenta correr a toda velocidade, a menos que tenha alguns amigos ajudando-o. Você tem sorte! A Física explica que a polícia é capaz de recuperar seu lingote de ouro. Os policiais sabem tudo sobre atrito – dando uma olhada na recompensa, eles dizem: “Conseguimos recuperá-lo; você pode arrastá-lo para casa”.

Trabalhando com o atrito para cima

As seções anteriores deste capítulo lidaram com o atrito no nível do solo, mas e se você tiver que arrastar um objeto pesado rampa acima? Digamos, por exemplo, que você tem que mover uma geladeira.

Você deseja ir acampar e como espera pegar muitos peixes, decide levar sua geladeira de 100 kg. O único problema é colocar a geladeira em seu carro, como mostrado na Figura 6-4. A geladeira tem que subir em uma rampa de 30°, que tem um coeficiente de atrito estático de 0,2 e um coeficiente de atrito cinético de 0,15 (veja as seções anteriores para saber sobre esses tópicos). O bom é que você tem dois amigos para ajudá-lo a mover a geladeira. A má notícia é que vocês têm apenas 350N de força cada, portanto seus amigos entram em pânico.

Figura 6-4: Você deve brigar com diferentes tipos de força e atrito para empurrar um objeto rampa acima.



“Não se preocupe”, você diz, pegando sua calculadora. “Vou verificar a Física”. Seus amigos relaxam. A força mínima necessária para empurrar essa geladeira rampa acima, $F_{\text{esforço}}$, tem que contar com o componente do peso da geladeira atuando na rampa e com a força devido ao atrito. Lido com cada uma por vez nas seções a seguir.

Descobrimo o peso do componente

Para começar a descobrir o componente do peso da geladeira atuando na rampa, veja a Figura 6-4. O peso da geladeira atua para baixo. Os ângulos em um triângulo formado pelo solo, a rampa e o vetor do peso devem somar 180° . O ângulo entre o vetor do peso e o solo é de 90° e o ângulo entre o solo e a rampa é de θ , portanto o ângulo entre a rampa e o vetor de peso é de:

$$180^\circ - 90^\circ - \theta = 90^\circ - \theta$$

O peso atuando na rampa será de:

$$mg \cos(90^\circ - \theta) = mg \sin \theta$$

A força mínima necessária para empurrar a geladeira rampa acima, ao neutralizar o componente de seu peso na rampa e a força do atrito, F_p , é:

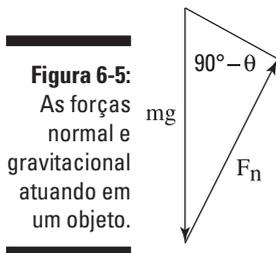
$$F_{\text{esforço}} = mg \sin \theta + F_f$$

Determinando a força do atrito

A próxima pergunta: qual é a força do atrito, F_f ? Você deve usar o coeficiente de atrito estático ou o coeficiente de atrito cinético? Como o coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente de atrito cinético, a escolha é sua. Depois que você e seus amigos começarem a mover a geladeira, vocês poderão mantê-la em movimento com menos força. Como você estará usando o coeficiente de atrito estático, poderá obter F_f assim:

$$F_f = \mu_s F_N$$

Você também precisa da força normal, F_N , para continuar (veja a seção “Calculando o atrito e a força normal”, anteriormente, neste capítulo). F_N é o componente do peso perpendicular (também chamado de *normal*) à rampa. Você sabe que o ângulo entre o vetor do peso e a rampa é de $90^\circ - \theta$, como mostrado na Figura 6-5.



Usando um pouco de trigonometria (ver Capítulo 2), você sabe que:

$$F_N = mg \cos \theta$$

Você pode verificar isso permitindo que θ vá para zero, que significa que F_N torna-se mg , como deveria. Agora, você sabe que:

$$F_{\text{tração}} = mg \sin \theta + \mu_s mg \cos \theta$$

Tudo que resta fazer é ligar os números:

$$F_{\text{tração}} = mg \sin \theta + \mu_s mg \cos \theta = (100)(9,8)(\sin 30^\circ) + (0,2)(100)(9,8)(\cos 30^\circ)$$

Tudo isto se divide em:

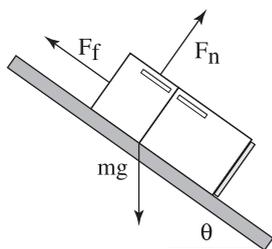
$$(100)(9,8)(\sin 30^\circ) + (0,2)(100)(9,8)(\cos 30^\circ) = 490\text{N} + 170\text{N} = 660\text{N}$$

Você precisa de 660N para empurrar a geladeira rampa acima. Em outras palavras, seus dois amigos, que podem exercer 350N cada, são suficientes para o serviço. “Comecem”, você diz, apontando com confiança para a geladeira. Infelizmente, quando eles vão subir a rampa, um deles tropeça. A geladeira começa a descer, e eles pulam para fora, abandonando-a à sua sorte.

Objeto solto: calculando a que distância ele deslizará

Supondo que a rampa e o solo têm o mesmo coeficiente de atrito cinético, a que distância deslizará a geladeira que seus amigos soltaram na seção anterior? Veja a Figura 6-6, que mostra a geladeira quando ela desce a rampa de 3,0 metros. Como você observa com desânimo, ela ganha velocidade. Um carro está parado atrás da rampa, a apenas 7,5 metros de distância. A geladeira desgovernada irá esmagá-lo? Você tem um momento de tensão quando pega sua calculadora para verificar.

Figura 6-6:
Todas as forças atuando em um objeto descendo uma rampa.



Descobrimo a aceleração

Quando um objeto desce, como você vê na Figura 6-6, as forças que atuam nele mudam. Com a geladeira, não há mais nenhuma força $F_{\text{tração}}$, para empurrá-la rampa acima. Ao contrário, o componente

de seu peso que atua na rampa empurra a geladeira para baixo. E enquanto ela cai, a gravidade opõe-se a essa força. Assim, qual força acelera a geladeira para baixo? Você verifica na seção “Descobrimo o peso do componente” que o peso que atua na rampa é:

$$mg \cos(90^\circ - \theta) = mg \sin \theta$$

E a força normal é:

$$F_N = mg \cos(90^\circ - \theta) = mg \cos \theta$$

significando que a força do atrito cinético é:

$$F_f = \mu_k F_N = \mu_k mg \sin(90^\circ - \theta) = \mu_k mg \cos \theta$$

A força resultante acelerando a geladeira rampa abaixo, $F_{\text{aceleração}}$, é a seguinte:

$$F_{\text{aceleração}} = mg \sin \theta - F_f = mg \sin \theta - \mu_k mg \cos \theta$$

Note que você subtrai F_f , a força devido à fricção, pois essa força sempre atua em oposição à força que faz o objeto mover-se. Ligar os números fornecerá:

$$F_{\text{aceleração}} = (100)(9,8)(\sin 30^\circ) - (0,15)(100)(9,8)(\cos 30^\circ) = 490\text{N} - 127\text{N} = 363\text{N}$$

A força que empurra a geladeira rampa abaixo é de 363N. Como a geladeira tem 100 kg, você tem uma aceleração de $363\text{N} / 100 \text{ kg} = 3,63$ metros por segundo², que atua na rampa inteira de 3,0 metros. Você pode calcular a velocidade final da geladeira na parte inferior da rampa assim:

$$v_f^2 = 2as$$

Ligando os números, você obterá:

$$v_f^2 = 2as = 2(3,63 \text{ metros por segundo}^2)(3,0 \text{ metros}) = 21,8 \text{ metros}^2 \text{ por segundo}^2$$

Isto finalmente fornecerá 4,67 metros por segundo como a velocidade final da geladeira, quando ela começa a descer a rua, em direção ao carro estacionado.

Descobrimo a distância percorrida

Com seus cálculos da seção anterior, você sabe qual distância a geladeira percorrerá depois que seus amigos soltaram-na na rampa? Você começa fornecendo números à sua calculadora enquanto seus amigos observam com tensão.

Você tem uma geladeira descendo a rua a 4,67 metros por segundo e precisa calcular qual distância percorrerá. Como ela está viajando na calçada agora, você precisa decompor a força devido ao atrito. E a gravidade não irá acelerar mais o objeto, pois a rua é plana. Mais cedo ou mais tarde, irá parar. Mas a que distância ficará do carro que está estacionado a 7,5 metros? Como sempre, seu primeiro cálculo é a força que atua no objeto. Neste caso, você descobre a força devido ao atrito:

$$F_f = \mu_k F_N$$

Como a geladeira está se movendo em uma superfície horizontal, a força normal, F_N , é simplesmente o peso da geladeira, mg , significando que a força do atrito é

$$F_f = \mu_k F_N = \mu_k mg$$

Ligar os dados fornecerá

$$F_f = \mu_k F_N = \mu_k mg = (0,15)(100)(9,8) = 147N$$

Uma força 147N atua para parar a geladeira que desliza, que agora está aterrorizando a vizinhança. Portanto, qual distância ela percorrerá antes de parar? Como a força do atrito, neste caso, atua para desacelerar a geladeira, a aceleração é negativa:

$$a = F_f / m = -147N / 100 \text{ kg} = -1,47 \text{ metros por segundo}^2$$

Você pode descobrir a distância através da equação:

$$v_f^2 - v_o^2 = 2as$$

A distância na qual a geladeira desliza é:

$$s = (v_f^2 - v_o^2) / 2a$$

E, neste caso, você deseja que a velocidade final, v_f , seja zero, portanto esta equação divide-se em:

$$s = (v_f^2 - v_o^2) / 2a = (0^2 - 4,67^2) / 2(-1,47) = 7,4 \text{ metros}$$

Puxa! A geladeira desliza apenas 7,4 metros e o carro está a 7,5 metros de distância. Com aflição, você observa o show enquanto seus amigos, em pânico, correm atrás dela, apenas para vê-la parar diante do carro. Como você esperava.

Determinando Como a Gravidade Afeta os Objetos Transportados Pelo Ar

O Capítulo 7 analisará a gravidade no espaço, mas tenho assuntos a tratar neste capítulo em relação à gravidade próxima à superfície da Terra. Você encontrará muitos problemas de Física que lidam com as questões da gravidade e esta seção é sobre o que sobe e desce – o comportamento dos objetos sob a influência da atração gravitacional constante. Pense nesta seção como uma ponte entre as informações sobre o atrito e o plano inclinado, tratados anteriormente neste capítulo, e as informações da gravidade, no Capítulo 7.

Subindo: Altura máxima

Usando forças como, por exemplo, a aceleração, gravidade e velocidade, você pode determinar a que distância um objeto subirá no ar – uma boa habilidade em qualquer comemoração de 7 de setembro.

Digamos, por exemplo, que em seu aniversário, seus amigos lhe dão exatamente o que você sempre quis: um canhão. Ele tem uma velocidade de fogo de 860 metros por segundo e atira balas de canhão que pesam 10 kg. Ansiosos para mostrar como funciona, seus amigos atiram. Um problema: o canhão está apontando para cima. Puxa, você pensa, observando a bala de canhão. Você imagina o quanto subirá, portanto todos começam a adivinhar. Como você sabe Física, pode descobrir isso com exatidão.

Você sabe a velocidade inicial, v_o , da bala de canhão e sabe que a gravidade irá acelerá-la para baixo. Você pode determinar a altura da bola? Em sua altura máxima, sua velocidade será zero e, então, ela descerá para a Terra de novo. Portanto, você pode usar a seguinte equação para seu ponto mais alto, onde sua velocidade será zero:

$$v_f^2 - v_o^2 = 2as$$

onde s é a distância da bala de canhão. Isso fornecerá:

$$s = (v_f^2 - v_o^2) / 2a$$

Ligando ao que você sabe – v_f é 0, v_o é 860 metros por segundo e a aceleração é g para baixo (com g sendo 9,8 metros por segundo², a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra) ou $-g$ – obterá:

$$s = (v_f^2 - v_o^2) / 2a = (0^2 - 860^2) / 2(-9,8) = 3,8 \times 10^4 \text{ metros}$$

Op! A bola subirá 38 quilômetros ou quase 24 milhas. Nada mal para um presente de aniversário. Olhando em volta todos os convidados,

você imagina quanto tempo levará para a bala de canhão atingir sua altura máxima.

Flutuando no ar: Hora da suspensão

Quanto tempo levaria para a bala de canhão subir 24 milhas (veja a seção anterior) para alcançar sua altura máxima, onde está flutuando em uma velocidade 0? Você viu um problema bem parecido no Capítulo 4, onde uma bola de golfe cai de um rochedo; lá, você usa a equação:

$$s = \frac{1}{2} at^2$$

para determinar por quanto tempo a bola está no ar, dada a altura do rochedo. Essa equação é um modo de chegar à solução, mas você tem todas as maneiras de resolver um problema como este. Por exemplo, você sabe que a velocidade da bala de canhão em sua altura máxima é 0, portanto pode usar a seguinte equação para saber o tempo que a bala levará para atingir sua altura máxima:

$$v_f = v_o + at$$

Como $v_f = 0$ e $a = -g$ (9,8 metros por segundo²), é resolvido assim:

$$0 = v_o - gt$$

Em outras palavras:

$$t = v_o / g$$

Você fornece os números em sua calculadora assim:

$$t = v_o / g = 860 / 9,8 = 88 \text{ segundos}$$

Leva 88 segundos para a bala de canhão atingir sua altura máxima. Mas e o tempo total da viagem?

Descendo: Decompondo o tempo total

Quanto tempo levaria para uma bala de canhão, atirada a 24 milhas no ar, completar sua viagem inteira – para cima e, depois, para baixo, da boca do canhão até a grama – metade disso leva 88 segundos (para atingir sua altura máxima; veja a seções anteriores)? Voos como este da bala de canhão são simétricos; a viagem para cima é um espelho da viagem para baixo. A velocidade em qualquer ponto para cima tem exatamente a mesma grandeza da viagem para baixo, mas, na parte para baixo, a velocidade está na direção oposta. Isso

significa que o tempo de voo total é o dobro do tempo que leva para a bala atingir seu ponto mais alto, ou:

$$t_{\text{total}} = 2(88) = 176 \text{ segundos}$$

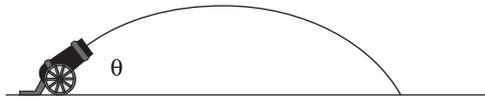
Você tem 176 segundos ou 2 minutos e 56 segundos, até que a bala de canhão atinja o solo.

Atirando um objeto em ângulo

Nas seções anteriores, você examinou um tipo de bala de canhão no ar com o novo canhão recebido como presente de aniversário. Imagine, agora, que um de seus amigos perturbados decida atirar a bala em um ângulo, para atingir um alvo, mostrado na Figura 6-7. As seguintes seções cobrem o movimento da bala de canhão quando você atira em um ângulo.

Figura 6-7:

Atirando uma bala de canhão em um ângulo particular em relação ao solo.



Dividindo o movimento de uma bala de canhão em seus componentes

Como você lida com o movimento de um tiro de bala de canhão em ângulo? Como você sempre pode dividir o movimento em duas dimensões nos componentes X e Y, e como a gravidade atua somente no componente Y, seu trabalho é fácil. Tudo que precisa fazer é dividir a velocidade inicial nos componentes X e Y (veja o Capítulo 4 para obter os fundamentos desta tarefa):

$$v_x = v_o \cos \theta$$

$$v_y = v_o \sin \theta$$

Esses componentes da velocidade são independentes e a gravidade atua apenas na direção Y, significando que v_x é constante; apenas v_y muda com o tempo:

$$v_y = v_o \sin \theta - gt$$

Se você quiser saber as posições X e Y da bala de canhão em um determinado momento, poderá encontrá-las facilmente. Você sabe que X é, simplesmente:

$$x = v_x t = v_o \cos \theta t$$

E como a gravidade acelera a bala de canhão na vertical, Y fica assim (o t^2 aqui é o que dá à trajetória da bala, na Figura 6-7, a forma parabólica):

$$y = v_y t - \frac{1}{2} g t^2$$

Você descobriu nas seções anteriores o tempo que leva para a bala de canhão atingir o solo quando atirada para cima:

$$t = 2v_y / g$$

Saber esse tempo também fornecerá um alcance do canhão na direção X:

$$s = v_x t = \frac{2v_x v_y}{g} = \frac{2v_o^2 \sin\theta \cos\theta}{g}$$

Portanto, você conseguiu – agora, pode descobrir o alcance do canhão dados a velocidade da bala e o ângulo no qual ela foi atirada.

Descobrimo o alcance máximo da bala de canhão

Qual será o alcance de seu novo canhão se você mirá-lo em 45° , o que fornecerá seu alcance máximo? A equação usada fica assim:

$$s = v_x t = \frac{2v_x v_y}{g} = \frac{2v_o^2 \sin\theta \cos\theta}{g} = \frac{2(860)^2 \sin 45^\circ \cos 45^\circ}{9,8} = 75 \text{ quilômetros}$$

Seu alcance é de 75 quilômetros ou quase 47 milhas. Nada mal!

Capítulo 7

Girando em Torno de Movimentos Circulares e Órbitas

Neste Capítulo

- ▶ Examinando o movimento uniforme
 - ▶ Girando com aceleração angular
 - ▶ Sentindo a tração da força centrípeta
 - ▶ Incorporando deslocamento, velocidade e aceleração
 - ▶ Orbitando com as leis de Newton e a gravidade
 - ▶ Ficando no ar com um movimento circular vertical
-

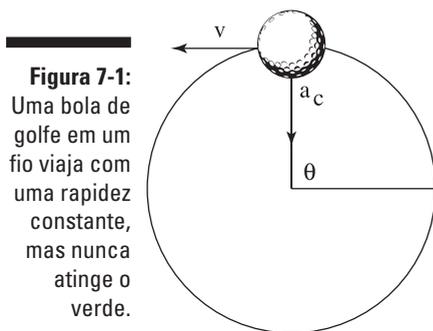
O movimento circular pode incluir foguetes movendo-se em volta de planetas, carros de corrida zumbindo em uma pista ou abelhas zunindo em torno de uma colmeia. Os capítulos anteriores analisaram conceitos como, por exemplo, deslocamento, velocidade e aceleração; agora, você pode descobrir como essas forças funcionam quando você está se movendo em um círculo.

Você tem equivalentes circulares para cada uma das forças mencionadas, o que torna fácil trabalhar com o movimento circular algo fácil — você meramente calcula o deslocamento angular, velocidade angular e aceleração angular. Porém, ao invés de lidar com o deslocamento linear, você lida com o deslocamento angular como um ângulo. A velocidade angular indica em qual ângulo você se move em segundos e a aceleração angular fornece a taxa da mudança na velocidade angular. Tudo que você tem que fazer é pegar as equações lineares e substituir os equivalentes angulares: deslocamento angular para deslocamento, velocidade angular para velocidade e aceleração angular para aceleração.

É hora de entrar neste capítulo e ficar tonto com o movimento circular.

Ficando no Curso: Movimento Circular Uniforme

Um objeto com *movimento circular uniforme* viaja em círculo com uma rapidez constante. Exemplos práticos podem ser difíceis de obter, a menos que você veja um piloto de corridas com seu acelerador ou um relógio com ponteiro dos segundos que se move em movimento constante. Veja a Figura 7-1, onde uma bola de golfe ligada a um fio está correndo em círculos. A bola de golfe está viajando com uma rapidez uniforme quando se move em círculo (não em velocidade uniforme, pois sua direção muda o tempo todo), portanto você pode dizer que ela está viajando em movimento circular uniforme.



Qualquer objeto que viaja em movimento circular uniforme sempre leva a mesma quantidade de tempo para se mover completamente em torno do círculo. Esse tempo é chamado de *período*, designado por T . Você pode associar facilmente a velocidade da bola de golfe ao período, pois sabe que a distância que a bola de golfe deve viajar a cada tempo em volta do círculo é a circunferência do círculo, que, se r for o raio do círculo, será de $2\pi r$. Portanto, você pode obter a equação para encontrar o período de um objeto encontrando primeiro sua velocidade:

$$v = 2\pi r / T$$

Se você trocar T e v , obterá

$$T = 2\pi r / v$$

Por exemplo, digamos que você esteja girando uma bola de golfe em círculo, com um fio de 1,0 m, a cada meio segundo. Com que rapidez a bola está se movendo? É hora de ir para os números:

$$v = 2\pi r / T = [2(3,14)(1,0)] / \frac{1}{2} = 12,6 \text{ metros/segundo}$$

A bola move-se com uma velocidade de 12,6 metros por segundo. Simplesmente assegure-se que tenha um fio suficientemente forte!

Mudando a Direção: Aceleração Centrípeta

Para manter um objeto movendo-se em um movimento circular, sua velocidade muda constantemente a direção, como você pode ver na Figura 7-2. Por isso, a aceleração é criada, chamada de *aceleração centrípeta* – a aceleração necessária para manter um objeto movendo-se em círculo. Em qualquer ponto, a velocidade do objeto é perpendicular ao raio do círculo.



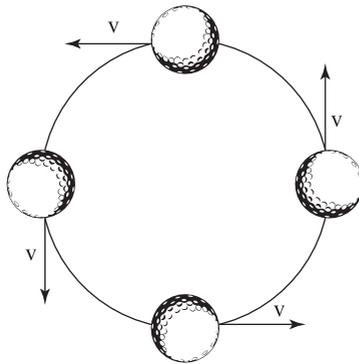
Esta regra é verdadeira para todos os objetos: a velocidade de um objeto no movimento circular uniforme é sempre perpendicular ao raio do círculo.

Se o fio que mantém a bola na Figura 7-2 rompesse no momento superior, inferior, esquerdo ou direito que você vê na ilustração, a bola seguiria em qual direção? Se a velocidade apontasse para a esquerda, a bola voaria para a esquerda. Se a velocidade apontasse para a direita, a bola voaria para a direita. E assim por diante. Isso não é claro para muitas pessoas, mas é o tipo de questão de Física que pode surgir em cursos introdutórios.



Você também deve lembrar que a velocidade de um objeto, em movimento circular uniforme, é sempre em ângulos retos ao raio do caminho do objeto. Em qualquer momento, a velocidade aponta para a tangente da circunferência, onde está o objeto, portanto a velocidade é chamada de *tangencial* ao círculo.

Figura 7-2:
A velocidade muda constantemente a direção para manter o movimento circular uniforme de um objeto.



Controlando a velocidade com a aceleração centrípeta

O que há de especial no movimento circular é que quando um objeto está nele, sua velocidade é constante, significando que a grandeza da

velocidade do objeto não muda. Portanto, a aceleração não pode ter nenhum componente na mesma direção da velocidade; se pudesse, a grandeza da velocidade mudaria.

Porém, a direção da velocidade está mudando constantemente — ela sempre se curva para que o objeto mantenha o movimento em círculo constante. Para que isso aconteça, a aceleração centrípeta do objeto está sempre concentrada no centro do círculo, perpendicular à velocidade do objeto a qualquer momento. Ela muda a direção da velocidade do objeto enquanto mantém a grandeza da velocidade constante.

No caso da bola (ver Figuras 7-1 e 7-2), o fio exerce uma força na bola para mantê-la em círculos, uma força que fornece a aceleração centrípeta da bola. Para fornecer essa força, você tem que puxar constantemente a bola em direção ao centro do círculo (é hora de um bom experimento de raciocínio: imagine como seria, na força, mover um objeto em um fio). Você pode ver o vetor da aceleração centrípeta, a_c , na Figura 7-1.

Se você acelera a bola em direção ao centro do círculo para fornecer a aceleração centrípeta, por que ela não atinge sua mão? A resposta é que a bola já está se movendo em alta velocidade. A força e, portanto, a aceleração que você fornece sempre age em ângulos retos à velocidade e, assim, muda apenas a *direção* da velocidade, não sua *grandeza*.

Encontrando a grandeza da aceleração centrípeta

Você sempre tem que acelerar o objeto em direção ao centro do círculo para mantê-lo em movimento circular. Portanto, você pode encontrar a grandeza da aceleração criada? Sem dúvida. Se um objeto estiver se movendo em movimento circular uniforme com velocidade v e raio r , você poderá encontrar a aceleração centrípeta com a seguinte equação:

$$a_c = v^2 / r$$

Como exemplo prático, imagine que você esteja fazendo curvas em alta velocidade. Para qualquer velocidade constante, você pode ver, a partir da equação $a_c = v^2 / r$, que a aceleração centrípeta é inversamente proporcional ao raio da curva, que você conhece por experiência. Nas curvas mais fechadas, seu carro precisa fornecer uma aceleração centrípeta maior.

Puxando em Direção ao Centro: Força Centrípeta

Quando você está dirigindo um carro, cria uma aceleração centrípeta pelo atrito dos pneus na estrada. Como você sabe qual força precisa criar para virar o carro em uma determinada velocidade e raio da curva? Isso depende da *força centrípeta* — a força para dentro, que busca o centro, necessária para manter um objeto movendo-se em movimento circular uniforme.

Você pode ter facilidade para balançar uma bola em um fio em círculo (ver Figura 7-1), mas se substituir a pequena bola por uma bala de canhão, cuidado. Agora, você tem que mover 10 kg, na extremidade de um fio com 1,0 m, a cada meio segundo. Ou seja, é preciso muito mais força.



Esta regra é verdadeira para todos os objetos: a velocidade de um objeto no movimento circular uniforme é sempre perpendicular ao raio do círculo.

Como a força é igual a massa vezes a aceleração, $F = ma$, e como a aceleração centrípeta é igual a v^2 / r (veja a seção anterior), você pode determinar a força centrípeta necessária para manter um objeto movendo-se em movimento circular uniforme com massa m , velocidade v e raio r com a seguinte equação:

$$F_c = mv^2 / r$$

Essa equação informa quanta força você precisa para mover um determinado objeto em círculo com certo raio e velocidade (**Nota:** os objetos que se movem em círculos com o mesmo raio podem ter velocidades diferentes, mas você precisa de mais força para as velocidades mais rápidas). Por exemplo, a bola das Figuras 7-1 e 7-2 está se movendo a 12,6 metros por segundo em um fio com 1,0 m. Quanta força você precisa para fazer a bala de canhão de 10 kg mover-se no mesmo círculo com a mesma velocidade? A equação fica assim:

$$F_c = mv^2 / r = [(10)(12,6)^2] / 1,0 = 1.590 \text{ Newtons}$$

Você precisa de mais ou menos 1.590N ou cerca de 357 libras de força (4.448 Newtons em uma libra; veja o Capítulo 5 para saber mais sobre os Newtons). Muito pesado, se você me perguntar; espero que seus braços aguentem.

A força centrípeta realmente é uma força necessária centripetamente?

A força centrípeta não é uma força nova que aparece do nada quando um objeto roda em círculo; é a força que o objeto *precisa* para continuar rodando nesse círculo. Por isso, pode ser melhor referir-se a ela como *força necessária centrípeta*. Vi muitas pessoas confusas porque acham que a força centrípeta é uma nova força que ocorre de maneira mágica. A confusão é compreensível, pois todas as outras forças que você estuda — como, por exemplo, a força da gravidade ou o atrito — são forças reais que se aplicam a vários objetos.

A força centrípeta, por outro lado, é a força que você *precisa* para manter o movimento em círculo — e, para mantê-lo assim, a soma vetorial de todas as outras forças nesse objeto deve, pelo menos, fornecer a força centrípeta necessária. Em outras palavras, quando você empurra um objeto com uma força de 5,0N, esse objeto sente uma força real de 5,0N. Mas se você quiser fazer um objeto rodar em círculo e ele precisar de uma força de 5,0N para realizar a tarefa, ele não rodará em círculo até que você aplique a força necessária.

Negociando Curvas e Declives: Força Centrípeta Através de Rotações

Imagine que você esteja dirigindo um carro, andando de bicicleta ou praticando exercícios em uma superfície e chega a uma curva inclinada. Quanto mais inclinada for a superfície, mais força centrípeta você precisará para dirigir o carro, bicicleta ou a si mesmo, em alta velocidade. A força que você precisa vem do atrito dos pneus com a superfície ou do atrito de seus pés contra o solo; se a superfície estiver coberta por uma superfície diferente, como, por exemplo, gelo, você produzirá menos atrito e não poderá mudar de direção com tanta segurança em altas velocidades.

Por exemplo, digamos que você esteja no banco do passageiro do carro, aproximando-se de uma curva fechada com um raio de 10,0 metros. Você sabe que o coeficiente do atrito estático (ver Capítulo 6) é de 0,8 nesta estrada (você usa o coeficiente do atrito estático porque os pneus não estão deslizando na superfície da estrada) e que o carro tem uma massa de cerca de 1.000 kg. Qual é a velocidade máxima que o motorista pode ter e ainda manter a segurança? Você pega sua calculadora enquanto o motorista volta-se para você com as sobrancelhas levantadas. A força do atrito precisa fornecer a força centrípeta, portanto você sugere o seguinte:

$$F_c = mv^2 / r = \mu_s mg$$

onde m é a massa do carro, v é a velocidade, r é o raio, μ é o coeficiente do atrito estático e g é a aceleração devido à gravidade, 9,8 metros por segundo². Determinar a velocidade em um lado da equação fornecerá:

$$v = \sqrt{\mu_s gr}$$

Isto parece bem simples — você apenas liga os números para obter

$$v = \sqrt{\mu_s gr} = \sqrt{(0,8)(9,8)(10,0)} = 8,9 \text{ metros por segundo}$$

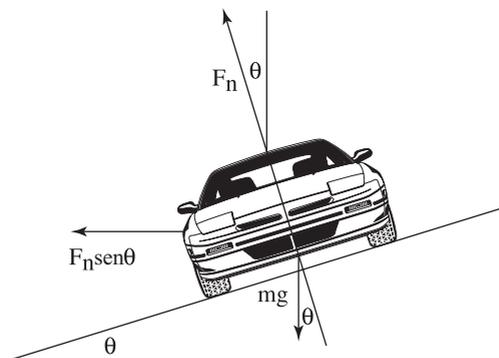
Você calcula 8,9 metros por segundo ou cerca de 20 mph. Você vê no velocímetro a velocidade de 18 mph. Você pode vencer a curva com segurança com sua velocidade atual. Contudo, não se pode esperar que todos reduzam drasticamente ao dirigir em uma rodovia, sendo, por isso, que suas curvas são inclinadas, para facilitar o trânsito de motoristas. O peso de seu carro ajuda a fornecer parte da força centrípeta necessária.

Veja a Figura 7-3, que mostra seu carro inclinando em uma curva. Qual deverá ser o ângulo θ se os motoristas estiverem na curva com um raio de 200 metros a 60 mph? Os engenheiros podem tornar agradável a experiência de dirigir se inclinarem a curva de modo que

os motoristas juntem a força centrípeta necessária para fazer a curva como o *componente* dos pesos de seus carros atuando em direção ao centro do círculo da curva. Esse componente é $F_n \sin \theta$ (F_n é a força normal; ver Capítulo 6), portanto:

$$F_c = F_n \sin \theta = mv^2 / r$$

Figura 7-3:
As forças atuando em um carro inclinando em uma curva.



Para encontrar a força centrípeta, você precisa da força normal, F_n . Olhando a Figura 7-3, poderá observar que F_n é uma combinação da força centrípeta devido ao carro que se inclinou na curva e ao peso do carro. O componente puramente vertical de F_n deve ser igual a mg , pois nenhuma outra força está operando verticalmente, assim:

$$F_n \cos \theta = mg$$

ou

$$F_n = mg / \cos \theta$$

Ligar este resultado na equação para a força centrípeta fornecerá:

$$F_c = F_n \sin \theta = (mg \sin \theta / \cos \theta) = mv^2 / r$$

Como o $\sin \theta$ dividido por $\cos \theta = \tan \theta$, você também pode escrever isto assim:

$$F_c = F_n \sin \theta = (mg \sin \theta) / \cos \theta = mg \tan \theta = mv^2 / r$$

Finalmente, a equação divide-se em:

$$\theta = \tan^{-1}(v^2 / gr)$$



Você não precisa memorizar o resultado, se estiver em pânico. Sempre poderá deduzir a equação se tiver algumas informações. $\theta = \tan^{-1}(v^2 / gr)$ é o tipo de equação usada pelos engenheiros de rodovias quando eles têm curvas inclinadas (note que a massa do carro cancela-se, significando que se mantém para qualquer veículo, independentemente do peso). Para resolver o problema apresentado anteriormente, você pode ligar os números; 60 mph é cerca de 27 metros por segundo e o raio da curva é de 200 metros, portanto:

$$\theta = \tan^{-1}(v^2 / gr) = \tan^{-1}(27^2 / [(9,8)(200)]) = 20^\circ$$

Os engenheiros devem inclinar a curva em cerca de 20° para dar aos motoristas uma experiência suave. Bom trabalho; você seria um excelente engenheiro de rodovias!

Ficando Angular: Deslocamento, Velocidade e Aceleração

Se você for mais do tipo “ponto a ao ponto b”, poderá descrever o movimento circular de um modo linear, mas leva um pouco de tempo para acostumar. Veja a bola na Figura 7-1. Ela não cobre a distância em um modo linear. Você não pode representar a coordenada do eixo X ou do eixo Y da bola de golfe com uma linha reta, mas seu caminho de movimento fornece uma coordenada que você pode desenhar como uma linha reta no movimento circular uniforme — o ângulo. Se você representar o ângulo, o ângulo total que a bola roda aumentará em linha reta. Entretanto, para o movimento circular, você pode pensar em ângulos, θ , exatamente como pensa no deslocamento, s , no movimento linear (veja o Capítulo 3 para saber mais sobre deslocamento).



A unidade padrão de medida para a versão linear do movimento circular é o *raio*, não o grau. Um círculo completo é composto de 2π radianos, que também é 360° . Assim, $360^\circ = 2\pi$ radianos. Se você viajar em um círculo completo, percorrerá 360° ou 2π radianos. Um meio círculo é π radiano e um quarto de círculo é $\pi/2$ radianos.



Como você converte de graus para radianos e vice-versa? Como $360^\circ = 2\pi$ radianos (ou 2 multiplicado por 3,14, a versão redonda da torta), você tem um cálculo fácil. Se tiver 45° e quiser saber em quantos radianos se traduz, use este fator de conversão:

$$45^\circ \frac{2\pi \text{ radianos}}{360^\circ} = \frac{\pi}{4} \text{ radianos}$$

Você descobre que $45^\circ = \pi/4$ radianos. Se tiver, digamos $\pi/2$ radianos e quiser saber em quantos graus se converte, fará esta conversão:

$$\pi/2 \text{ radianos } (360^\circ / 2\pi \text{ radianos}) = 90^\circ$$

Você calcula que $\pi/2$ radianos = 90° .

O fato de que você pode considerar o ângulo, θ , no movimento circular exatamente como considera o deslocamento, s , no movimento linear é ótimo, pois significa que tem um correspondente angular para cada uma das equações lineares do Capítulo 3. Algumas dessas equações lineares incluem:

$$v = \Delta s / \Delta t$$

$$a = \Delta v / \Delta t$$

$$s = v_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2} a(t_f - t_0)^2$$

$$v_f^2 - v_0^2 = 2as$$

Para encontrar o correspondente angular de cada uma dessas equações, você pode fazer substituições. Ao invés de s , que você usa no percurso linear, usará θ , o *deslocamento angular*. Portanto, o que você usa no lugar da velocidade, v ? Usa a *velocidade angular*, ω , ou o número de radianos cobertos em um segundo:

$$\omega = \Delta \theta / \Delta t$$

Note que a equação anterior parece muito com o modo como você define a velocidade linear:

$$v = \Delta s / \Delta t$$

Digamos, por exemplo, que você tenha uma bola ligada a um fio. Qual será a velocidade angular da bola se você movê-la em volta no fio? A bola fará um círculo completo, 2π radianos, em meio segundo, portanto sua velocidade angular é:

$$\omega = \Delta \theta / \Delta t = 2\pi \text{ radianos} / \frac{1}{2} \text{ segundo} = 4\pi \text{ radianos/segundo}$$

Você também pode encontrar a aceleração da bola? Sim, pode, usando a *aceleração angular*, α . A aceleração linear é definida assim:

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Portanto, você define a aceleração angular assim:

$$\alpha = \Delta \omega / \Delta t$$

As unidades da aceleração angular são radianos por segundo². Se a bola aumentasse da velocidade de 4π radianos por segundo, para 8π radianos por segundo em 2 segundos, por exemplo, qual seria sua aceleração angular? Resolva ligando os números:

$$\alpha = \Delta \omega / \Delta t = (8\pi - 4\pi) / 2 = 4\pi / 2 = 2\pi \text{ radianos por segundo}^2$$

Agora, você tem as versões angulares do deslocamento linear, s , velocidade, v , e aceleração, a : deslocamento angular, θ , velocidade angular, ω , e aceleração angular, α . Você pode fazer a substituição, nas equações de velocidade, aceleração e deslocamento (ver Capítulo 3) para obter:

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t$$

$$\alpha = \Delta\omega / \Delta t$$

$$\theta = \omega_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2} \alpha(t_f - t_0)^2$$

$$\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$$

Se você precisar trabalhar em termos de ângulo, não distância, terá gabarito para tanto. Para descobrir mais sobre o deslocamento angular, velocidade angular e aceleração angular, veja a análise sobre a cinética angular e torque no Capítulo 10.

Soltando a Maçã: Lei da Gravitação de Newton

Você não tem que ligar objetos a fios para observá-los rodar em movimento circular; corpos maiores como planetas movem-se em movimento circular também. Você não vê muitos fios estendendo-se da Terra até a Lua para manter a Lua circulando em torno de nós; ao contrário, a *gravidade* fornece a força centrípeta necessária.



O Sr. Isaac Newton propôs uma das leis de peso-pesado na Física para nós: a lei da gravitação universal. Essa lei diz que toda massa exerce uma força de atração em outra massa. Se as duas massas forem m_1 e m_2 e a distância entre elas for r , a grandeza da força será:

$$F = (G m_1 m_2) / r^2$$

onde G é uma constante igual a $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Essa equação permite representar a força gravitacional entre duas massas. Qual é, por exemplo, a atração entre o Sol e a Terra? O Sol tem uma massa com cerca de $1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ e a Terra tem uma massa com cerca de $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$; uma distância com cerca de $1,50 \times 10^{11}$ metros separa os dois corpos. Ligar os números na equação de Newton fornecerá:

$$F = (G m_1 m_2) / r^2 = [(6,67 \times 10^{-11})(1,99 \times 10^{30})(5,98 \times 10^{24})] / (1,50 \times 10^{11})^2 = 3,52 \times 10^{22} \text{ N}$$

Sua resposta de $3,52 \times 10^{22} \text{ N}$ converte-se em cerca de $8,0 \times 10^{20}$ libras de força (4,448N em uma libra).

Um dia uma maçã...

Você conhece a história — uma maçã supostamente caiu na cabeça de Isaac Newton, fazendo com que ele propusesse a lei da gravitação universal. Mas a maçã realmente caiu? E, de fato, acabou em sua cabeça? Embora pareça provável que uma maçã caída tenha colocado Newton no caminho da descoberta ou, pelo menos, chamado sua atenção para

o problema, aparentemente ela não caiu em sua cabeça de acordo com os cálculos históricos recentes. Porém, pelo que os historiadores sabem, a macieira estava no jardim da mãe de Newton, em Woolsthorpe, perto de Grantham, em Lincolnshire. Uma árvore enxertada a partir da original ainda está viva.

Para ter um exemplo da outra ponta do espectro, digamos que você tenha saído para suas observações diárias de Física, quando nota duas pessoas em um banco de parque olhando-se e sorrindo. Com o passar do tempo, nota que elas parecem sentar cada vez mais próximas sempre que você olha. Na verdade, depois de um tempo, elas estão sentadas perto uma da outra. O que poderia estar causando esta atração? Se os dois apaixonados pesassem cerca de 75 kg cada, qual seria a força da gravidade atraindo-os, supondo que eles começaram a aproximação a $\frac{1}{2}$ metro de distância? Seu cálculo fica assim:

$$F = (G m_1 m_2) / r^2 = [(6.67 \times 10^{-11})(75)(75)] / \frac{1}{2}^2 = 1,5 \times 10^{-6} \text{N}$$

A força de atração é, mais ou menos, cinco milionésimos de uma onça. Talvez não o bastante para sacudir a superfície da Terra, mas tudo bem. A superfície da Terra tem suas próprias forças com as quais lidar.

Derivando a força da gravidade na superfície da Terra

A equação para a força da gravidade — $F = (G m_1 m_2) / r^2$ — é verdadeira, não importando a distância das duas massas. Mas você também tem um caso gravitacional especial (que é a maioria do trabalho sobre gravidade neste livro): a força da gravidade na superfície da Terra. Adicionar a gravidade à massa é onde entra a diferença entre peso e massa. A massa é considerada uma medida da inércia de um objeto e seu peso é a força exercida sobre ele em um campo gravitacional. Na superfície da Terra, as duas forças estão relacionadas pela aceleração devido à gravidade: $F_g = mg$. Gramas, quilogramas e libra-massa são unidades de massa; dinas, newtons e libras são unidades de peso.

Você pode derivar g , a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra, da lei da gravitação de Newton? Com certeza. A força sobre um objeto de massa m_1 perto da superfície da Terra é:

$$F = m_1 g$$

Pela terceira lei de Newton (ver Capítulo 5), esta força deve ser igual ao seguinte, onde r_e é o raio da Terra:

$$F = m_1 g = (G m_1 m_2) / r_e^2$$

O raio da Terra, r_e , tem cerca de $6,38 \times 10^6$ metros e a massa da Terra tem $5,98 \times 10^{24}$ kg, portanto você tem:

$$F = m_1 g = (G m_1 m_2) / r_e^2 = [(6,67 \times 10^{-11}) m_1 (5,98 \times 10^{24})] / (6,38 \times 10^6)^2$$

Dividir os dois lados por m_1 dará

$$g = [(6,67 \times 10^{-11}) (5,98 \times 10^{24})] / (6,38 \times 10^6)^2 = 9,8 \text{ metros/segundo}^2$$

A lei da gravitação de Newton fornece a aceleração devido à gravidade sobre a superfície na Terra: $9,8 \text{ metros/segundo}^2$.

Você pode usar a lei da gravitação de Newton para obter a aceleração devido à gravidade, g , na superfície da Terra apenas sabendo a constante gravitacional G , o raio da Terra e a massa da Terra (naturalmente, você pode medir g deixando uma maçã cair e cronometrando, mas qual é a diversão quando você pode calcular de um modo indireto, que requer que primeiro meça a massa da Terra?).

Usando a lei da gravitação para examinar as órbitas circulares

No espaço, os corpos estão orbitando constantemente outros corpos devido à gravidade. Os satélites (inclusive a Lua) orbitam a Terra, a Terra orbita o Sol, o Sol orbita o centro da Via Láctea, a Via Láctea orbita em torno do centro de seu grupo local de galáxias. É algo grande. No caso do movimento orbital, a gravidade fornece a força centrípeta que impulsiona as órbitas. A força é bem diferente do movimento orbital pequeno — como quando você tem uma bola em um fio — porque dada determinada distância e duas massas, a força gravitacional sempre será a mesma. Você não pode aumentá-la para aumentar a velocidade de um planeta em órbita como pode com uma bola. As seguintes seções examinam a rapidez e o período de tempo dos corpos em órbita e as leis de Kepler para os corpos em órbita.

Calculando a velocidade de um satélite

Um determinado satélite pode ter apenas uma velocidade quando está em órbita em volta de um determinado corpo com certa distância, porque a força da gravidade não muda. Assim, qual é essa velocidade? Você pode calculá-la com as equações para a força centrípeta e a força gravitacional. Você sabe que para um satélite de determinada massa, m_1 , orbitar, você precisa de uma força centrípeta correspondente (ver seção “Puxando em direção ao centro: força centrípeta”):

$$F_c = (m_1 v^2) / r$$

Essa força centrípeta tem que vir da força da gravidade, portanto:

$$F = (G m_1 m_2) / r^2 = (m_1 v^2) / r$$

Você pode reorganizar esta equação para obter a velocidade:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_2}{r}}$$



Esta equação representa a rapidez que um satélite, em determinado raio, deve ter para orbitar, caso a órbita seja devido à gravidade. A velocidade não pode variar, desde que o satélite tenha um raio orbital constante — ou seja, contanto que esteja em círculos. Essa equação mantém-se para qualquer objeto em órbita, onde a atração é a força da gravidade, seja um satélite feito pelo homem orbitando a Terra, seja a Terra orbitando o Sol. Se você quiser encontrar a velocidade para os satélites que orbitam a Terra, por exemplo, usará a massa da Terra na equação:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}}$$

Os satélites feitos pelo homem geralmente orbitam em alturas de 400 milhas da superfície da Terra (cerca de 640 quilômetros ou mais). Qual é a velocidade de tal satélite? Tudo que você tem a fazer é apresentar os números:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} = \sqrt{\frac{(6,67 \times 10^{-11})(5,98 \times 10^{24})}{7,02 \times 10^6}} = 7,53 \times 10^3 \text{ metros por segundo}$$

Isto se converte em cerca de 16.800 mph.



Alguns detalhes que você deve notar depois de revisar a equação da velocidade:

- ✓ O número pelo qual você divide na equação anterior, $7,02 \times 10^6$ metros, não é a distância que o satélite orbita acima da superfície da Terra, que é de 640 quilômetros. É por isso que você tem que usar a distância do centro da Terra quando calcula a atração gravitacional. Portanto, a distância que você usa na equação é a distância entre os dois corpos em órbita. Neste caso, você soma a distância do centro da Terra até a superfície, $6,38 \times 10^6$ metros, com os 640 quilômetros.
- ✓ A equação supõe que o satélite está alto o bastante em relação ao solo que ele orbita na atmosfera. Essa suposição realmente não é verdadeira, mesmo a 400 milhas, portanto satélites como este sentem o atrito do ar. Gradualmente, a resistência do atrito faz com que fiquem cada vez mais lentos e quando atingem a

atmosfera, sofrem combustão. Quando um satélite está a menos de 100 milhas acima da superfície, sua órbita diminui muito, sempre que faz um círculo na Terra (fique atento, aí embaixo!).

- ✓ A equação é independente da massa. Se a Lua orbitasse a 640 quilômetros, ao invés do satélite construído pelo homem, e você pudesse ignorar o atrito do ar e as colisões com a Terra, ela teria que ter a mesma rapidez do satélite para preservar sua órbita próxima (o que contribuiria com alguns nasceres da Lua bem espetaculares).



Você pode considerar um satélite em movimento sobre a Terra como se estivesse sempre caindo. A única coisa que o impede de cair diretamente na Terra é que sua velocidade aponta para o horizonte. O satélite está caindo, sendo por isso que os astronautas em uma estação espacial não têm peso, mas sua velocidade assume o horizonte – ou seja, a curvatura do mundo enquanto caem – portanto, não chegam perto da Terra.

Algumas vezes, é mais importante saber o raio de uma órbita do que a velocidade do objeto, como, por exemplo, quando você está acompanhando um satélite indo para o horizonte antes que a comunicação possa ocorrer.

Calculando o período de tempo de um satélite

O *período* de um satélite é o tempo que leva para fazer uma órbita completa em torno de um objeto. Se você souber a velocidade do satélite e o raio no qual ele orbita (veja a seção anterior), poderá descobrir seu período. O satélite gira em torno da circunferência inteira do círculo – que será de $2\pi r$ se r for o raio da órbita – no período, T . Isto significa que a velocidade orbital deve ser de $2\pi r / T$, dando:

$$v = \sqrt{\frac{Gm_E}{r}} = \frac{2\pi r}{T}$$

Se você determinar isto para o período do satélite, obterá

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_E}}$$

Você, físico intuitivo, pode estar imaginando: e se você quiser examinar um satélite que, simplesmente, fica estacionário no mesmo lugar na Terra, o tempo todo? Em outras palavras, um satélite cujo período é igual a 24 horas da Terra? Consegue? Como você deve saber, tais satélites existem. Eles são muito populares nas comunicações, pois estão sempre orbitando no mesmo ponto; eles não desaparecem no horizonte e, então, reaparecem depois. Também são utilizados como satélites de posicionamento global, ou GPS. Nos casos dos satélites estacionários, o período, T , é de 24 horas ou 86.400 segundos. Você pode encontrar o raio que um satélite estacionário precisa ter? Usando a equação para períodos de tempo, você vê que:

$$r^3 = (T^2 Gm_E) / 4\pi^2$$

Compreendendo as leis dos corpos em órbita de Kepler

Johannes Kepler, um alemão nascido no Sagrado Império Romano, propôs três leis que ajudaram a explicar muito as órbitas, antes de Newton propor sua lei da gravitação universal. Estas são as leis de Kepler:

- ✔ **Lei 1:** os planetas orbitam em elipses (note que um círculo também é uma elipse.).
- ✔ **Lei 2:** os planetas movem-se de modo que uma linha entre o Sol e o planeta estende-se na mesma área ao mesmo tempo, independente de onde estão em suas órbitas.

- ✔ **Lei 3:** o quadrado do período orbital de um planeta é proporcional à distância do Sol ao cubo.

Você pode observar que a terceira lei foi derivada das leis de Newton vendo a seção "Calculando o período de tempo de um satélite". Ela assume a forma da equação: $r^3 = (T^2 G m_E) / 4\pi^2$. Embora a terceira lei de Kepler diga que T^2 é proporcional a r^3 , você pode obter a constante exata em relação a essas quantidades usando a lei gravitacional de Newton.

Ligando os números, você obterá

$$r^3 = (T^2 G m_E) / 4\pi^2 = [(8,64 \times 10^4)^2 (6,67 \times 10^{-11}) (5,98 \times 10^{24})] / 4\pi^2 = 4,23 \times 10^7 \text{ metros}$$

Você obtém um raio de $4,23 \times 10^7$ metros. Subtraindo o raio da Terra de $6,38 \times 10^6$ metros, obterá $3,59 \times 10^7$, que se converte em cerca de 22.300 milhas. Esta é a distância da Terra que os satélites geossíncronos precisam para orbitar. Com essa distância, eles orbitam a Terra com a mesma rapidez com que ela está girando, significando que eles ficam no mesmo espaço o tempo todo.



Na prática, é muito difícil conseguir a velocidade certa, sendo por isso que os satélites geossíncronos têm propulsores a gás que podem ser usados para ajuste ou bobinas magnéticas que os permitem se mover, empurrando-os contra o campo magnético da Terra.

Fazendo uma Volta Completa: Movimento Circular Vertical

Talvez, você tenha assistido a esportes radicais na televisão e imaginado como os ciclistas ou skatistas podem fazer uma volta completa em uma pista e ficar de cabeça para baixo no alto sem cair no chão. A gravidade não deveria trazê-los para baixo? Qual velocidade eles devem ter? As respostas para estas perguntas de movimento circular vertical estão na força centrípeta e na força da gravidade.

Veja a Figura 7-4, onde uma bola está fazendo uma volta em uma pista, lembrando uma volta completa de montanha-russa. Uma pergunta que você pode encontrar nas aulas de Física introdutória: “qual velocidade é necessária para que a bola faça uma volta completa com segurança?”. O ponto crucial está no topo da pista — se a bola sair de sua pista circular, o topo é onde ela cairá. Para responder a esta pergunta crucial, você deve saber qual critério a bola deve atender para ficar firme. Pergunte a si mesmo: “qual é o limite que a bola deve atender?”

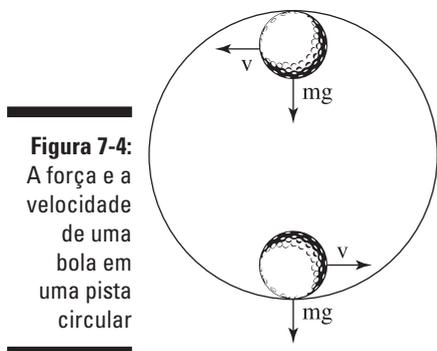


Figura 7-4: A força e a velocidade de uma bola em uma pista circular

Para girar em uma volta completa, um objeto deve ter uma força resultante atuando nele que se iguale à força centrípeta necessária para continuar girando em um círculo. No topo de seu caminho, como você pode ver na Figura 7-4, a bola mal fica em contato com a pista. Os outros pontos na pista fornecerão a força normal (ver Capítulo 6) por causa da rapidez e pelo fato da pista ser curva. Se você quiser descobrir qual velocidade mínima um objeto precisa ter para ficar girando, precisará ver onde está o ponto em que o objeto mal toca a pista – em outras palavras, onde se encontra à beira de sair de seu caminho circular.

A força normal que a pista aplica em um objeto no topo é praticamente zero. A *única* força que mantém o objeto em sua pista circular é a força da gravidade, que significa que, no seu vértice, a velocidade do objeto tem que coincidir com a força centrípeta fornecida pela gravidade para mantê-lo em um círculo, cujo raio é igual ao raio do círculo. Isso significa que se esta for a força centrípeta necessária:

$$F_c = (mv^2) / r$$

A força da gravidade no topo do círculo será:

$$F_g = mg$$

E como F_g deve ser igual a F_c :

$$(mv^2) / r = mg$$

Você poderá simplificar essa equação na seguinte forma:

$$v = \sqrt{rg}$$



A massa de qualquer objeto que viaja em uma pista circular, como, por exemplo, uma motocicleta ou carro de corrida, é desconsiderada.

A raiz quadrada de r vezes g é a velocidade mínima que um objeto precisa ter no topo do círculo para continuar girando. Qualquer objeto com uma velocidade mais lenta sairá da pista no topo do círculo (poderá voltar para o círculo, mas não estará seguindo a pista circular nesse ponto). Para ter um exemplo prático, se o círculo da Figura 7-4 tiver um raio de 20 metros, com que rapidez a bola terá que viajar no topo dele para ficar em contato com a pista? Coloque em números:

$$v = \sqrt{rg} = \sqrt{(20,0)(9,8)} = 14,0 \text{ metros por segundo}$$

A bola de golfe terá que viajar a 14,0 metros por segundo no topo da pista, que é cerca de 31 mph.



E se você quiser fazer o mesmo, porquê em um círculo em chamas com uma motocicleta para impressionar seus colegas? A mesma velocidade aplica-se: você precisa continuar com cerca de 31 mph, no mínimo, na parte superior da pista, que tem um raio de 20 metros. Se quiser experimentar isto em casa, não se esqueça de que esta é a velocidade necessária no *topo* da pista — você tem que ir mais rápido na parte inferior da pista para viajar a 31mph no topo, simplesmente porque você está mais alto duas vezes do que o raio, ou 40 metros, na parte superior como se tivesse ido para o topo de uma montanha de 40 metros.

Portanto, qual velocidade você precisa na parte inferior da pista? Verifique a Parte III deste livro, onde a energia cinética (o tipo de energia que as motos em movimento têm) é transformada em energia potencial (o tipo de energia que as motos têm quando estão no ar contra a força da gravidade).

Parte III

Manifestando a Energia para Trabalhar

A 5ª Onda

Por Rich Tennant



Nesta parte...

Se você sobe de carro uma montanha e estaciona, ele ainda tem energia – a energia potencial. Se o freio soltar e o carro descer a montanha, ele terá um tipo diferente de energia na parte inferior – energia cinética. Esta parte alerta-o sobre o que é e como o trabalho exercido para mover e estender os objetos torna-se energia. Pensar em termos de trabalho e energia permitirá que você resolva os problemas que as leis de Newton nem mesmo permitem tentar.

Capítulo 8

Descobrimo Algum Trabalho da Física

Neste Capítulo

- ▶ Fazendo estoque da força de trabalho
- ▶ Trabalhando ao contrário com a força negativa
- ▶ Avaliando a energia cinética em funcionamento
- ▶ Conseguindo sua energia potencial
- ▶ Percorrendo o caminho das forças conservativas e não conservativas
- ▶ Considerando a energia mecânica e a potência no trabalho

Você sabe tudo sobre trabalho; é o que faz quando tem que efetuar os problemas de Física. Você senta com sua calculadora, sua um pouco e consegue. Você fez seu trabalho! Infelizmente, isso não vale para o trabalho em termos físicos.

Você faz o trabalho em Física multiplicando uma força pela distância sobre a qual ela atua. Essa pode não ser a ideia de trabalho de seu chefe, mas o serviço fica pronto na Física. Junto com os fundamentos do trabalho, uso este capítulo para apresentar as energias cinética e potencial, ver as forças conservativas e não conservativas, e examinar a energia mecânica e a força. É hora de trabalhar.

Trabalho: Não é o Que Você Pensa

Trabalho é definido como uma força aplicada em certa distância. No jargão da Física, você faz o trabalho aplicando uma força constante, F , sobre uma distância, s , onde o ângulo entre F e s é θ e é igual a $Fs \cos \theta$. Em termos leigos, se você empurrar um disco de hóquei de 1.000 libras por alguma distância, a Física dirá que o trabalho feito é o componente da força aplicada na direção do percurso multiplicado pela distância percorrida.

Para ter uma ideia da faixa de trabalho total, você precisa ver os diferentes sistemas de medida. Depois de deter as unidades de medida, poderá ver exemplos de trabalhos práticos, como, por exemplo, empurrar e arrastar.

Trabalhando nos sistemas de medida

Trabalho é um escalar, não um vetor (significando que tem apenas uma grandeza, não uma direção; mais sobre escalares e vetores no Capítulo 4). Como o trabalho é a força vezes a distância, $F_s \cos \theta$, tem a unidade Newton-metro no sistema metros-quilogramas-segundos (MKS) (ver Capítulo 2). Os Newton-metros são difíceis de trabalhar, portanto, têm um nome especial: *Joules*. Para a conversão, 1 Newton multiplicado por 1 metro = 1 Joule ou 1J.

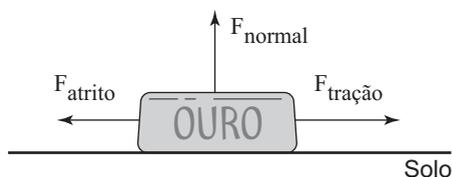
No sistema centímetro-grama-segundo (CGS), $F_s \cos \theta$ tem a unidade dina-centímetro, que também é chamado de *erg* (um ótimo nome para uma unidade de trabalho, porque é o que você diria ao empurrar um peso pesado). Para a conversão, 1 erg = 1 dina-centímetro. E o sistema pé-libra-segundo? Nesse sistema, o trabalho tem as unidades pé-libra.

Empurrando seu peso

Segurar objetos pesados no ar — como, digamos, um conjunto de pesos de musculação — parece requerer muito trabalho. Porém, em termos físicos, isso não é verdade. Mesmo que segurar pesos possa requerer muito trabalho biológico, nenhum trabalho físico ocorrerá se os pesos não estiverem movendo-se. Ocorre muita química quando seu corpo fornece energia para seus músculos e você pode sentir uma pressão, mas se não mover nada, não fará trabalho em termos físicos.

Movimento é uma exigência do trabalho. Por exemplo, digamos que você esteja empurrando um lingote de ouro enorme para casa depois de explorar uma caverna no final da rua, como mostrado na Figura 8-1. Quanto trabalho você tem que fazer para chegar em casa? Primeiro, precisa descobrir quanta força requer para empurrar o lingote.

Figura 8-1:
Empurrar requer muito trabalho em termos físicos quando o objeto está em movimento.



O coeficiente cinético do atrito (ver Capítulo 6), μ_k , entre o lingote e o solo é de 0,25 e o lingote tem uma massa de 1.000 kg. Qual é a força que você tem que exercer para manter o lingote movendo-se sem acelerá-lo? Comece com esta equação do Capítulo 6:

$$F_F = \mu_k F_N$$

Supondo que a estrada é plana, a grandeza da força normal, F_N , é apenas mg (massa vezes gravidade). Isso significa que

$$F_F = \mu_k F_N = \mu_k mg$$

onde m é a massa do lingote e g é a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra. Ligar os números fornecerá

$$F_F = \mu_k F_N = \mu_k mg = (0,25)(1.000\text{kg})(9,8 \text{ metros por segundo}^2) = 2.450\text{N}$$

Você tem que aplicar uma força de 2,450 Newtons para manter o lingote movendo-se sem acelerar. Digamos que sua casa esteja a 3 quilômetros de distância ou 3.000 metros. Para levar o lingote para casa, você tem que fazer este esforço:

$$W = Fs \cos \theta$$

Como você está empurrando o lingote, o ângulo entre F e s é 0° e o $\cos \theta = 1$, portanto, ligar os números fornecerá

$$W = Fs \cos \theta = (2,450)(3.000)(1) = 7,35 \times 10^6\text{J}$$



Você precisa fazer $7,35 \times 10^6\text{J}$ de trabalho para mover seu lingote para casa. Alguma perspectiva? Bem, para empurrar 1 quilograma por 1 metro, você tem que fornecer uma força de 9,8N (cerca de 2,2 libras) nessa distância, que requer 9,8J de trabalho. Para levar seu lingote para casa, precisará de 750.000 vezes isso. Vendo de outra maneira, 1 quilocaloria é igual a 4.186J. Uma quilocaloria é comumente chamada de Caloria (C maiúsculo) em nutrição, que você vê nos rótulos de uma barra de chocolate. Portanto, para mover o lingote para casa, você precisa gastar cerca de 1.755 calorias. É hora de fugir das barras energéticas!

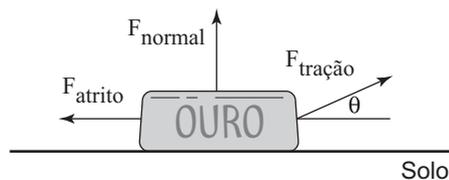
Você também pode fazer esta conversão em termos de quilowatts-hora, que pode ser familiar nas contas de luz. Um quilowatt-hora (kWh) = $3,6 \times 10^6\text{J}$, portanto, você precisa de cerca de 2,0 quilowatts-hora de trabalho para levar o lingote para casa.

Arrastando

Se você tiver uma personalidade do contra, poderá preferir arrastar os objetos ao invés de empurrá-los. Pode ser mais fácil arrastar os objetos pesados, especialmente se você puder usar um cabo de reboque, como mostrado na Figura 8-2. Quando você está empurrando em um ângulo θ , não está aplicando uma força na mesma direção da direção do movimento. Para encontrar o trabalho neste caso, tudo que tem que fazer é encontrar o componente da força na direção do percurso. O trabalho, devidamente definido, é a força na direção do percurso multiplicada pela distância percorrida:

$$W = F_{\text{tração}} s \cos \theta$$

Figura 8-2: Arrastar um objeto requer mais força devido ao ângulo.



Suponha que o ângulo no qual você está puxando seja pequeno, portanto, não está levantando o lingote (que diminuiria a força normal e, portanto, o atrito). Você precisa de uma força de 2.450N na direção do percurso para manter o objeto em movimento (veja a seção anterior para ter um cálculo), significando que você tem que fornecer uma força de

$$F_{\text{tração}} \cos \theta = 2.450\text{N}$$

Portanto,

$$F_{\text{tração}} = 2.450\text{N} / \cos \theta$$

Se $\theta = 10^\circ$, você terá que fornecer uma força de

$$F_{\text{tração}} = 2.450\text{N} / \cos 10^\circ = 2,490\text{N}$$

Como apenas o trabalho na direção do percurso conta e como você está realmente empurrando o cabo de reboque em um ângulo de 10° , precisa fornecer mais força para ter a mesma quantidade de trabalho realizado, supondo que o objeto percorre o mesmo caminho até sua casa, como o lingote na Figura 8-1.

Considerando o Trabalho Negativo

Você acabou de sair e comprou a maior televisão que sua casa pode ter. Finalmente, chega em casa com a TV e tem que subir os degraus. É pesada — cerca de 100 kg ou 220 libras — e quando você sobe o

primeiro degrau — uma distância com cerca de meio metro — pensa se deveria ter pedido ajuda por causa da quantidade de trabalho que está realizando (**Nota:** F é igual à massa vezes a aceleração ou 100 vezes g , a aceleração devido à gravidade; e θ é 0° porque você está subindo, na direção na qual a TV está movendo-se):

$$W_1 = Fs \cos \theta = (100)(9,8)(\frac{1}{2})(1,0) = 490J$$

Contudo, quando você coloca a TV no topo do degrau, suas costas decidem que você está carregando peso demais e avisa-lhe para soltar. Lentamente, você a deixa cair até a posição original e descansa. Quanto trabalho você fez na descida? Acredite se quiser, você fez um trabalho *negativo* na TV, pois a força aplicada (para cima) estava na direção oposta do percurso (para baixo). Neste caso, $\theta = 180^\circ$ e $\cos \theta = -1$. É isto que você tem quando resolve o trabalho:

$$W_2 = Fs \cos \theta = (100)(9,8)(\frac{1}{2})(-1) = -490J$$

O trabalho resultante é $W = W_1 + W_2 = 0$ ou trabalho zero. Isso faz sentido, pois a TV está de volta ao início.



Se a força que move o objeto tiver um componente na mesma direção do movimento, o trabalho que a força faz no objeto será positivo. Se a força que move o objeto tiver um componente na direção oposta do movimento, o trabalho feito no objeto será negativo.

Acertando as Contas: Energia Cinética

Quando você começa a empurrar ou puxar um objeto com uma força constante, ele começará a se mover se a força exercida for maior que as forças resultantes que resistem a você (como, por exemplo, atrito e gravidade). E se o objeto começar a se mover em alguma velocidade, irá adquirir *energia cinética*. A energia cinética é a energia que um objeto tem por causa de seu movimento e é capaz de realizar um trabalho.

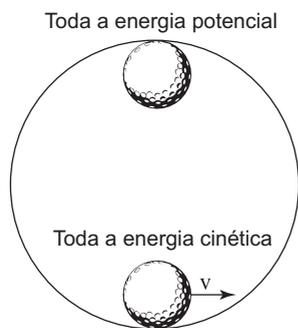
Por exemplo, digamos que você chegue a um buraco particularmente difícil do golfe em miniatura, onde tem que acertar a bola através de um gancho. A bola de golfe entra no loop com determinada velocidade; em termos físicos, com certa quantidade de energia cinética. Suponha que quando ela chega ao topo do círculo, ela para. Isso significa que não tem mais nenhuma energia cinética. Contudo, agora que está no topo do círculo, fica mais alta que antes e quando cair de volta — supondo que fique no caminho e não haja atrito — terá a mesma velocidade ao chegar na parte inferior do círculo que tinha ao entrar pela primeira vez nele.

Se a bola de golfe tem 20J de energia cinética na parte inferior do círculo, a energia é devido ao seu movimento. No topo, ela não tinha movimento, portanto, não tinha energia cinética. Porém, foi preciso algum trabalho para levar a bola de golfe para o topo e esse trabalho foi de 20J. Assim, a bola de golfe em repouso tem 20J, que é a *energia potencial*. A bola de golfe tem energia potencial porque, se cair, esses 20J de energia estarão disponíveis; se ela cair e ficar no caminho, esses 20J de energia potencial, que ela tinha por causa de sua altura, irão tornar-se 20J de energia cinética novamente. (Para saber mais sobre a energia potencial, veja a seção “Energia no declive: Energia potencial” posteriormente neste capítulo.)

Na parte inferior do círculo, a bola de golfe tem 20J de energia cinética e está movendo-se; no topo ela tem 20J de energia potencial e não está movendo-se; e quando volta para baixo, tem 20J de energia cinética de novo, como mostrado na Figura 8-3. A energia total da bola de golfe fica igual — 20J na parte inferior, 20J no topo. A energia tem formas diferentes — cinética quando está movendo-se e potencial quando não está movendo-se, mas é mais alta — porém, é igual. Na verdade, a energia da bola de golfe é igual em qualquer ponto no círculo e os físicos que mediram esse tipo de fenômeno chamam-no de princípio da *conservação da energia mecânica*. Analiso isso posteriormente neste capítulo na seção “Para cima, para baixo e por todo lado: a conservação da energia mecânica”, portanto, fique ligado.

Figura 8-3:

Um objeto circulando, sem atrito, tem a mesma energia do começo ao fim; ela apenas assume formas diferentes.



Para onde vai a energia cinética quando o atrito está envolvido? Se um bloco está deslizando em uma superfície horizontal e há atrito, o bloco vai cada vez mais lentamente até parar. A energia cinética acaba e você não vê nenhum aumento na energia potencial. O que aconteceu? A energia cinética do bloco dissipou-se como calor. O atrito aqueceu o bloco e a superfície.

Você sabe os prós e os contras da energia cinética. Portanto, como é calculada?

Dividindo a equação da energia cinética

O trabalho que você coloca ao acelerar um objeto — ou seja, em seu movimento — transforma-se em energia cinética, E_c . A equação para encontrar a E_c é

$$E_c = \frac{1}{2} m v_f^2$$

Dada uma massa m indo com uma rapidez v , você pode calcular a energia cinética do objeto. Digamos, por exemplo, que você aplique uma força em um aeromodelo para que ele voe e que o avião esteja acelerando. Eis a equação para a força:

$$F = ma$$

Você sabe que a força é igual a massa vezes a aceleração e sabe, a partir das seções anteriores neste capítulo, que o trabalho feito no avião, que se torna sua energia cinética, é igual ao seguinte:

$$W = Fs \cos \theta$$

Suponha que você esteja empurrando na mesma direção na qual o avião está indo; neste caso, $\cos \theta = 1$ e você acha que

$$W = Fs = mas$$

Você pode ligar esta equação às velocidades final e inicial do objeto (veja o Capítulo 3 para obter essa equação) para encontrar a :

$$v_f^2 - v_o^2 = 2as$$

onde v_f é igual à velocidade final e v_o é igual à velocidade inicial. Em outras palavras,

$$a = (v_f^2 - v_o^2) / 2s$$

Ligando a na equação para o trabalho, $W = mas$, você obterá:

$$W = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_o^2)$$

Se a velocidade inicial for zero, você obterá

$$W = \frac{1}{2} m v_f^2$$

Este é o trabalho que você coloca na aceleração do aeromodelo, ou seja, no movimento do avião, e esse trabalho torna-se a energia cinética do avião, E_c :

$$E_c = \frac{1}{2} m v_f^2$$

Colocando a equação da energia cinética em uso

Normalmente, você usa a equação da energia cinética para encontrar a energia cinética de um objeto quando sabe sua massa e velocidade. Digamos, por exemplo, que você esteja em uma área de tiros e dispare um projétil de 10 gramas com uma velocidade de 600 metros por segundo em um alvo. Qual é a energia cinética da bala? A equação para encontrar a energia cinética é

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Tudo que você tem que fazer é ligar os números, lembrando-se de converter de gramas para quilogramas primeiro para manter o sistema de unidades consistente na equação:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} (0,01)(600^2) = 1.800J$$

O projétil tem 1.800 Joules de energia, que é muito Joule em uma bala de 10 gramas. Contudo, você também poderá usar a equação da energia cinética se souber quanto trabalho entra na aceleração de um objeto e quiser encontrar, digamos, sua velocidade final. Por exemplo, digamos que você esteja em uma estação espacial e tem um grande contrato com a NASA para colocar satélites em órbita. Você abre as portas da estação e pega seu primeiro satélite, que tem uma massa de 1.000 kg. Com um esforço tremendo, coloca-o em órbita, usando uma força de 2.000N aplicada na direção do movimento, a mais de 1 metro. Qual velocidade o satélite atingirá em relação à estação espacial? O trabalho que você faz é igual a

$$W = Fs \cos \theta$$

Como $\theta = 0^\circ$ aqui (você está empurrando o satélite em linha reta), $W = Fs$:

$$W = Fs = (2.000)(1,0) = 2.000J$$

Seu trabalho entra na energia cinética do satélite, portanto

$$W = Fs = (2.000)(1,0) = 2.000J = \frac{1}{2} mv^2$$

A partir daqui, você pode descobrir a rapidez colocando v em um lado, pois m é igual a 1.000 kg e W é igual a 2.000 Joules:

$$v = \sqrt{\frac{(2)(2.000)}{1.000}} = 2 \text{ metros por segundo}$$

O satélite termina com uma velocidade de 2 metros por segundo em relação a você, o suficiente para tirá-lo da estação espacial e colocá-lo em sua própria órbita.



Lembre-se de que as forças também podem fazer um trabalho negativo. Se você quiser pegar um satélite e reduzir sua velocidade para 1 metro por segundo em relação a você, a força aplicada no satélite estará na direção oposta de seu movimento. Isso significa que ele perde energia cinética, assim, você fez um trabalho negativo nele.

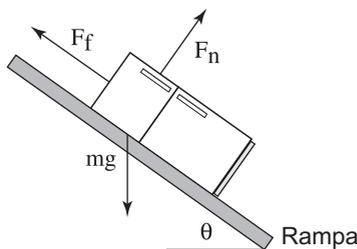
Você só tem que se preocupar com uma força neste exemplo: a força aplicada no satélite quando o lança. Mas na vida diária, diversas forças atuam em um objeto e você tem que levá-las em conta.

Calculando a energia cinética utilizando a força resultante

Se você quiser encontrar o trabalho total em um objeto e converter isso em sua energia cinética, terá que considerar apenas o trabalho feito pela força resultante. Em outras palavras, você converterá apenas a força resultante na energia cinética. Outras forças podem estar atuando, mas as forças opostas, tais como, uma força normal e a força da gravidade (ver Capítulo 6), cancelam-se. Por exemplo, quando você brinca de cabo de guerra contra amigos igualmente fortes, você puxa a corda e nada acontece. Você não tem nenhum aumento resultante na energia cinética a partir das duas forças.

Por exemplo, veja a Figura 8-4. Você pode querer determinar a velocidade da geladeira de 100 kg na parte inferior da rampa, usando o fato de que o trabalho feito nela entra em sua energia cinética. Como você faz isso? Você começa determinando a força resultante na geladeira e, então, descobrindo quanto trabalho essa força faz. Converter esse trabalho de força resultante em energia cinética permitirá calcular qual será a velocidade da geladeira na parte inferior da rampa.

Figura 8-4:
Você encontra a força resultante, atuando em um objeto, para descobrir sua velocidade na parte inferior de uma rampa.



Qual é a força resultante atuando na geladeira? No Capítulo 6, você descobriu que o componente do peso da geladeira atuando na rampa é:

$$F_{g \text{ rampa}} = mg \cos (90^\circ - \theta) = mg \sin \theta$$

onde m é a massa da geladeira e g é a aceleração devido à gravidade. A força normal (ver Capítulo 6) é

$$F_N = mg \cos(\theta) = mg \cos \theta$$

que significa que a força cinética do atrito (ver Capítulo 6) é

$$F_f = \mu_k F_N = \mu_k mg \cos(\theta) = \mu_k mg \cos \theta$$

onde μ_k é o coeficiente do atrito cinético. A força resultante acelerando a geladeira rampa abaixo, $F_{\text{resultante}}$, portanto, é

$$F_{\text{resultante}} = F_g \text{ rampa} - F_f = mg \sin \theta - \mu_k mg \cos \theta$$

Você está quase lá! Se a rampa estiver em um ângulo de 30° , em relação ao solo, e tiver um coeficiente de atrito cinético de 0,15, ligar os números nessa equação resultará no seguinte:

$$F_{\text{resultante}} = (100)(9,8)(\sin 30^\circ) - (0,15)(100)(9,8)(\cos 30^\circ) = 490\text{N} - 127\text{N} = 363\text{N}$$

A força resultante atuando na geladeira é de 363N. Essa força resultante atua na rampa inteira de 3,0 metros, portanto, o trabalho feito por essa força é

$$W = F_{\text{resultante}} s = (363)(3,0) = 1.089\text{J}$$

Você descobre que 1.089J entra na energia cinética da geladeira. Isso significa que você pode encontrar a energia cinética da geladeira assim:

$$W = 1.089\text{J} = E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Você quer a velocidade, portanto, determinar v fornecerá

$$v = \sqrt{\frac{(2)(1089)}{100}} = 4,67 \text{ metros por segundo}$$

A geladeira, então, adquiriu uma velocidade de 4,67 metros por segundo na parte inferior da rampa.

Energia no Declive: Energia Potencial

Há mais no movimento do que a energia cinética — um objeto também pode ter *energia potencial*, que é a energia que ele tem por causa de sua posição ou energia armazenada. A energia é chamada de potencial, porque pode ser convertida de volta em cinética ou outras formas de energia, a qualquer momento.

Digamos, por exemplo, que você tenha o trabalho de levar seu priminho Jackie para o parque e coloca o garotinho no escorrega. Jackie começa em repouso e, então, acelera, terminando com um

pouco de velocidade na parte inferior do escorrega. Você sente a Física funcionando aqui. Pegando sua prancheta, você coloca Jackie mais no alto do escorrega e solta, observando com cuidado. Com muita certeza, Jackie acaba indo mais rapidamente na parte inferior do escorrega. Você decide colocar Jackie ainda mais no alto. De repente, a mãe de Jackie aparece e pega-o. Chega de Física por um dia.

O que estava acontecendo no escorrega? De onde veio a energia cinética de Jackie? Ela veio do trabalho que você faz levantando Jackie contra a força da gravidade. Jackie fica em repouso na parte inferior do escorrega, portanto, ele não tem nenhuma energia cinética. Se você levantá-lo para o topo do escorrega e segurá-lo, ele irá esperar pela nova viagem no escorrega, portanto, não tem nenhum movimento e nenhuma energia cinética. Contudo, você fez o trabalho de levantá-lo contra a força da gravidade, assim, ele tem energia potencial. Quando Jackie desce no escorrega (sem atrito), a gravidade transforma seu trabalho, a energia potencial, em energia cinética.

Trabalhando contra a gravidade

Quanto trabalho você faz quando levanta um objeto contra a força da gravidade? Digamos, por exemplo, que você queira armazenar uma bala de canhão em uma prateleira superior, em uma altura h acima de onde a bala está agora. O trabalho para fazer isto é

$$W = Fs \cos \theta$$

Neste caso, F é igual à força, s é igual à distância e θ é o ângulo entre eles. A força em um objeto é mg (massa vezes aceleração devido à gravidade, 9,8 metros por segundo²) e quando você eleva a bala de canhão diretamente para cima, $\theta = 0^\circ$, portanto

$$W = Fs \cos \theta = mgh$$

A variável h é a distância na qual você eleva a bala de canhão. Para elevar a bala, você tem que fazer certa quantidade de trabalho ou m vezes g vezes h . A bala de canhão está parada quando você coloca-a na prateleira, portanto, não tem energia cinética. Contudo, ela tem energia potencial, que é o trabalho colocado para elevá-la à sua posição atual.

Se a bala de canhão rolasse para a borda da prateleira e caísse, quanta energia cinética ela teria pouco antes de atingir o solo (que é onde iniciou quando você a elevou pela primeira vez)? Ela teria mgh joules de energia cinética nesse ponto. A energia potencial da bala, que veio do trabalho colocado para elevá-la, converte-se em energia cinética graças à queda.



Em geral, é possível dizer que se você tiver um objeto de massa m perto da superfície da Terra, onde a aceleração devido à gravidade é g , em uma altura h , a energia potencial dessa massa, comparada se estivesse na altura 0, será

$$PE = mgh$$

E se você mover um objeto na vertical contra a força da gravidade da altura h_0 para a altura h_f , a diferença de energia potencial será

$$\Delta E_p = mg(h_f - h_0)$$

O trabalho executado no objeto muda sua energia potencial.

Convertendo energia potencial em energia cinética

Os objetos podem ter tipos diferentes de energia potencial — tudo que você precisa fazer é realizar o trabalho em um objeto contra uma força, como, por exemplo, quando um objeto está conectado a uma mola e você empurra a mola de volta. Porém, a gravidade é uma fonte muito comum de energia potencial em problemas de Física. A energia potencial gravitacional para uma massa m na altura h , perto da superfície da Terra, é mgh mais do que seria na altura 0. (Cabe a você escolher a altura 0.)

Por exemplo, digamos que você eleve uma bala de canhão de 40 kg em uma prateleira a 3,0 metros a partir do chão e a bola role e deslize, em direção a seus pés. Se você souber a energia potencial envolvida, poderá descobrir a velocidade com a qual a bola irá atingir a ponta de seus pés. Em repouso na prateleira, a bala tem grande parte dessa energia potencial em relação ao chão:

$$E_p = mgh = (40 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)(3,0 \text{ metros}) = 1.176 \text{ J}$$

A bala de canhão tem 1.176 Joules de energia potencial armazenada em virtude de sua posição em um campo gravitacional. O que acontece quando ela cai, um pouco antes de tocar seus dedos? Essa energia potencial é convertida em energia cinética. Portanto, que velocidade a bala terá no impacto com os dedos? Como sua energia potencial é convertida em energia cinética, você pode escrever o problema assim (veja a seção “Acertando as contas: energia cinética”, anteriormente neste capítulo, para ter uma explicação da equação da energia cinética):

$$E_p = mgh = (40)(9,8)(3,0) = 1.176 \text{ J} = E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Ligando os números e colocando a velocidade em um lado, você obterá a rapidez:

$$v = \sqrt{\frac{(2)(1.176)}{40}} = 7,67 \text{ m/s}$$

A velocidade 7,67 metros por segundo converte-se em cerca de 25 pés por segundo. Você tem uma bala de canhão de 40 kg — ou cerca de 88 libras — caindo em seus pés a 25 pés por segundo. Você lida com os números e decide que não gosta dos resultados. Com prudência, desliga sua calculadora e tira seus pés do caminho.

Escolha seu Caminho: Forças Conservativas versus Não Conservativas



O trabalho que uma *força conservativa* faz em um objeto é independente do trajeto; o trajeto real feito pelo objeto não faz diferença. Cinquenta metros para cima no ar tem a mesma energia potencial gravitacional se você chegar lá subindo degraus ou por meio de uma roda gigante. Isso é diferente da força do atrito, por exemplo, que dissipa a energia cinética como calor. Quando o atrito está envolvido, o trajeto importa — um trajeto mais longo dissipará mais energia cinética do que um curto. Por isso, o atrito não é uma força conservativa; é uma força *não conservativa*.

Por exemplo, você e alguns amigos chegam ao Monte Newton, um pico majestoso que se eleva a h metros no ar. Você pode pegar dois trajetos para subir, o rápido ou a rota pitoresca. Seus amigos pegam a rota rápida e você, a pitoresca, reservando um tempo para fazer um piquenique e resolver alguns problemas de Física. Eles cumprimentam você no topo dizendo: “Adivinhe? Nossa energia potencial comparada com a anterior é maior que mgh ”.

“A minha também”, você diz, examinando a vista. Note esta equação (originalmente apresentada na seção “Trabalhando contra a gravidade”, anteriormente neste capítulo):

$$\Delta E_p = mg(h_f - h_o)$$

Essa equação afirma basicamente que o trajeto para se deslocar na vertical de h_o até h_f não importa. Tudo o que importa é sua altura inicial comparada com sua altura final. Como o trajeto adotado pelo objeto contra a gravidade não importa, a gravidade é uma força conservativa.

Eis outro modo de ver as forças conservativas e não conservativas. Digamos que você esteja de férias nos Alpes e que seu hotel esteja no topo do Monte Newton. Você passa um dia inteiro dirigindo — de um lago na base do Monte, até o topo do pico mais alto. No final do dia, você acaba no mesmo local: seu hotel no topo do Monte Newton.

Qual é a mudança em sua energia potencial gravitacional? Em outras palavras, quanto trabalho resultante a gravidade realizou em você durante o dia? Como a gravidade é uma força conservativa, a mudança em sua energia potencial gravitacional é 0. Como você não experimentou nenhuma mudança resultante em sua energia potencial gravitacional, a gravidade não fez nenhum trabalho resultante em você durante o dia.



A estrada exerceu uma força normal em seu carro quando você dirigia (ver Capítulo 6), mas essa força era sempre perpendicular à estrada, portanto, não fez nenhum trabalho.

As forças conservativas são mais fáceis de trabalhar na Física porque não “deixam escapar” a energia quando você se move em uma trajetória — se você acabar no mesmo lugar, terá a mesma quantidade de energia. Se tiver que lidar com forças, como, por exemplo, atrito, inclusive o atrito do ar, a situação será diferente. Se estiver arrastando algo em um campo coberto por lixa, por exemplo, a força do atrito fará quantidades diferentes de trabalho em você, dependendo do seu trajeto. Um caminho que é duas vezes mais longo envolverá duas vezes o trabalho para superar o atrito. O trabalho feito depende do caminho tomado, sendo por isso que o atrito é uma força não conservativa.



Permita-me qualificar a ideia de que atrito é uma força não conservativa. O que realmente não está sendo conservado em uma trajetória com atrito é a energia potencial e a cinética total, que juntas correspondem à *energia mecânica*. Quando o atrito está envolvido, a perda na energia mecânica entra na energia térmica. De certo modo, você poderia dizer que a quantidade total de energia não mudará se você incluir essa energia térmica. Contudo, a energia térmica dissipa-se no ambiente rapidamente, assim, não é recuperável ou conversível. Por essa e outras razões, geralmente a Física trabalha em termos de energia mecânica.

Para Cima, para Baixo e por Todo Lado: A Conservação da Energia Mecânica

A *energia mecânica* é a soma da energia potencial e da cinética, ou da energia adquirida por um objeto sobre o qual o trabalho é feito. A *conservação da energia mecânica*, que ocorre na ausência de forças não conservativas, torna sua vida muito mais fácil ao resolver os problemas da Física. Digamos, por exemplo, que você veja uma montanha-russa em dois pontos diferentes em uma pista — ponto 1 e ponto 2 — de modo que a montanha-russa esteja em duas alturas diferentes e duas velocidades diversas nesses pontos. Como a energia mecânica é a soma das energias potencial ($\text{massa} \times \text{gravidade} \times \text{altura}$) e cinética ($\frac{1}{2}[\text{massa} \times \text{velocidade}^2]$), no ponto 1, a energia mecânica total é

$$W_1 = mgh_1 + \frac{1}{2} mv_1^2$$

No ponto 2, a energia mecânica total é

$$W_2 = mgh_2 + \frac{1}{2} mv_2^2$$

Qual é a diferença entre W_2 e W_1 ? Se o atrito estiver presente, por exemplo, ou qualquer outra força conservativa, a diferença será igual ao trabalho resultante que as forças não conservativas fazem, W_{nc} (veja a seção anterior para ter uma explicação do trabalho resultante):

$$W_2 - W_1 = W_{nc}$$

Por outro lado, se as forças não conservativas não realizarem nenhum trabalho resultante, $W_{nc} = 0$, significando que

$$W_2 = W_1$$

ou

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

Estas equações representam o *princípio da conservação da energia mecânica*. O princípio diz que se o trabalho resultante feito pelas forças não conservativas for zero, a energia mecânica total de um objeto será conservada; ou seja, não muda.



Outro modo de gravar o princípio da conservação da energia mecânica é que no ponto 1 e no ponto 2,

$$E_{p1} + E_{c1} = E_{p2} + E_{c2}$$

Você pode simplificar isso assim:

$$E_1 = E_2$$

onde E é a energia mecânica total em qualquer ponto. Em outras palavras, um objeto sempre tem a mesma quantidade de energia, desde que o trabalho resultante feito pelas forças não conservativas seja zero.



Note que você pode cancelar a massa, m , na equação anterior, que significa que, se você souber três valores, poderá determinar o quarto:

$$gh_1 + \frac{1}{2}v_1^2 = gh_2 + \frac{1}{2}v_2^2$$

Dividir a equação para a energia mecânica permitirá determinar as variáveis individuais, tais como, velocidade e altura.

Determinando a velocidade final com a energia mecânica

“Trabalhar como piloto de teste de montanha-russa é bem estranho”, você diz, quando se prende à nova montanha-russa Bullet Blaster III do Parque de Física. “Mas alguém tem que fazer isso”. A tripulação fecha a porta e você desce a pista de 400 metros, totalmente sem atrito. Porém, na metade do caminho, o velocímetro para. Como você pode registrar sua velocidade máxima quando chega à parte inferior? Tudo bem; tudo que precisa é do princípio de conservação da energia mecânica, que diz que se o trabalho resultante feito pelas forças não conservativas for zero, a energia mecânica total de um objeto será conservada. A partir da seção anterior, você sabe que

$$mgh_1 + \frac{1}{2} mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2} mv_2^2$$

Você pode tornar essa equação um pouco mais fácil. Sua velocidade inicial é 0, sua altura final é 0 e você pode dividir os dois lados por m , portanto, obtém

$$gh_1 = \frac{1}{2} v_2^2$$

Muito melhor. Determinar v_2 fornecerá

$$\sqrt{(9,8)(400)(2)} = 89 \text{ m/s}$$

A montanha-russa viaja a 89 metros por segundo ou cerca de 198 mph, na parte inferior da pista. Deve ser bem rápido para a maioria das crianças.

Determinando a altura final com a energia mecânica

Além de determinar variáveis como, por exemplo, a rapidez final com o princípio da conservação da energia mecânica, você poderá determinar a altura final se quiser. Neste exato momento, por exemplo, Tarzan está balançando em uma trepadeira sobre um rio infestado de crocodilos a uma velocidade de 13,0 m/s. Ele precisa alcançar a margem oposta do rio a 9,0 metros acima de sua posição atual para ficar seguro. Ele consegue? O princípio da conservação da energia mecânica fornece a resposta:

$$mgh_1 + \frac{1}{2} mv_1^2 = mgh_2 + \frac{1}{2} mv_2^2$$

Na altura máxima de Tarzan no final do movimento, sua velocidade, v_2 , será 0 e supondo que $h_1 = 0$, você pode relacionar h_2 a v_1 assim:

$$\frac{1}{2} v_1^2 = gh_2$$

Isto significa que:

$$h_2 = v_1^2 / 2g = 13,0^2 / [(2)(9,8)] = 8,6 \text{ metros}$$

Tarzan irá a 0,4 metros a menos que os 9,0 metros necessários para estar seguro, portanto, precisa de ajuda.

Aumentando a Potência: A razão de Fazer o Trabalho

Algumas vezes, não é apenas a quantidade de trabalho que você faz, mas a velocidade na qual faz que é importante e a razão é refletida na força. O conceito da força dá uma ideia de quanto trabalho você pode esperar em certa quantidade de tempo. A *potência* em Física é a quantidade de trabalho realizado dividido pelo tempo que leva ou a *razão*. A equação fica assim:

$$P = W / t$$

Suponha que você tenha duas lanchas, por exemplo, e deseja saber qual a levará a 120 mph mais rapidamente. Ignorando detalhes bobos, como, por exemplo, atrito, será necessária a mesma quantidade de trabalho para que tenha essa velocidade, mas quanto tempo levará? Se a lancha levar três semanas para que você tenha 120, poderá não ser aquela que você levará para as corridas. Em outras palavras, a quantidade de trabalho realizado em certa quantidade de tempo pode fazer uma enorme diferença.

Se o trabalho feito em qualquer instante varia, isso representa a força média no tempo inteiro t . Uma quantidade média em Física geralmente é escrita com uma barra sobre ela, que representa a potência média:

$$\bar{P} = W / t$$

Porém, antes de você entrar em sua viagem de potência, ajudará saber com quais unidades está lidando e as várias maneiras de obter sua resposta.

Unidades comuns da potência

A potência é o trabalho dividido pelo tempo, portanto, a força tem unidades Joules por segundo, que são chamadas de *watt* — um termo familiar para praticamente qualquer pessoa que usa qualquer coisa elétrica. Você abrevia um watt simplesmente com o W , portanto, uma lâmpada de 100 watts usa 100 W de potência.



Às vezes, você encontra conflitos nos símbolos da Física, como, por exemplo, W para watts e W para trabalho. Contudo, esse conflito não é grave, pois um símbolo é para as unidades (watts) e outro é para um conceito (trabalho). A letra maiúscula é padrão, portanto, preste atenção às unidades *versus* conceitos.



Note, também, que como o trabalho é uma quantidade escalar (ver Capítulo 4) — como é o tempo — a potência é um escalar também. As outras unidades de potência incluem pé-libra por segundo (pé-lbs/s) e cavalo-vapor (hp). Um hp = 550 pé-lbs/s = 745,7 W.

Digamos, por exemplo, que você esteja em um trenó puxado por cavalos a caminho da casa de sua avó. Em um ponto, o cavalo acelera o trenó, de 500 kg, de 1 metro por segundo para 2 metros por segundo em 2,0 segundos. Quanta potência requer o movimento? Supondo que não há atrito na neve, o trabalho total realizado é

$$W = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2$$

Ligar os números fornecerá

$$W = \frac{1}{2} mv_2^2 - \frac{1}{2} mv_1^2 = \frac{1}{2} (500)(2^2) - \frac{1}{2} (500)(1^2) = 1.000 - 250 = 750J$$

Como o cavalo faz esse trabalho em 2 segundos, a potência necessária é

$$P = 750J / 2,0 \text{ segundos} = 375 \text{ watts}$$

Um cavalo-valor = 745.7 watts, portanto, o cavalo se move em cerca de meio cavalo-valor — nada mal para um trenó com um cavalo.

Cálculos alternativos da potência

Como o trabalho é igual à força vezes a distância, você pode escrever a equação para força da seguinte maneira, supondo que a força atua na direção da viagem:

$$P = W / t = Fs / t$$

onde s é a distância percorrida. Contudo, a velocidade do objeto, v , é apenas s dividido por t , portanto, a equação divide-se em

$$P = W / t = Fs / t = Fv$$

É um resultado interessante — potência igual a força vezes a velocidade? Sim, é isso que quer dizer. Contudo, como geralmente você tem que contar com a aceleração quando aplica uma força, geralmente escreve a equação em termos de força média e velocidade média:

$$\bar{P} = F\bar{v}$$

Capítulo 9

Colocando Objetos em Movimento: Quantidade de Movimento e Impulso

Neste Capítulo

- ▶ Verificando seu impulso
- ▶ Conhecendo a quantidade de movimento
- ▶ Entrelaçando impulso e quantidade de movimento
- ▶ Utilizando a conversação da quantidade de movimento
- ▶ Examinando diferentes tipos de colisões

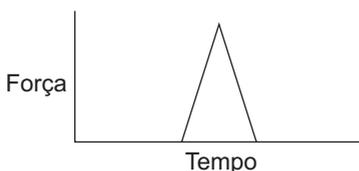
Este capítulo é sobre os tópicos que você precisa saber para todas as suas viagens: quantidade de movimento e impulso. Os dois tópicos são muito importantes para a *cinemática* ou o estudo dos objetos em movimento. Depois de você ter esses tópicos na manga, poderá começar a falar sobre o que acontece quando os objetos colidem e se chocam (felizmente, não seu carro ou bicicleta). Algumas vezes, eles saltam (como quando você bate em uma bola de tênis com uma raquete) e outras vezes eles ficam juntos (como um dardo atingindo o alvo), mas com o conhecimento do impulso e da quantidade de movimento obtidos neste capítulo, você poderá lidar com qualquer um dos casos.

Vendo o Impacto do Impulso

Em termos da Física, o *impulso* informa o quanto a quantidade de movimento de um objeto mudará quando uma força for aplicada por um determinado tempo (veja a seção seguinte para ter uma análise sobre a quantidade de movimento). Digamos, por exemplo, que você esteja jogando bilhar. Instintivamente, sabe o quão forte deve bater em cada bola para obter os resultados desejados. A bola 9 no canto? Tudo bem – você a acerta e lá vai ela. A bola 3 batendo na lateral no outro canto? Outra batida, desta vez um pouco mais forte.

Essas batidas são chamadas de *impulsos*. Veja o que acontece em uma escala microscópica, milissegundo por milissegundos, quando você bate em uma bola de bilhar. A força aplicada com seu taco aparece na Figura 9-1 – a ponta de cada taco tem uma almofada, portanto, o impacto do taco é espalhado em alguns milissegundos. O impacto dura desde o momento quando o taco toca a bola, t_o , até o momento em que a bola perde contato com o taco, t_f . Como você pode ver na Figura 9-1, a força exercida na bola muda durante esse tempo; na verdade, muda muito e se você precisasse determinar a força em qualquer milissegundo, seria difícil descobrir sem um equipamento especial.

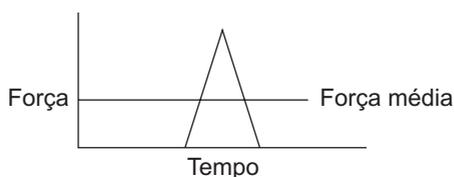
Figura 9-1:
Examinar força versus tempo fornecerá o impulso aplicado nos objetos.



Como a bola de bilhar não vem com nenhum equipamento especial, você tem que fazer o que os físicos normalmente fazem, em termos de força média sobre o tempo: $\Delta t = t_f - t_o$. Você pode ver como é essa força média na Figura 9-2. Falando como um físico, você diz que o impulso – ou a batida – fornecido pelo taco de bilhar é a força média multiplicada pelo tempo no qual você aplica a força, $\Delta t = t_f - t_o$. Esta é a equação para o impulso:

$$\text{Impulso} = \bar{F} \Delta t$$

Figura 9-2:
A força média depende da quantidade de tempo na qual você aplica a força.



Note que esta é uma equação vetorial, significando que ela lida com direção e grandeza (ver Capítulo 4). Impulso é um vetor e está na mesma direção da força média (ela própria pode ser uma soma vetorial resultante de outras forças).



Você obtém o impulso multiplicando Newtons por segundos, portanto, as unidades do impulso são Newton-segundos no sistema metro-quilograma-segundo (MKS) (ver Capítulo 2), dina-segundos no sistema centímetro-grama-segundo (CGS) e libra-segundos no sistema libra-pé-segundo.

Reunindo a Quantidade de Movimento

Quando você aplica um impulso em um objeto, o impulso pode mudar seu movimento (veja a próxima seção para saber mais sobre impulso). O que isso significa? Significa que você afeta a quantidade de movimento do objeto. A quantidade de movimento é um conceito que a maioria das pessoas já ouviu falar – em termos físicos, a *quantidade de movimento* é proporcional à massa e à velocidade e para tornar seu trabalho fácil, os físicos a definem como o produto da massa vezes a velocidade. A cinética é um grande conceito da Física introdutória e em alguns tópicos avançados, tais como Física da partícula com alta energia, onde os componentes dos átomos têm altas velocidades. Quando colidem, geralmente você pode prever o que acontecerá com base em seu conhecimento de quantidade de movimento.

Mesmo que você não esteja familiarizado com a Física da quantidade de movimento, já está familiarizado com a ideia geral. Pegar um carro desgovernado descendo uma montanha íngreme é um problema por causa disto. Se um carro sem freios estiver correndo em sua direção a 40 mph, poderá não ser uma grande ideia tentar pará-lo simplesmente ficando em seu caminho e levantando sua mão, a menos que você seja o Super-homem. O carro tem muita quantidade de movimento e fazê-lo parar requer bastante esforço. O mesmo ocorre com um navio petroleiro que você precisa parar. Muito petróleo tem em seu reservatório e seus motores não são fortes o suficiente para fazê-los virar ou parar de uma hora para a outra. Portanto, podem ser necessárias 20 milhas ou mais para parar. Tudo por causa da quantidade de movimento do navio.

Por que na Física p significa quantidade de movimento?

Por que na Física p significa quantidade de movimento? Não parece adequado (não há nenhum “ p ” em “quantidade de movimento”). Nunca ouvi falar sobre nenhuma razão para isso e nenhum guru da Física para quem perguntei tem ideia também. O símbolo é algo com o qual as pessoas concordam, sem ter nenhuma

ideia do motivo. Provavelmente, a melhor razão é que todas as outras letras já tinham sido adotadas quando chegou a hora de representar a quantidade de movimento — você não pode usar m , por exemplo, porque m significa massa.



Quanto mais massa está movendo-se (pense no navio petroleiro), mais quantidade de movimento a massa tem. Quanto mais velocidade tem (pense no navio petroleiro mais rápido), mais quantidade de movimento tem. O símbolo para esta grandeza é p , portanto, você pode dizer que:

$$p = mv$$

A quantidade de movimento é uma quantidade vetorial, significando que tem uma grandeza e uma direção (ver Capítulo 4) e a grandeza está na mesma direção da velocidade – tudo que você tem que fazer para obter a cinética de um objeto é multiplicar sua massa por sua velocidade. Como você multiplica massa por velocidade, as unidades para a cinética são quilogramas-metros por segundo, kg-m/s, no sistema MKS e gramas-centímetros por segundo no sistema CGS.

Teorema do Impulso-Quantidade de Movimento: Relacionando Impulso e Cinética

Você pode conectar o impulso que fornece a um objeto – como bater em uma bola de bilhar com um taco – com a mudança da quantidade de movimento do objeto; tudo que precisa é de um pouco de álgebra e o processo que você explora nesta seção, chamado *teorema do impulso-quantidade de movimento*. O que torna a conexão fácil é que você pode trabalhar com as equações para o impulso e a quantidade de movimento (veja as duas seções a seguir) para simplificá-las, portanto, pode relacionar os dois tópicos. Quais equações a Física tem em seu arsenal que conectam os dois? Relacionar força e velocidade é um começo. Por exemplo, força é igual a massa vezes a aceleração (ver Capítulo 5) e a definição da aceleração média é

$$a = \Delta v / \Delta t = (v_f - v_o) / (t_f - t_o)$$

onde v significa velocidade e t significa tempo. Agora, você pode perceber que depois de multiplicar isso pela massa, obtém a força, que o leva para mais perto de trabalhar com o impulso:

$$F = ma = m(\Delta v / \Delta t) = m[(v_f - v_o) / (t_f - t_o)]$$

Agora, você tem força na equação. Para obter o impulso, multiplique essa força por Δt , o tempo sobre o qual você aplica a força:

$$F\Delta t = ma\Delta t = m(\Delta v / \Delta t)\Delta t = m\Delta v = m(v_f - v_o)$$

Veja o termo final, $m(v_f - v_o)$. Como a quantidade de movimento é igual a mv (veja a seção “Reunindo a quantidade de movimento” anteriormente neste capítulo), é apenas a diferença na quantidade de movimento inicial e na final do objeto: $p_f - p_o = \Delta p$. Portanto, você pode adicionar isso à equação:

$$F\Delta t = ma\Delta t = m\Delta v = m(v_f - v_o) = mv_f - mv_o = p_f - p_o = \Delta p$$

Agora, veja o termo no lado esquerdo, $F\Delta t$. É o impulso (veja a seção “Vendo o impacto do impulso” anteriormente neste capítulo) ou a força aplicada no objeto multiplicada pelo tempo no qual a força foi aplicada. Portanto, você pode escrever esta equação como

$$\text{Impulso} = F\Delta t = ma\Delta t = m\Delta v = m(v_f - v_o) = \Delta p$$

Livrando-se de tudo no meio, finalmente você terá

$$\text{Impulso} = \Delta p$$



Impulso é igual à mudança na quantidade de movimento. Na Física, este processo é chamado de teorema do impulso-quantidade de movimento. As duas seções a seguir fornecem alguns exemplos para que você possa praticar esta equação.

Mesa de bilhar: Encontrando o impulso e a quantidade de movimento

Com a equação $\text{Impulso} = \Delta p$ (veja a seção anterior), você pode relacionar o impulso com o qual acerta um objeto à mudança consequente na quantidade de movimento. Que tal ter o trabalho de atingir uma bola de bilhar na próxima vez? Você alinha a pontaria da qual o jogo depende. Descubra que a extremidade de seu taco estará em contato com a bola por 5 milissegundos (um milissegundo é um milésimo de segundo). Quanta quantidade de movimento a bola precisará para bater na lateral e acabar no canto?

Você avalia a bola com 200 gramas (ou 0,2 quilogramas). Depois de testar a lateral com um calibre, espectroscópio e pinças, eliminando qualquer chance de ter um encontro naquela noite, descobre que precisa dar à bola uma velocidade de 20,0 metros por segundo. Qual força média você terá que aplicar? Para encontrar a força média, você pode descobrir o impulso que tem que fornecer. Você pode relacionar esse impulso à variação da quantidade de movimento da bola assim:

$$\text{Impulso} = \Delta p = p_f - p_o$$

Então, qual é a variação da quantidade de movimento da bola? A velocidade necessária, 20,0 metros por segundo, é a grandeza da velocidade final da bola de bilhar. Supondo que a bola de bilhar inicia em repouso, a variação da quantidade de movimento da bola será

$$\Delta p = p_f - p_o = m(v_f - v_o)$$

Ligar os números fornecerá

$$\Delta p = p_f - p_o = m(v_f - v_o) = (0,2)(20 - 0) = 4,0 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

Você precisa de uma variação da quantidade de movimento de 4,0 kg-m/s, que também é o impulso necessário e como $\text{Impulso} = F\Delta t$ (veja a seção “Vendo o impacto do impulso”), esta equação irá tornar-se

$$F\Delta t = \Delta p = p_f - p_o = m(v_f - v_o) = (0,2)(20 - 0) = 4,0 \text{ kg-m/s}$$

Portanto, a força que você precisa aplicar acaba sendo

$$F = 4,0 \text{ kg-m/s} / \Delta t$$

Nesta equação, o tempo que sua bola branca está em contato com a bola é de 5 milissegundos ou $5,0 \times 10^{-3}$ segundos, portanto, ligar esse número fornecerá o resultado desejado:

$$F = 4,0 \text{ kg-m/s} / 5,0 \times 10^{-3} \text{ s} = 800\text{N}$$

Você tem que aplicar cerca de 800N (mais ou menos 180 libras) de força, que parece uma quantidade enorme. Porém, você a aplica em um tempo curto, $5,0 \times 10^{-3}$ segundos, que parece muito menos.

Cantando na chuva: Uma atividade impulsiva

Depois de uma noite triunfante no salão de bilhar, você decide sair e descobre que está chovendo. Você pega seu guarda-chuva em seu carro e o pluviômetro dele informa que 100 gramas de água estão batendo no guarda-chuva a cada segundo, como uma velocidade média de 10 metros por segundo. A pergunta é: se o guarda-chuva tiver uma massa total de 1,0 kg, qual força você precisará para mantê-lo reto na chuva?

Descobrir a força que geralmente você precisa para manter o peso do guarda-chuva não é um problema – você simplesmente descobre a massa vezes a aceleração devido à gravidade ou $(1,0 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2) = 9,8\text{N}$. Mas e a chuva caindo no guarda-chuva? Mesmo que você suponha que a água caia fora do guarda-chuva imediatamente, não pode simplesmente adicionar o peso da água, pois a chuva está caindo com uma velocidade de 10 metros por segundo; em outras palavras, a chuva tem *quantidade de movimento*. O que você pode fazer? Você sabe que está enfrentando 100 g de água ou 0,10 kg caindo no guarda-chuva a cada segundo em uma velocidade de 10 metros por segundo para baixo. Quando essa chuva atinge o guarda-chuva, a água fica em repouso, portanto, a variação da quantidade de movimento por segundo é

$$\Delta p = m\Delta v$$

Ligar os números fornecerá

$$\Delta p = m\Delta v = (0,1)(10) = 1,0 \text{ kg-m/s}$$

A variação da quantidade de movimento da chuva atingindo seu guarda-chuva a cada segundo é de 1,0 kg-m/s. Você pode relacionar isso à força com o teorema do impulso-quantidade de movimento, que informa

$$\text{Impulso} = F\Delta t = \Delta p$$

Dividir os dois lados por Δt para determinar a força (F) fornecerá

$$F = \Delta p / \Delta t$$

Você sabe que $\Delta p = 1,0 \text{ kg-m/s}$ em 1 segundo, portanto, ligar Δp e definir Δt para 1 segundo fornecerá

$$F = \Delta p / \Delta t = 1,0 \text{ kg-m/s} / 1,0 \text{ segundo} = 1,0 \text{ kg-m/s}^2 = 1.0\text{N}$$

Além dos 9,8N do peso do guarda-chuva, você também precisa de 1,0N para ficar de pé na chuva que cai quando ela bate no guarda-chuva, com um total de 10,8N ou cerca de 2,4 libras de força.



A parte confusa de encontrar a força é medir os pequenos tempos envolvidos nas colisões, tais como o taco de bilhar atingindo uma bola. Você pode remover o tempo, ou Δt , do processo para acabar com algo um pouco mais útil, que analisarei na seção seguinte.

Quando os Objetos Ficam Doidos: Conservando a Quantidade de Movimento

O *princípio da conservação da quantidade de movimento* estabelece que, quando você tem um sistema isolado sem forças externas, a quantidade de movimento total inicial dos objetos antes de uma colisão é igual a quantidade de movimento total final dos objetos depois da colisão ($p_i = p_o$). Isso é compreendido com um pouco de álgebra, sendo a informação mais útil deste capítulo.

Você pode ter problemas ao lidar com a Física dos impulsos por causa dos tempos curtos e das forças irregulares. A ausência de forças externas complicadas é o que você precisa para ter um princípio verdadeiramente útil. Os itens complicados que são difíceis de avaliar – a força e o tempo envolvidos em um impulso – estão fora da equação. Por exemplo, digamos que dois pilotos espaciais descuidados estejam subindo em direção à cena de um crime interplanetário. Em sua ânsia de chegar à cena primeiro, eles colidem. Durante a colisão, a força média exercida na primeira nave pela segunda nave é de F_{12} . Pelo teorema do impulso-quantidade de movimento (veja a seção “Teorema do impulso-quantidade de movimento: relacionando impulso e quantidade de movimento”), você sabe o seguinte para a primeira nave:

$$F_{12} \Delta t = \Delta p_1 = m_1 \Delta v_1 = m_1 (v_{f1} - v_{o1})$$

E se a força média exercida na segunda nave pela primeira é de F_{21} , você também sabe que

$$F_{21} \Delta t = \Delta p_2 = m_2 \Delta v_2 = m_2 (v_{f2} - v_{o2})$$

Agora, você adiciona essas duas equações, que fornece a equação resultante

$$F_{12} \Delta t + F_{21} \Delta t = \Delta p_1 + \Delta p_2 = m_1 (v_{f1} - v_{o1}) + m_2 (v_{f2} - v_{o2})$$

Reorganize os termos à direita até obter

$$F_{12} \Delta t + F_{21} \Delta t = (m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}) - (m_1 v_{o1} + m_2 v_{o2})$$

É um resultado interessante, pois $m_1 v_{o1} + m_2 v_{o2}$ é a *quantidade de movimento total inicial* das duas naves, $p_{1o} + p_{2o}$ e $m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}$ é a *quantidade de movimento total final*, $p_{1f} + p_{2f}$, das duas naves. Portanto, você pode escrever essa equação como a seguir:

$$F_{12} \Delta t + F_{21} \Delta t = (m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}) - (m_1 v_{o1} + m_2 v_{o2}) = (p_{1f} + p_{2f}) - (p_{1o} + p_{2o})$$

Se você escrever a quantidade de movimento total inicial como p_i e a quantidade de movimento total final como p_f , a equação irá tornar-se

$$F_{12} \Delta t + F_{21} \Delta t = (m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}) - (m_1 v_{o1} + m_2 v_{o2}) = p_f - p_o$$

E a partir daqui? Você soma as duas forças, $F_{12} \Delta t + F_{21} \Delta t$, para obter a soma das forças envolvidas, ΣF :

$$\Sigma F \Delta t = p_f - p_o$$



Se você estiver trabalhando com o que é chamado de *sistema isolado* ou *fechado*, não terá nenhuma força externa com a qual lidar. Assim acontece no espaço. Se as duas naves colidirem no espaço, não haverá força externa que importa, significando que, pela terceira lei de Newton (ver Capítulo 5), $F_{12} = -F_{21}$. Em outras palavras, quando você tem um sistema fechado, obtém

$$0 = \Sigma F \Delta t = p_f - p_o$$

Isto se converte em

$$p_f = p_o$$



A equação $p_f = p_o$ diz que quando você tem um sistema isolado sem forças externas, a quantidade de movimento total inicial antes de uma colisão é igual à quantidade de movimento total final depois de uma colisão, fornecendo a você o princípio da conservação da quantidade de movimento.



Tirando calor da quantidade de movimento total final

Quando dois objetos colidem e grudam, a cinética total final realmente é igual a quantidade de movimento total inicial? Bem, não exatamente. Se um objeto bater em outro e os dois grudarem, muito atrito poderá estar envolvido, significando que alguma energia cinética entra no calor. Quando isso acontece, todas as apostas estão fora, pois a quantidade de movimento final pode não ser exatamente igual à quantidade de movimento inicial.

Algumas vezes nos impactos, os objetos ficam deformados, como quando dois carros batem. Nesse caso também, alguma energia é usada ao deformar os materiais, portanto, a quantidade de movimento final pode não ser igual à quantidade de movimento inicial. Por isso, o atrito geralmente é ignorado nas aulas introdutórias de Física. Do contrário, os problemas ficariam confusos demais, pois é muito difícil prever quanto calor a colisão geraria.

Medindo a velocidade com a conservação da quantidade de movimento

Você pode usar o princípio da conservação da quantidade de movimento para medir outras forças, como, por exemplo, a velocidade. Digamos, por exemplo, que você esteja em uma expedição de Física e passa por um lago congelado onde um jogo de hóquei está acontecendo. Você mede a velocidade de um jogador obtendo 11,0 metros por segundo exatamente quando ele colide, de modo bem brutal, com outro jogador inicialmente em repouso. Você observa com interesse, imaginando a rapidez com a qual a massa resultante dos jogadores de hóquei deslizará no gelo. Depois de perguntar a alguns amigos, você descobre que o primeiro jogador tem uma massa de 100 kg e o jogador atingido (que acaba sendo seu gêmeo) também tem uma massa de 100 kg. Portanto, qual é a velocidade final dos jogadores entrelaçados?



Você está trabalhando com um sistema fechado (veja a seção anterior), pois negligencia a força do atrito aqui e embora os jogadores estejam exercendo uma força para baixo no gelo, a força normal (ver Capítulo 6) está exercendo uma força igual e oposta neles, assim, a força vertical é zero.

Mas, e a velocidade horizontal resultante no gelo? Devido ao princípio da conservação da quantidade de movimento, você sabe que

$$P_f = P_o$$

Colocando isso em termos mais úteis, você obtém o seguinte, onde substitui a quantidade de movimento inicial, que é a quantidade de movimento daquele que impõe a força, o jogador 1, pois a vítima não está movendo-se:

$$P_f = P_o = m_1 v_{o1}$$

A quantidade de movimento final, p_f , deve ser igual à massa combinada dos dois jogadores multiplicada por sua velocidade, $(m_1 + m_2)v_f$, que fornece

$$p_f = m_1 v_{o1} = (m_1 + m_2)v_f$$

Determinar a velocidade final, v_f , fornecerá

$$v_f = (m_1 v_{o1}) / (m_1 + m_2)$$

Ligar os números fornecerá

$$v_f = (m_1 v_{o1}) / (m_1 + m_2) = ([100][11]) / (100 + 100) = 1.100 / 200 = 5,5 \text{ metros por segundo}$$

A velocidade dos dois jogadores será metade da velocidade do jogador original. Isso pode ser o que você esperava, pois acabará com duas vezes a massa de movimento inicial e como a quantidade de movimento é conservada, você acaba com metade da velocidade. Bonito. Você anota os resultados em sua prancheta.

Medindo a velocidade de fogo com a conservação da quantidade de movimento

O princípio da conservação da quantidade de movimento é útil quando você não pode medir a velocidade com um cronômetro simples. Digamos, por exemplo, que você aceite um trabalho de consultoria de um fabricante de munição que deseja medir a velocidade de fogo de suas novas balas. Nenhum funcionário foi capaz de medir a velocidade ainda, pois nenhum cronômetro é rápido o bastante. O que você fará? Você decide organizar a configuração mostrada na Figura 9-43, onde atira a bala de uma massa m em um bloco de madeira pendurado de massa M .

Os diretores da empresa de munição estão perplexos – como sua configuração pode ajudar? Sempre que você atira uma bala em um bloco de madeira pendurado, a bala atinge o bloco no ar. E daí? Você decide que eles precisam de uma lição sobre o princípio da conservação da quantidade de movimento. A quantidade de movimento original, você explica, é a cinética da bala:

$$p_o = mv_o$$

Como a bala atinge o bloco de madeira, a quantidade de movimento final é o produto da massa total, $m + M$, e a velocidade final da combinação da bala/bloco de madeira:

$$p_f = (m + M)v_f$$

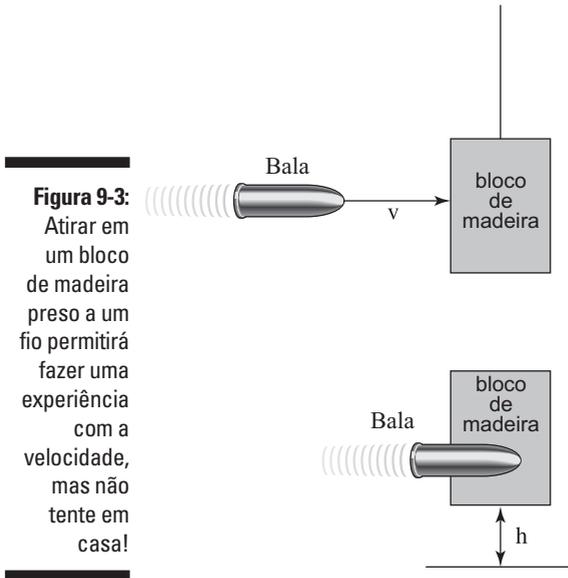


Figura 9-3: Atirar em um bloco de madeira preso a um fio permitirá fazer uma experiência com a velocidade, mas não tente em casa!

Por causa do princípio da conservação da quantidade de movimento e negligenciando o atrito e outras forças não conservativas, você pode dizer que

$$P_f = P_o$$

Portanto,

$$v_f = mv_o / (m + M)$$

Os diretores começam a ficar confusos, portanto, você explica como a energia cinética do bloco, quando é atingido, entra em sua energia potencial final, quando se eleva para a altura \$h\$ (ver Capítulo 8), portanto,

$$\frac{1}{2}(m + M) v_f^2 = (m + M)gh$$

Juntar os números fornecerá

$$\frac{1}{2}(m + M) v_f^2 = \frac{1}{2}(m + M)(m^2 v_o^2 / [m + M]^2) = (m + M)gh$$

Com um floreio, você acrescenta que determinar a velocidade inicial, \$v_o\$, fornecerá

$$v_o = \sqrt{\frac{2(m + M)^2 gh}{m^2}}$$

Você avalia que a bala tem uma massa de 50 g, o bloco de madeira tem uma massa de 10 kg e que no impacto, o bloco eleva-se a 50,0 cm no ar. Ligar esses valores fornecerá o resultado:

$$v_o = \sqrt{\frac{2(m + M)^2 gh}{m^2}} = 629 \text{ metros por segundo}$$

A velocidade inicial é 629 metros por segundo, que se converte em cerca de 2.060 pés por segundo. “Brilhante!”, os diretores gritam enquanto entregam a você um grande cheque.

Quando os Mundos (ou carros) Colidem: Colisões Elásticas e Inelásticas

Examinar colisões na Física pode ser muito interessante, especialmente porque o princípio da conservação da quantidade de movimento torna seu trabalho muito fácil (veja a seção “Quando os objetos ficam doidos: conservando a quantidade de movimento” anteriormente neste capítulo para descobrir como). Mas, geralmente há mais na história quando você está lidando com colisões do que no impulso e na quantidade de movimento. Algumas vezes, a energia cinética também é conservada, fornecendo uma margem extra para descobrir o que acontece em todos os tipos de colisões, mesmo em duas dimensões.

Você pode encontrar todos os tipos de situações nos problemas de Física onde as colisões tornam-se importantes. Dois carros colidem, por exemplo, e você precisa encontrar a velocidade final dos dois quando eles grudam. Pode ainda encontrar um caso onde dois vagões indo em velocidades diferentes colidem, unem-se e você precisa determinar a velocidade final dos dois.

Mas, e se você tiver um caso mais geral, onde os dois objetos não grudam? Digamos, por exemplo, que você tenha duas bolas de bilhar que se chocam em velocidades diferentes e em ângulos diversos, saltando em velocidades e ângulos diferentes. Como você trabalha com essa situação, afinal? Você tem um modo de trabalhar com essas colisões, mas precisa mais do que apenas o princípio da conservação da quantidade de movimento fornece.

Quando os objetos saltam: colisões Elásticas

Quando os corpos colidem no mundo real, você pode observar as perdas de energia devido ao calor e à deformação. Se essas perdas forem muito menores do que as outras energias envolvidas, como, por exemplo, quando duas bolas de bilhar colidem e seguem em caminhos separados, a energia cinética pode ser conservada na colisão. A Física tem um nome especial para as colisões nas quais a energia cinética é conservada: *colisões elásticas*. Em uma colisão elástica, a energia cinética total em um sistema fechado (onde as forças resultantes somam-se como zero) é igual antes e depois da colisão.

Quando os objetos não saltam: Colisões inelásticas

Se você puder observar perdas de energia consideráveis devido às forças não conservativas (tais como o atrito) durante uma colisão, a energia cinética não é conservada. Neste caso, o atrito, deformação ou algum outro processo transforma a energia cinética e ela é perdida. O nome que a Física dá a uma situação na qual a energia cinética é dissipada depois de uma colisão é *colisão inelástica*. A energia cinética total em um sistema fechado não é igual antes da colisão como é depois, como, por exemplo, quando dois carros batem e se juntam.



Os objetos não precisam ficar grudados em uma colisão inelástica; tudo que precisa acontecer é a perda de alguma energia cinética. Por exemplo, se você se chocar contra um carro e deformá-lo, a colisão será inelástica, mesmo que possa sair dirigindo depois do acidente.

Colidindo em uma linha

Quando uma colisão é elástica, a energia cinética é conservada. O modo mais básico de ver as colisões elásticas é examinando como as colisões trabalham em uma linha reta. Se você esmagar seu para-choques no para-choques de um amigo em linha reta, saltará para trás e a energia cinética será conservada na linha. Mas o comportamento dos carros dependerá da massa dos objetos envolvidos na colisão elástica.

Batendo em uma massa mais pesada

Você leva sua família para o Parque de Diversões de Física para ter um dia de diversão e cálculo, e decide dirigir carrinhos elétricos. Você acena para sua família quando acelera seu carro de 300 kg em 10 metros por segundo. De repente, BONK! O que aconteceu? A pessoa na sua frente, dirigindo um carro de 400 kg, parou completamente e você bateu na traseira dela; agora, você está andando para trás e ela está indo para a frente. “Interessante”, você pensa, “Imagino se eu posso determinar as velocidades finais dos dois carrinhos elétricos”.

Você sabe que a cinética foi conservada e sabe que o carro à sua frente foi parado quando o atingiu, portanto, se seu carro for o carro 1 e o outro for o carro 2, você obterá o seguinte

$$m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2} = m_1 v_{o1}$$

Contudo, isso não o informa o que são v_{f1} e v_{f2} , pois existem dois desconhecidos e apenas uma equação aqui. Você não pode determinar v_{f1} ou v_{f2} exatamente neste caso, mesmo que saiba as massas e v_{o1} . Você precisa de algumas outras equações relacionando essas quantidades. Que tal usar a conservação da energia cinética?

A colisão foi elástica, portanto, a energia cinética foi conservada, significando que

$$\frac{1}{2}m_1v_{f1}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{f2}^2 = \frac{1}{2}m_1v_{o1}^2$$

Agora, você tem duas equações e dois desconhecidos, v_{f1} e v_{f2} , significando que pode determinar os desconhecidos em termos de massas e de v_{o1} . Você tem que entrar em muita álgebra aqui porque a segunda equação tem muitas velocidades quadradas, mas quando a poeira abaixa, você tem

$$v_{f1} = [(m_1 - m_2)v_{o1}] / (m_1 + m_2)$$

e

$$v_{f2} = 2m_1v_{o1} / (m_1 + m_2)$$

Agora, você tem v_{f1} e v_{f2} em termos de massas e v_{o1} . Ligar os números fornecerá

$$v_{f1} = [(m_1 - m_2)v_{o1}] / (m_1 + m_2) = [(300 - 400)(10)] / (300 + 400) = -1,43 \text{ m/s}$$

e

$$v_{f2} = 2m_1v_{o1} / (m_1 + m_2) = [2(300)(10)] / (300 + 400) = 8,57 \text{ m/s}$$

As duas velocidades contam toda a história. Você começou com 10,0 metros por segundo em um carrinho elétrico de 300 kg e atingiu um carrinho parado de 400 kg à sua frente. Supondo que a colisão ocorreu diretamente e o segundo carrinho disparou na mesma direção que você estava indo antes da colisão, você voltou a -1,43 metro por segundo – para trás, pois essa quantidade é negativa e o carrinho elétrico à sua frente tinha mais massa – e o carrinho à sua frente disparou com uma velocidade de 8,57 metros por segundo.

Batendo em uma massa mais leve

Depois de ter uma experiência ruim em uma viagem anterior para a parada do carrinho elétrico – onde seu carrinho leve atingiu a traseira de um pesado (veja a seção anterior para saber o cálculo) – você decide voltar e perseguir alguns carros pouco leves em um carrinho elétrico monstro. O que acontecerá se seu carrinho tiver uma massa de 400 kg e você bater na traseira de um carrinho de 300 kg parado? Neste caso, você usa a equação para a conservação da energia cinética, a mesma fórmula utilizada na seção anterior. Sua velocidade final resulta em

$$v_{f1} = [(m_1 - m_2)v_{o1}] / (m_1 + m_2) = [(400 - 300)(10)] / (300 + 400) = 1,43 \text{ m/s}$$

A velocidade final do carrinho resulta em

$$v_{f2} = 2m_1v_{o1} / (m_1 + m_2) = [2(400)(10)] / (300 + 400) = 11,4 \text{ m/s}$$

Neste caso, você não salta para trás. O carrinho parado mais leve sai depois de você atingi-lo, mas nem toda sua quantidade de movimento para a frente é transferida para o outro carro. A quantidade de movimento ainda é conservada? Veja o seguinte:

$$p_o = m_1 v_{o1}$$

e

$$p_f = m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2}$$

Colocando em números, você obtém

$$p_o = m_1 v_{o1} = (400)(10) = 4.000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

e

$$p_f = m_1 v_{f1} + m_2 v_{f2} = (400)(1.43) + (300)(11.4) = 4.000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

A quantidade de movimento é conservada nesta colisão, exatamente como é para sua colisão com um carro mais pesado.

Colidindo em duas dimensões

As colisões nem sempre ocorrem em uma linha reta. Por exemplo, as bolas em uma mesa de bilhar podem seguir em duas dimensões, X e Y, quando saem rapidamente. As colisões nas duas dimensões introduzem variáveis, como, por exemplo, ângulo e direção. Por exemplo, suas viagens de Física levam-no ao curso de golfe, onde dois jogadores estão alinhando suas tacadas finais do dia. Os jogadores estão empatados, portanto, essas tacadas são as jogadas decisivas. Infelizmente, o jogador mais próximo do buraco quebra a etiqueta e eles dão uma leve tacada ao mesmo tempo. Suas bolas de golfe de 45 g colidem! Você pode ver o que acontece na Figura 9-4.

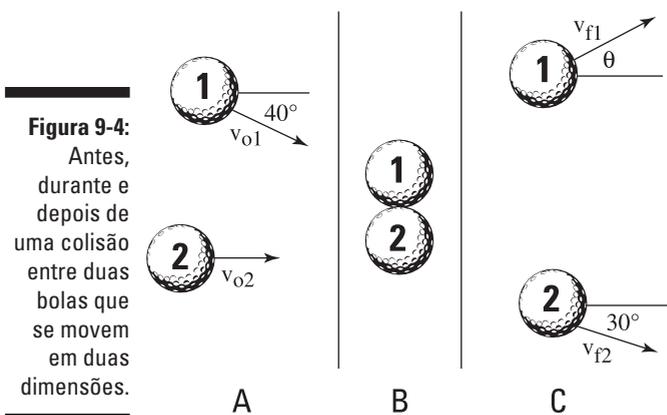


Figura 9-4: Antes, durante e depois de uma colisão entre duas bolas que se movem em duas dimensões.

Você se abaixa rapidamente para medir todos os ângulos e velocidades envolvidos na colisão. Você mede as velocidades: $v_{o1} = 1,0$ metro por segundo, $v_{o2} = 2,0$ metros por segundo e $v_{f2} = 1,2$ metro por segundo. Você também tira o máximo dos ângulos, como mostrado na Figura 9-4. Contudo, não consegue o ângulo final e a velocidade da bola de golfe 1.

Como as bolas de golfe criam uma colisão elástica, a quantidade de movimento e a energia cinética são conservadas. Em particular, a quantidade de movimento é conservada nas direções dos eixos X e Y e a energia cinética total é conservada também. Mas usar todas essas equações em duas dimensões pode ser um pesadelo, portanto, os problemas de Física muito raramente pedem para você fazer esse tipo de cálculo. Neste caso, tudo que você deseja é a velocidade final – ou seja, a velocidade e a direção – da bola de golfe 1, como mostrado na Figura 9-4. Para resolver esse problema, tudo o que precisa é da conservação da quantidade de movimento em duas dimensões. A quantidade de movimento é conservada nas direções X e Y, significando que

$$P_{fx} = P_{ox}$$

e

$$P_{fy} = P_{oy}$$

Em outras palavras, a quantidade de movimento final na direção X é igual a quantidade de movimento original na direção X e a quantidade de movimento final na direção Y é igual a quantidade de movimento original na direção Y. A quantidade de movimento original na direção X fica assim:

$$P_{fx} = P_{ox} = m_1 v_{o1} \cos 40^\circ + m_2 v_{o1}$$

Definir essa igualdade para quantidade de movimento final na direção X fornecerá

$$P_{fx} = P_{ox} = m_1 v_{o1} \cos 40^\circ + m_2 v_{o2} = m_1 v_{f1x} + m_2 v_{f2} \cos 30^\circ$$

Isso informa que

$$m_1 v_{f1x} = m_1 v_{o1} \cos 40^\circ + m_2 v_{o2} - m_2 v_{f2} \cos 30^\circ$$

Dividir por m_1 fornecerá

$$v_{f1x} = v_{o1} \cos 40^\circ + (m_2 v_{o2} - m_2 v_{f2} \cos 30^\circ) / m_1$$

Como $m_1 = m_2$, isso se divide ainda mais:

$$v_{f1x} = v_{o1} \cos 40^\circ + v_{o2} - v_{f2} \cos 30^\circ$$

Ligar os números fornecerá

$$\begin{aligned} v_{f1x} &= v_{o1} \cos 40^\circ + v_{o2} - v_{f2} \cos 30^\circ = (1,0)(0,766) + 2,0 - [(1,2)(0,866)] \\ &= 1,71 \text{ m/s} \end{aligned}$$

A velocidade final da bola de golfe 1 na direção x é 1,71 metro por segundo.

Capítulo 10

Enrolando com a Cinética Angular

Neste Capítulo

- ▶ Mudando do movimento linear para o movimento rotacional
- ▶ Calculando a velocidade tangencial e a aceleração
- ▶ Descobrimo a aceleração angular e a velocidade
- ▶ Identificando o torque envolvido no movimento rotacional
- ▶ Mantendo o equilíbrio rotacional

Este capítulo é o primeiro de dois (o Capítulo 11 é outro) sobre como trabalhar com os objetos que giram, desde estações espaciais até bolinhas de gude. A rotação é o que faz o mundo girar – literalmente – e se você souber como lidar com o movimento linear e as leis de Newton (veja as duas primeiras partes do livro se não souber), os equivalentes rotacionais que apresento, neste capítulo e no Capítulo 11, serão moleza. E se você não tiver uma noção sobre movimento linear, não se preocupe. Poderá ter aqui um domínio sólido sobre o básico da rotação e voltar para a parte linear. Você vê todos os tipos de ideias rotacionais neste capítulo: aceleração angular, velocidade tangencial e aceleração, torque e mais. Mas chega de perder tempo. Leia!

Do Movimento Linear ao Rotacional

Você precisa mudar as equações quando passa do movimento linear para o rotacional, particularmente quando ângulos são envolvidos. O Capítulo 7 mostrou os equivalentes rotacionais (ou *análogos*) para cada uma dessas equações rotacionais:

- ✓ $\mathbf{v} = \Delta \mathbf{s} / \Delta t$, onde \mathbf{v} é a velocidade, $\Delta \mathbf{s}$ é a variação no deslocamento e Δt é a variação no tempo
- ✓ $\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$, onde \mathbf{a} é aceleração e $\Delta \mathbf{v}$ é a variação na velocidade
- ✓ $\mathbf{s} = \mathbf{v}_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}\mathbf{a}(t_f - t_0)^2$, onde \mathbf{s} é o deslocamento, \mathbf{v}_0 é a velocidade original, t_f é o tempo final e t_0 é o tempo original
- ✓ $\mathbf{v}_2^f - \mathbf{v}_0^2 = 2\mathbf{a}\mathbf{s}$, onde \mathbf{v}_1 é a velocidade final

É assim que você converte estas equações em termos de deslocamento angular θ (medido em radianos – 2π radianos em um círculo), rapidez angular, ω , e aceleração angular, α :

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t$$

$$\alpha = \Delta\omega / \Delta t$$

$$\theta = \omega_0(t_f - t_0) + \frac{1}{2}\alpha (t_f - t_0)^2$$

$$\omega_f^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$$

Compreendendo o Movimento Tangencial



O movimento tangencial é aquele perpendicular ao movimento radial ou em um raio. Você pode ligar quantidades angulares como, por exemplo, deslocamento angular, θ , rapidez angular, ω , e aceleração angular, α , às suas quantidades tangenciais associadas – tudo que você tem que fazer é multiplicar pelo raio:

$$s = r\theta$$

$$v = r\omega$$

$$a = r\alpha$$

Digamos que você esteja andando de motocicleta, por exemplo, e a velocidade angular final das rodas seja $\omega_f = 21,5 \pi$ radianos por segundo (veja a seção anterior para ter um cálculo completo). O que isso significa em termos de velocidade de sua motocicleta? Para determinar a velocidade de sua motocicleta, você precisa relacionar a rapidez angular, ω , à rapidez linear, v . As seguintes seções explicam como você pode fazer tais relações.

Encontrando a velocidade tangencial

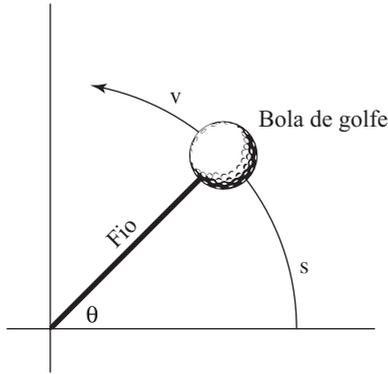
A velocidade linear tem um nome especial quando você começa a lidar com o movimento rotacional – é chamada de velocidade tangencial. A *velocidade tangencial* é aquela medida em um ponto, com um determinado raio r . O vetor v mostrado na Figura 10-1 é um vetor tangencial (significando que tem uma grandeza e uma direção; ver Capítulo 4), perpendicular ao seu raio.



Dada uma velocidade angular ω , a velocidade tangencial em qualquer raio é $r\omega$. Isso faz sentido, pois dada uma roda girando, você esperaria que um ponto no raio r fosse mais rapidamente do que um ponto mais próximo do centro da roda.

Veja a Figura 10-1, que mostra uma bola ligada a um fio. Neste caso, você sabe que a bola está movendo-se com uma velocidade angular ω .

Figura 10-1:
Uma bola em movimento circular tem uma velocidade angular em relação ao raio do círculo.



Você poderá encontrar facilmente a grandeza da velocidade da bola, v , se medir os ângulos em radianos. Um círculo tem 2π radianos; a distância completa em torno de um círculo – sua circunferência – é $2\pi r$, onde r é o raio do círculo. E se você percorrer apenas a metade, cobrirá uma distância de πr ou π radiano. Em geral, portanto, pode-se conectar um ângulo medido em radianos com a distância que você cobre no círculo, s , assim:

$$s = r\theta$$

onde r é o raio do círculo. Agora, você pode dizer que

$$v = s / t$$

onde v é a velocidade, s é o deslocamento e t é o tempo. Você pode substituir s para obter

$$v = s / t = r\theta / t$$

$\omega = \theta / t$, significando que

$$v = s / t = r\theta / t = r\omega$$

Em outras palavras,

$$v = r\omega$$

Agora, você pode encontrar a grandeza da velocidade. As rodas da motocicleta estão girando com uma velocidade angular de $21,5\pi$ radianos por segundo. Se você puder encontrar a velocidade tangencial de qualquer ponto nas bordas externas das rodas, poderá encontrar a velocidade da motocicleta. Digamos, por exemplo, que o raio de uma das rodas de sua motocicleta tenha 40 cm. Você sabe que

$$v = r\omega$$

Simplesmente, ligue os números!

$$v = r\omega = (0,40)(21,5\pi) = 27,0 \text{ m/s}$$

Converter 27,0 metros por segundo em milhas por hora dará cerca de 60 mph.

Encontrando a aceleração tangencial

A *aceleração tangencial* é uma medida de como a velocidade de um ponto em certo raio muda com o tempo. Esse tipo de aceleração lembra a aceleração linear (ver Capítulo 3), com exceção de que a aceleração tangencial ocorre no movimento circular. Por exemplo, quando você liga um cortador de gramas, um ponto na ponta de uma de suas lâminas inicia com uma velocidade tangencial zero e termina com uma velocidade tangencial bem rápida. Portanto, como você determina a aceleração tangencial do ponto? Veja como você pode relacionar a seguinte equação do Capítulo 3, que encontra a aceleração linear (onde Δv é a mudança na velocidade e Δt é a mudança no tempo)

$$a = \Delta v / \Delta t$$

às quantidades angulares, tal como, rapidez angular. Você descobriu na seção anterior que a velocidade tangencial, v , é igual a $r\omega$, portanto, pode ligar essa informação em:

$$a = \Delta v / \Delta t = \Delta(r\omega) / \Delta t$$

Como o raio é constante aqui, a equação torna-se

$$a = \Delta v / \Delta t = \Delta(r\omega) / \Delta t = r\Delta\omega / \Delta t$$

Contudo, $\Delta\omega / \Delta t = \alpha$, a aceleração angular, assim, a equação torna-se

$$a = \Delta v / \Delta t = r\Delta\omega / \Delta t = r\alpha$$

Em outras palavras,

$$a = r\alpha$$

Traduzido em termos leigos, a aceleração tangencial é igual à aceleração angular multiplicada pelo raio.

Encontrando a aceleração centrípeta

Outro tipo de aceleração que revela o movimento circular de um objeto – a *aceleração centrípeta* ou a aceleração que um objeto precisa para continuar em um círculo. Você pode conectar as quantidades angulares,

como, por exemplo, a rapidez angular, à aceleração centrípeta? Certamente que sim. A aceleração centrípeta é dada pela seguinte equação (para saber mais sobre a equação, veja o Capítulo 7):

$$a_c = v^2 / r$$

onde v^2 é a velocidade ao quadrado e r é o raio. É bem fácil relacionar velocidade angular porque $v = r\omega$ (veja a seção “Encontrando a velocidade tangencial”), que fornece

$$a_c = v^2 / r = (r\omega)^2 / r$$

Esta equação divide-se em

$$a_c = r\omega^2$$

Nada mais. A equação para a aceleração centrípeta significa que você pode encontrar a aceleração centrípeta necessária para manter um objeto movendo-se em um círculo, dados o raio do círculo e a velocidade angular do objeto. Por exemplo, digamos que você queira calcular a aceleração centrípeta da Lua em torno da Terra. Primeiro, use a antiga equação:

$$a_c = v^2 / r$$



Primeiro, você tem que calcular a velocidade tangencial, ou a velocidade angular, da Lua em sua órbita. Usar a nova versão da equação, $a_c = r\omega^2$, é mais fácil porque a Lua orbita a Terra em cerca de 28 dias, portanto, você pode calcular facilmente a velocidade angular da Lua.

Como a Lua faz uma órbita completa em torno da Terra em cerca de 28 dias, ela percorre 2π radianos em volta da Terra nesse período, portanto, sua velocidade angular é

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t = 2\pi / 28 \text{ dias}$$

Converter 28 dias em segundos fornecerá (28 dias)(24 horas por dia)(60 minutos por hora)(60 segundos por minuto) = $2,42 \times 10^6$ segundos, portanto, você tem a seguinte rapidez angular:

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t = 2\pi / 28 \text{ dias} = 2\pi / 2,42 \times 10^6 = 2,60 \times 10^{-6} \text{ radianos por segundo}$$

Agora, você tem a velocidade angular da Lua, $2,60 \times 10^{-6}$ radianos por segundo. O raio médio da órbita da Lua é de $3,85 \times 10^8$ m, assim, sua aceleração centrípeta é

$$a_c = r\omega^2 = (3,85 \times 10^8)(2,60 \times 10^{-6})^2 = 2,60 \times 10^{-3} \text{ radianos por segundo}^2$$

Apenas por diversão, você também pode encontrar a força necessária para manter a Lua movendo-se em sua órbita. A força é igual à massa vezes a aceleração (ver Capítulo 5), portanto, você multiplica pela massa da Lua, $7,35 \times 10^{22}$ kg:

$$F_c = ma_c = (7,35 \times 10^{22})(2,60 \times 10^{-3}) = 1,91 \times 10^{20}\text{N}$$

A força em Newtons encontrada, $1,91 \times 10^{20}\text{N}$, converte-se em cerca de $4,30 \times 10^{19}$ libras de força necessária para manter a Lua movendo-se em sua órbita.

Aplicando Vetores na Rotação

As seções anteriores neste capítulo examinaram a velocidade angular e a aceleração angular como se fossem escalares – como se a velocidade e a aceleração tivessem apenas uma grandeza e não uma direção. Contudo, esses conceitos são realmente vetores, significando que têm uma grandeza e uma direção (veja o Capítulo 4 para saber mais sobre escalares e vetores). Quando você faz a troca do movimento linear para o movimento circular, faz a troca da velocidade angular para a velocidade circular – e falando apenas sobre grandezas e direção. Você pode ver a relação entre as duas nas seguintes seções.



A velocidade angular e a aceleração angular são vetores que apontam em ângulos retos para a direção da rotação.

Calculando a velocidade angular

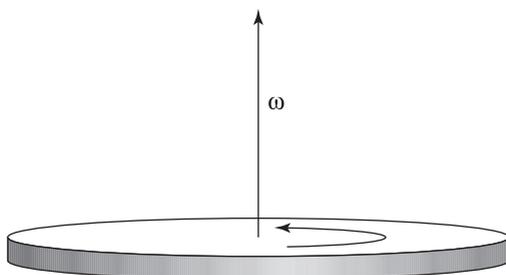
Quando uma roda está girando, ela tem uma velocidade angular, mas pode ter uma aceleração angular também. Digamos, por exemplo, que a roda tenha uma velocidade angular constante, ω - para qual direção sua velocidade angular, ω , aponta? Ela não pode apontar no aro da roda, como faz a velocidade tangencial, pois sua direção mudaria a cada segundo. Na verdade, a única escolha real para sua direção é perpendicular à roda.

Isto sempre surpreende as pessoas: a velocidade angular, ω , aponta no eixo de uma roda (por exemplo, veja a Figura 10-2). Como o vetor da velocidade angular aponta para o caminho que ele faz, não há componente na roda. A roda está girando, portanto, a velocidade em qualquer ponto na roda está mudando de direção constantemente – exceto no ponto muito central da roda. A base do vetor da velocidade angular fica bem no ponto central da roda. Sua cabeça aponta para cima ou para baixo, longe da roda.



Você pode usar a *regra da mão direita* para determinar a direção de um vetor. Para aplicar essa regra na roda na Figura 10-2, estenda sua mão direita (as pessoas canhotas geralmente acham que os chauvinistas destros inventaram essa regra e, talvez, seja verdade) na roda de modo que seus dedos apontem na direção do movimento tangencial em qualquer ponto – ou seja, os dedos em sua mão direita ficam na mesma direção da rotação da roda. Quando você estender sua mão direita na roda, seu polegar apontará na direção do vetor da velocidade angular, ω .

Figura 10-2:
A velocidade angular aponta na direção perpendicular ao círculo.



Agora, você pode dominar o vetor da velocidade angular. Você sabe que sua grandeza é ω , a rapidez angular de um objeto no movimento rotacional. E agora, pode encontrar a direção desse vetor usando a regra da mão direita. O fato de a velocidade angular ser perpendicular ao plano do movimento rotacional (o lado achatado da roda) requer costume, mas como você viu, não se pode introduzir um vetor em uma roda giratória com uma velocidade angular constante, de modo que o vetor tenha uma direção constante, exceto bem no centro da roda. A partir deste ponto, você não tem nenhum modo de prosseguir, exceto subir (ou descer, no caso da velocidade angular negativa).

Descobrimo a aceleração angular

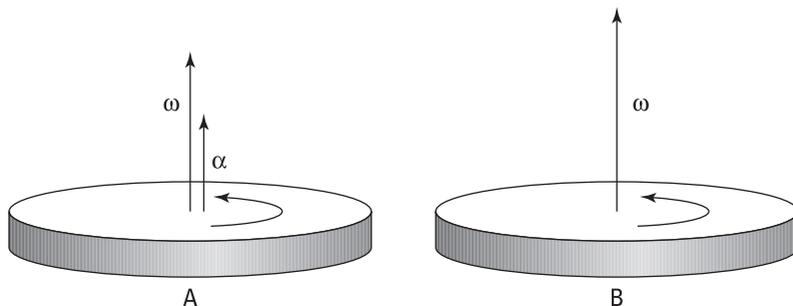
Se o vetor da velocidade angular aponta a partir do plano de rotação (veja a seção anterior), o que acontecerá quando a velocidade angular mudar – quando a roda aumentar ou diminuir a velocidade? Uma mudança na velocidade significa a presença da aceleração angular. Como a velocidade angular, ω , a aceleração angular, α , é um vetor, significando que tem uma grandeza e uma direção. A aceleração angular é a taxa de mudança da rapidez angular:

$$\alpha = \Delta\omega / \Delta t$$

Por exemplo, veja a Figura 10-3, que mostra o que acontece quando a aceleração angular afeta a velocidade angular.

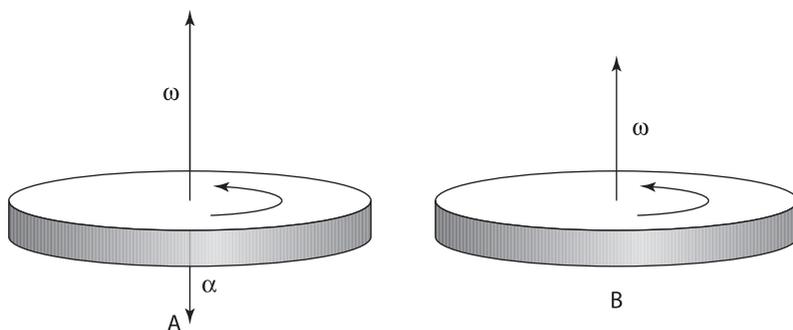
Neste caso, α aponta na mesma direção de ω no diagrama A. Se o vetor da aceleração angular, α , apontar na velocidade angular, ω , com o passar do tempo, a grandeza de ω aumentará, como mostrado na Figura 10-3, diagrama B.

Figura 10-3:
O vetor da aceleração angular indica como a velocidade angular mudará com o tempo.



Você calculou que o vetor da aceleração angular apenas indica como a velocidade angular mudará com o tempo, o que espelha a relação entre aceleração linear e velocidade linear. Contudo, você deve notar que a aceleração angular não tem que estar na mesma direção do vetor da velocidade angular, como mostrado na Figura 10-4, diagrama A. Se a aceleração angular se mover na direção oposta da velocidade angular, será chamada de aceleração angular negativa.

Figura 10-4:
Girando na direção oposta da velocidade angular com uma aceleração angular negativa.



Como você pode esperar neste caso, a aceleração angular reduzirá a velocidade angular com o passar do tempo, que você pode ver na Figura 10-4, diagrama B. Digamos, por exemplo, que você pegue o eixo da roda que gira na Figura 10-3 e toca na roda. A aceleração angular está em ângulos retos em relação à velocidade angular, o que muda a direção da velocidade angular.

Torcendo e Gritando: Torque

Você não só tem que ver como as forças trabalham quando as aplica a objetos, mas também *onde* aplica as forças. Que entre o torque. O *torque* é uma medida da tendência de uma força que causa a rotação. Em termos da Física, o torque exercido em um objeto depende de onde você exerce a força. Você vai da ideia estritamente linear da força como algo que age em uma linha reta, como, por exemplo,

empurrar uma geladeira rampa acima, ao seu correspondente angular, o torque.

O torque traz as forças para o mundo rotacional. A maioria dos objetos não é apenas massas pontuais ou rígidas, portanto, se você os empurrar, eles não só se moverão, como também irão virar. Por exemplo, se você aplicar uma força tangencialmente em um carrossel, não moverá o carrossel para longe de seu local atual – você faz com que ele comece a girar. E o giro é a cinemática rotacional que você foca neste capítulo e no Capítulo 11.

Veja a Figura 10-5, que mostra uma gangorra com uma massa m . Se você quiser equilibrar a gangorra, não poderá ter uma massa maior, M , colocada em um ponto parecido no outro lado da gangorra. Onde você coloca a massa M maior determina quais resultados obtém. Como pode ver no diagrama A da Figura 10-5, se você colocar a massa M no *ponto pivô* – também chamado de *ponto de apoio* – da gangorra, não criará um equilíbrio. A massa maior exerce uma força na gangorra, mas a força não a equilibra.

Como pode ver no diagrama B da Figura 10-5, quando a distância, na qual você coloca a massa M a partir do ponto de apoio aumenta, o equilíbrio melhora. Na verdade, se $M = 2m$, você precisará colocar a massa M exatamente na metade distante do ponto de apoio de onde a massa m está.

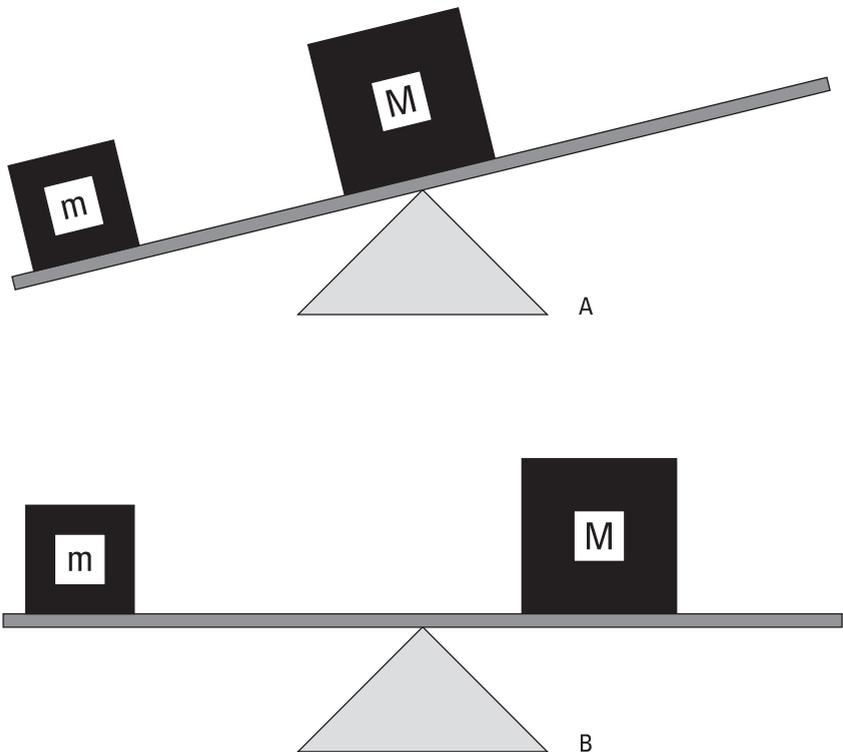


Figura 10-5:
Uma gangorra demonstra o torque em funcionamento.



Mapeando a equação do torque

Quanto torque você exerce em um objeto depende do ponto onde aplica a força. A força exercida, F , é importante, mas você não pode desconsiderar o *braço da alavanca* – também chamado de *braço do momento* – que é a distância a partir do ponto pivô no qual você exerce sua força. Suponha que você esteja tentando abrir uma porta, como nas várias situações na Figura 10-6. Você sabe que se empurrar na articulação, como no diagrama A, a porta não será aberta; se empurrar no meio da porta, como no diagrama B, a porta se abrirá lentamente; e se empurrar na borda da porta, como no diagrama C, a porta se abrirá mais rapidamente.

Na Figura 10-6, o braço da alavanca, l , é a distância r da articulação na qual você exerce sua força. O torque é o produto da força multiplicado pelo braço da alavanca. Tem um símbolo especial, a letra grega τ (tau):

$$\tau = Fl$$

As unidades do torque são a força multiplicada pela distância, que é Newtons-metros no sistema MKS, dinas-centímetros no sistema CGS e pés-libras no sistema pé-libra-segundo (veja o Capítulo 2 para saber mais sobre esses sistemas de medida).

Portanto, por exemplo, o braço da alavanca na Figura 10-6 é a distância r , assim, $\tau = Fr$. Se você empurrar com uma força de 200N e $r = 0,5$ metro, qual será o torque visto na figura? No diagrama A, você empurra na articulação, portanto, sua distância a partir do ponto pivô é zero, significando que o braço da alavanca é zero. Então, o torque é zero. No diagrama B, você exerce 200N de força em uma distância de 0,5 metro perpendicular à articulação, assim

$$\tau = Fl = 200(0,5) = 100\text{N}\cdot\text{m}$$

O torque aqui é 100 N·m. mas agora, veja o diagrama C. Você empurra com 200N de força em uma distância de $2r$ perpendicular à articulação, que torna o braço da alavanca $2r = 1,0$ metro, portanto, você obtém este torque:

$$\tau = Fl = 200(1,0) = 200\text{N}\cdot\text{m}$$

Agora você tem 200N·m de torque, pois empurra em um ponto duas vezes distante do ponto pivô. Em outras palavras, você dobra seu torque. Mas o que aconteceria se, digamos, a porta estivesse parcialmente aberta quando você exercesse sua força? Bem, você calcularia o torque facilmente, se tivesse domínio do braço da alavanca.

Compreendendo os braços da alavanca

Se você empurra uma porta aberta parcialmente na mesma direção na qual empurra uma porta fechada, cria um torque diferente por causa do ângulo não reto entre sua força e a porta.

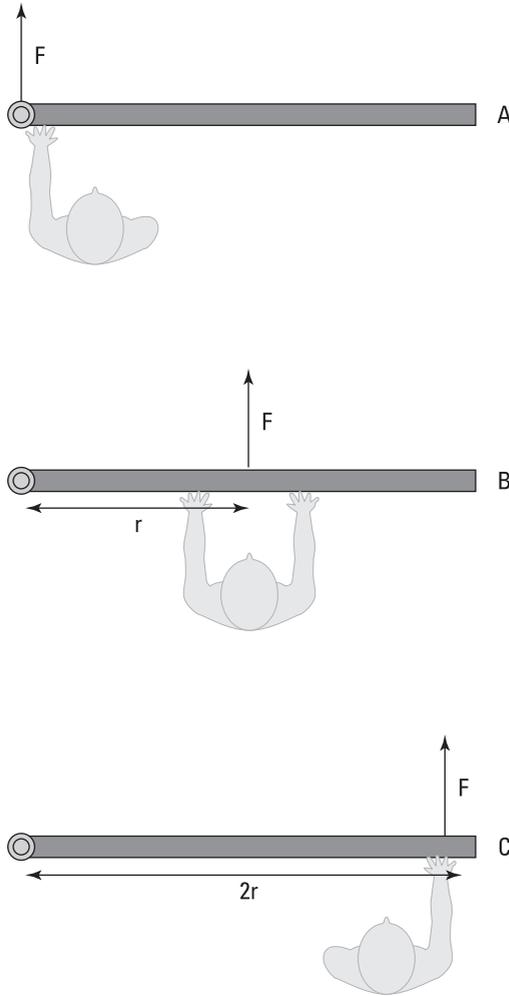


Figura 10-6:
O torque exercido em uma porta depende de onde você a empurra.

Observe a Figura 10-7, diagrama A, para ver uma pessoa tentando, obstinadamente, abrir uma porta empurrando-a na articulação. Você sabe que este método não produzirá nenhum movimento de rotação, pois a força da pessoa não tem nenhum braço de alavanca para produzir a força de rotação necessária. “Não me amole”, a pessoa diz; algumas pessoas simplesmente não gostam de Física. Neste caso, o braço da alavanca era zero, portanto, está claro que mesmo que você aplique uma força em uma dada distância de um ponto pivô, nem sempre produzirá um torque. A direção na qual você aplica a força também conta, como você sabe com sua experiência abrindo portas.

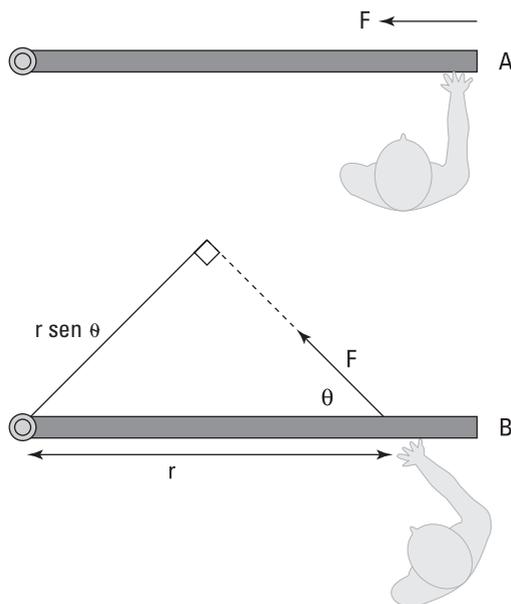


Figura 10-7: Você produz um ângulo útil de um braço da alavanca exercendo força na devida direção.

Descobrimo o torque gerado

Gerar torque é como abrir portas, tendo você aberto rapidamente a porta de um carro ou aberto com dificuldade e lentamente a porta do caixa forte de um banco. Mas como você descobre quanto torque é gerado? Primeiro, calcula o braço da alavanca e, então, multiplica esse braço pela força para obter o torque.

Veja o diagrama B na Figura 10-7. Você aplica uma força na porta em algum ângulo, θ . A força pode abrir a porta, mas não é algo certo, pois como você pode ver a partir da figura, aplica menos força de rotação aqui. O que você precisa fazer é encontrar o braço da alavanca primeiro. Como pode ver na Figura 10-7, você aplica a força em uma distância r a partir da articulação. Se você aplicasse essa força de modo perpendicular à porta, o braço da alavanca seria r e você obteria

$$\tau = Fr$$

Porém, esse não é o caso aqui, pois a força não é perpendicular à porta.



O braço da alavanca é a distância efetiva a partir do ponto pivô no qual a força atua de modo perpendicular.

Para ver como funciona, veja o diagrama B na Figura 10-7, onde você pode desenhar um braço de alavanca a partir do ponto pivô para que a força seja perpendicular ao braço da alavanca. Para tanto, estenda o vetor de força até que possa desenhar uma linha do ponto pivô perpendicular até o vetor de força. Você criará um novo triângulo. O braço da alavanca e a força estão em ângulos retos entre si, portanto, você cria um triângulo retângulo. O ângulo entre a força e a porta é θ e a distância a partir da articulação na qual você aplica a força é r (a hipotenusa do triângulo retângulo), portanto, o braço da alavanca torna-se

$$l = r \text{ sen } \theta$$

Quando θ fica em zero, também fica o braço da alavanca, então, não há torque (veja o diagrama A na Figura 10-7). Você sabe que

$$\tau = Fl$$

assim, agora você pode encontrar

$$\tau = Fr \text{ sen } \theta$$

onde θ é o ângulo entre a força e a porta.



Esta é a equação geral; se você aplicar uma força F em uma distância r a partir de um ponto pivô, onde o ângulo entre esse deslocamento e F é θ , o torque produzido será $\tau = Fr \text{ sen } \theta$. Portanto, por exemplo, se $\theta = 45^\circ$, $F = 200\text{N}$ e $r = 1,0$ metro, você terá

$$\tau = Fr \text{ sen } \theta = (200)(1,0)(0,70) = 141\text{N}\cdot\text{m}$$

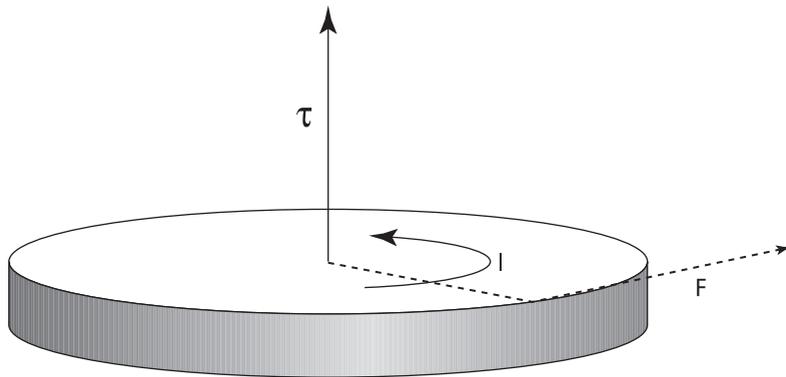
Este número é menos do que você esperaria, caso empurrasse a porta apenas na perpendicular (que seria $200\text{N}\cdot\text{m}$).

Reconhecendo que o torque é um vetor

Ver os ângulos entre os braços da alavanca e os vetores de força (veja as duas seções anteriores) pode indicar que o torque é um vetor também. E é. Na Física, o torque será um vetor positivo se tender a criar um movimento de rotação para a esquerda (em direção aos ângulos positivos de modo crescente) e negativo se tender a criar um movimento de rotação para a direita (em direção a ângulos negativos de modo crescente).

Por exemplo, veja a Figura 10-8, onde uma força F aplicada no braço da alavanca l está produzindo um torque τ . Como o movimento de rotação produzido vai em direção a ângulos positivos maiores, τ é positivo.

Figura 10-8:
Um movimento de rotação em direção a ângulos positivos maiores indica um vetor positivo.



Nenhuma Oscilação Permitida: Equilíbrio Rotacional

Você pode conhecer o equilíbrio como um estado de estabilidade, mas o que é equilíbrio em termos físicos? Quando você diz que um objeto tem *equilíbrio*, quer dizer que o movimento do objeto não está mudando; em outras palavras, o objeto não tem aceleração (contudo, pode ter movimento, como na velocidade constante e/ou velocidade angular constante). No que diz respeito ao movimento linear, a soma de todas as forças que atuam no objeto deve ser zero:

$$\sum F = 0$$

Em outras palavras, a força resultante no objeto é zero.



O equilíbrio também ocorre no movimento rotacional na forma de equilíbrio rotacional. Quando um objeto está em *equilíbrio rotacional*, ele não tem nenhuma aceleração angular – o objeto pode estar girando, mas não está aumentando nem diminuindo a velocidade, o que significa que sua velocidade angular é constante. Quando um objeto tem equilíbrio rotacional, não há nenhuma força de rotação resultante nele, significando que o torque resultante no objeto deve ser zero:

$$\sum \tau = 0$$

Esta equação representa o equivalente rotacional do equilíbrio linear. O equilíbrio rotacional é uma ideia útil, pois dado um conjunto de torques operando em um objeto, você poderá determinar qual torque é necessário para parar a rotação do objeto.

Pendurando uma bandeira: Um problema do equilíbrio rotacional

O gerente de uma loja de hardware na qual você trabalha pede para ajudá-lo a pendurar uma bandeira na parte superior da loja. A loja tem muito orgulho da bandeira, pois é grande (para verificar, veja a Figura 10-9). O problema é que o parafuso que segura o mastro no lugar parece quebrar sempre e a bandeira e o mastro chocam-se na borda do prédio, o que não ajuda na imagem da loja.

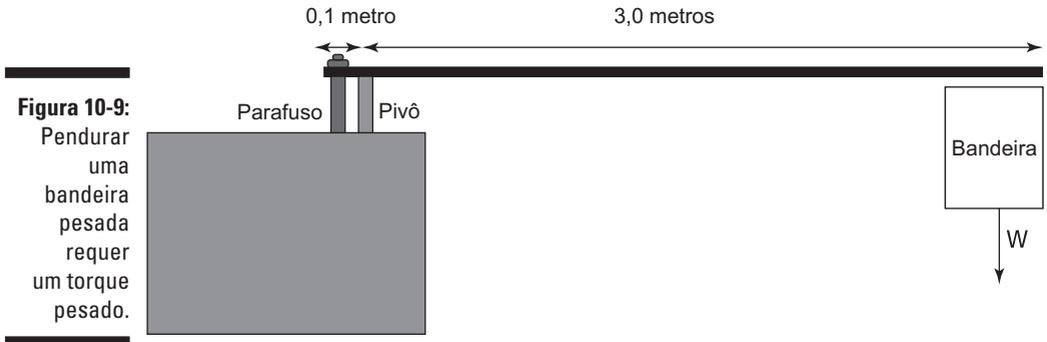


Figura 10-9:
Pendurar uma bandeira pesada requer um torque pesado.

Para descobrir quanta força o parafuso precisa fornecer, você começa tirando medidas e nota que a bandeira tem uma massa de 50 kg – muito mais do que a massa do mastro – e que o gerente tinha pendurado anteriormente a 3,0 metros do ponto pivô. O parafuso está a 10 cm a partir do ponto pivô. Para conseguir um equilíbrio rotacional, você precisa ter um torque resultante zero:

$$\sum \tau = 0$$

Em outras palavras, se o torque devido à bandeira for τ_1 e o torque devido ao parafuso for τ_2 ,

$$\sum \tau = 0 = \tau_1 + \tau_2$$

Quais são os torques envolvidos aqui? Você sabe que o peso da bandeira fornece um torque em torno do ponto pivô, τ_1 , portanto,

$$\tau_1 = mgl_1$$

onde m é a massa do mastro, g é a aceleração devido à gravidade e l_1 é o braço da alavanca para a bandeira. Relacionar os números fornecerá

$$\tau_1 = mgl_1 = (50)(-9,8)(3,0) = -1,470\text{N}\cdot\text{m}$$

Note que é um torque negativo porque a aceleração devido à gravidade está apontando para baixo. E o torque devido ao parafuso, τ_2 ? Como em qualquer torque, você pode escrever τ_2 como

$$\tau_2 = F_2 l_2$$

Relacionar o máximo de números que você conhece fornecerá

$$\tau_2 = F_2 l_2 = F_2(0,10)$$

Como você deseja o equilíbrio rotacional, a seguinte condição deve manter-se:

$$\sum \tau = 0 = \tau_1 + \tau_2$$

Em outras palavras, os torques devem equilibra-se, portanto,

$$\tau_2 = -\tau_1$$

significando que

$$\tau_2 = -\tau_1 = 1.470\text{N}\cdot\text{m}$$

Agora, você finalmente pode ter sua resposta:

$$\tau_2 = F_2 l_2 = F_2(0,10) = 1.470\text{N}\cdot\text{m}$$

Colocar F_2 em um lado e resolver a equação fornecerá

$$F_2(0,10) / 0,10 = 1.470\text{N}\cdot\text{m} / 0,10 = 14.700\text{N}$$

O parafuso precisa fornecer pelo menos 14,700N de força ou cerca de 330 libras.

Segurança da escada: Introduzindo o atrito no equilíbrio rotacional

O proprietário da loja de hardware da seção anterior procurou você de novo para pedir ajuda em outro problema. Um balconista subiu até quase o topo de uma escada para pendurar um letreiro para uma futura venda da empresa. O proprietário não quer que a escada escorregue – ação judicial, ele explica – portanto, pergunta a você se a escada irá cair.

A situação aparece na Figura 10-10. A pergunta é: a força do atrito impedirá a escada de se mover se θ for 45° e o coeficiente do atrito estático (ver Capítulo 6) com o piso for de 0,7?

Você tem que trabalhar com as forças resultantes para determinar o torque geral. Você anota o que sabe (pode supor que o peso da escada está concentrado no meio):

- ✓ F_w = A força exercida pela parede na escada
- ✓ W_c = O peso do balconista = 450N
- ✓ W_l = O peso da escada = 200N
- ✓ F_f = A força de atrito que mantém a escada no lugar
- ✓ F_n = A força normal (ver Capítulo 6)

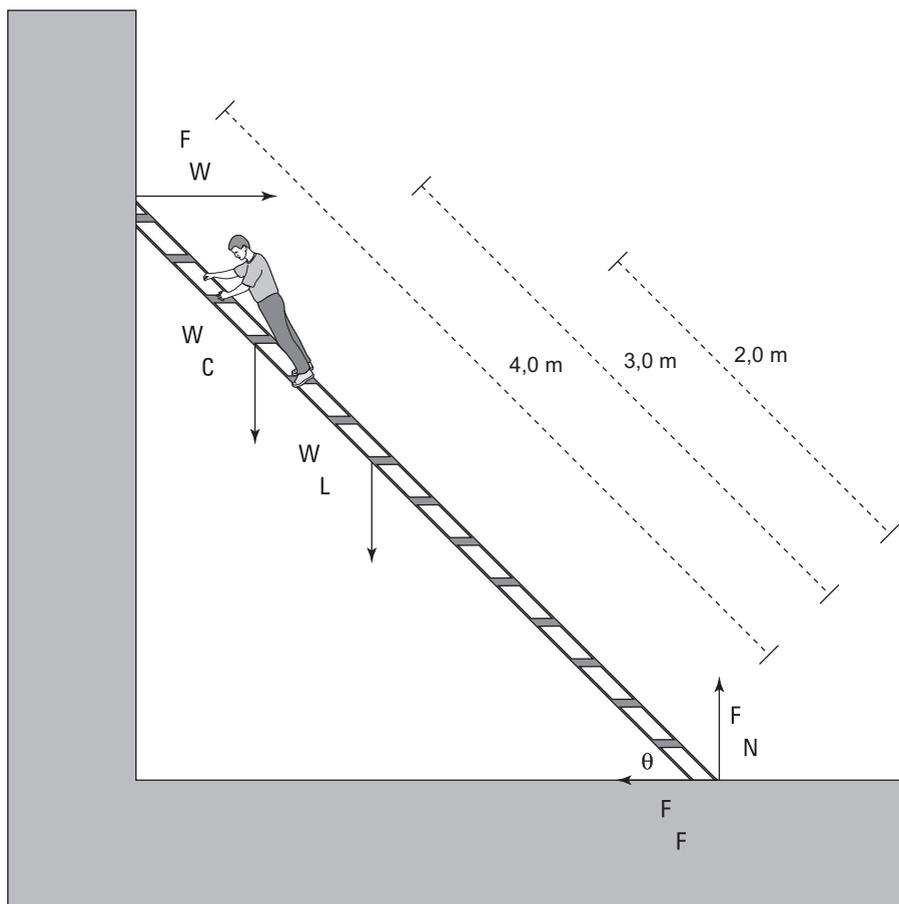


Figura 10-10:
Manter a escada na vertical requer atrito e equilíbrio rotacional.



Você precisa determinar a força necessária do atrito aqui e deseja que a escada esteja em equilíbrio linear e rotacional. O equilíbrio linear informa que a força exercida pela parede na escada, F_w , deve ser igual a força do atrito na grandeza, mas oposta na direção, pois são as duas únicas forças horizontais. Portanto, se você puder encontrar F_w , saberá qual precisa ser a força de atrito F_f , que é seu objetivo aqui.

Você sabe que a escada está em equilíbrio rotacional, significando que

$$\Sigma\tau = 0$$

Para encontrar F_w , veja os torques em volta da parte inferior da escada, usando esse ponto como o pivô. Todos os torques em volta do ponto pivô têm que somar dando zero. O torque devido à força da parede contra a escada (veja a seção “Descobrimo o torque gerado” para saber mais sobre os ângulos) é

$$-F_w (4,0\text{m}) \text{ sen } 45^\circ = -2,83 F_w$$

Note que F_w é negativo, pois tende a produzir um movimento para a direita. O torque devido ao peso do balconista é

$$W_c (3,0\text{m}) \cos 45^\circ = (450\text{N})(3,0\text{m})(0,707) = 954\text{N}\cdot\text{m}$$

O torque devido ao peso da escada é

$$W_L (4,0\text{m}) \cos 45^\circ = (200\text{N})(2,0\text{m})(0,707) = 283\text{N}\cdot\text{m}$$

Ambos os torques são positivos; como $\Sigma\tau = 0$, você obtém o seguinte resultado quando soma todos os torques:

$$\Sigma\tau = 954 \text{ N}\cdot\text{m} + 283 \text{ N}\cdot\text{m} - 2,83 F_w = 0$$

Você pode adicionar $2,83 F_w$ a cada lado e, então, dividir por 2,83 para obter

$$F_w = (954 \text{ N}\cdot\text{m} + 283 \text{ N}\cdot\text{m}) / 2,83 = 437\text{N}$$

A força que a parede exerce na escada é de 437N, que também é igual à força de atrito da parte inferior da escada no piso, pois F_w e a força de atrito são as únicas duas forças horizontais no sistema inteiro. Portanto,

$$F_f = 437\text{N}$$

Você tem a força de atrito necessária. Mas o que você realmente tem? A equação básica para o atrito (como descrito no Capítulo 6) informa que

$$F_{\text{Freal}} = \mu_s F_N$$

onde μ_s é o coeficiente do atrito estático e F_N é a força normal do piso empurrando para cima a escada, que deve equilibrar todas as forças que apontam para baixo neste problema, por causa do equilíbrio linear. Isso significa que

$$F_N = W_C + W_L = 450\text{N} + 200\text{N} = 650\text{N}$$

Relacionando isto com a equação para F_{Freal} e usando o valor de μ_s , 0,7, você obterá o seguinte:

$$F_{\text{Freal}} = \mu_s F_N = (0,7)(650) = 455\text{N}$$

Você precisa de 437N de força e, na verdade, tem 455N. Boa notícia – a escada não irá escorregar.

Capítulo 11

Circule e Circule com a Dinâmica Rotacional

Neste Capítulo

- ▶ Convertendo o pensamento linear de Newton no pensamento rotacional
- ▶ Utilizando o momento de inércia
- ▶ Encontrando o equivalente angular do trabalho
- ▶ Vendo a energia cinética rotacional causada pelo trabalho
- ▶ Conservando a cinética angular

Este capítulo é sobre aplicar forças e ver o que acontece no mundo rotacional. Você descobre o que a segunda lei de Newton (força igual a massa vezes aceleração, ver Capítulo 5) torna-se para o movimento rotacional, como a inércia entra em cena no movimento rotacional e tem a história sobre a energia cinética rotacional, trabalho rotacional e cinética angular. Todas essas rotações aparecem neste capítulo e você descobre suas evidências.

Enrolando a Segunda Lei de Newton no Movimento Angular

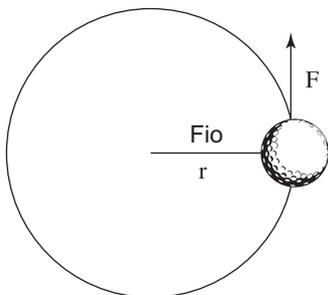
A segunda lei de Newton, força igual a massa vezes aceleração ($F = ma$; ver Capítulo 5), é a favorita da Física no mundo linear porque se relaciona com a força vetorial e a aceleração (veja o Capítulo 4 para saber mais sobre os vetores). Mas se você tiver que falar em termos de cinética angular, ao invés de movimento linear, o que acontece? Você pode colocar Newton girando?

O Capítulo 10 explicou que existem equivalentes (ou *análogos*) para as equações lineares na cinética angular. Portanto, qual é o análogo angular para $F = ma$? Você pode adivinhar que F , a força linear, torna-se τ ou torque, depois de ler sobre o torque no Capítulo 10 e estaria no caminho certo. Você também pode adivinhar que a , a aceleração linear, torna-se α , a aceleração angular, e estaria certo.

Mas e m ? Qual é o análogo angular da massa? A resposta é a inércia e você chega a essa resposta convertendo a aceleração tangencial em aceleração angular. Sua conclusão final é $\sum \tau = I\alpha$, a forma angular da segunda lei de Newton. Mas estou adiantando-me.

Você pode iniciar o processo de conversão linear em angular com um exemplo simples. Digamos que você esteja girando uma bola em um círculo através de um fio, como mostrado na Figura 11-1. E digamos que você aplique uma força tangencial (no círculo) na bola, fazendo-a aumentar de velocidade (lembre que isso é uma força tangencial, não uma direcionada ao centro do círculo, como quando você tem uma força centrípeta; ver Capítulo 10).

Figura 11-1:
A força tangencial aplicada em uma bola movendo-se em círculo.



Comece dizendo que

$$F = ma$$

Para converter isso em termos de quantidades angulares, como, por exemplo, torque, multiplique pelo raio do círculo, r :

$$Fr = mra$$

Como você está aplicando a força tangencial na bola neste caso, a força e o raio do círculo estão em ângulos retos (ver Figura 11-1), portanto, você pode dizer que Fr é igual ao torque:

$$Fr = \tau = mra$$

Agora, você terminou parcialmente a transição para o movimento rotacional. Ao invés de trabalhar com a força linear, você está trabalhando com o torque, que é o análogo rotacional da força linear.

Convertendo a aceleração tangencial na aceleração angular

Para ir do movimento linear para o movimento angular, você tem que converter a , a aceleração tangencial, em α , a aceleração angular. Ótimo, mas como você faz a conversão? Se você leu com atenção

o Capítulo 10, sabe que a aceleração angular é uma força que você pode multiplicar pelo raio para obter o equivalente linear, que neste caso é a aceleração tangencial:

$$a = r\alpha$$

Substituir $a = r\alpha$ na equação para obter o equivalente angular da segunda lei de Newton (veja a seção anterior), $F_r = \tau = mra$, fornecerá

$$\tau = rm(r\alpha) = mr^2\alpha$$

Agora, você relacionou o torque à aceleração angular, que é o que precisa para ir do movimento linear para o movimento angular. Mas o que é mr^2 na equação? É o análogo rotacional da massa, oficialmente chamado de *momento da inércia*.

Decompondo o momento de inércia

Para ir da força linear, $F = ma$, para o torque (o equivalente angular da força linear), você tem que encontrar o equivalente angular da aceleração e da massa. Na seção anterior, você encontrou a aceleração angular. Nesta seção, encontrará o análogo rotacional para a massa, conhecido como momento de inércia: mr^2 . Na Física, o símbolo para a inércia é I , portanto, você pode escrever a equação para a aceleração angular como a seguir:

$$\sum\tau = I\alpha$$

\sum significa “somatório de”, portanto, $\sum\tau$, significa torque resultante. As unidades do momento de inércia são $\text{kg}\cdot\text{m}^2$. Note como esta equação é parecida com a equação para a força resultante:

$$\sum F = ma$$



$\sum\tau = I\alpha$ é a forma angular da segunda lei de Newton para os corpos em rotação: o torque resultante é igual ao momento da inércia multiplicado pela aceleração angular.

Agora, você pode colocar a equação em funcionamento. Digamos, por exemplo, que você esteja girando a bola de 45 g da Figura 11-1 em um círculo de 1,0 metro e deseja aumentar a velocidade em 2π radianos por segundo², as unidades oficiais da aceleração angular. Que tipo de torque você precisa? Você sabe que

$$\tau = I\alpha$$



Você pode tirar o símbolo Σ da equação quando está trabalhando com apenas um torque, significando que a “soma dos” torques é o único torque com o qual está trabalhando.

O momento da inércia é igual a mr^2 , assim

$$\tau = I\alpha = mr^2\alpha$$

Relacionar os números e usar o sistema metros-quilogramas-segundos (MKS) fornecerá

$$\tau = I\alpha = mr^2\alpha = (0,045)(1,0)^2(2\pi) = 9\pi \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$$

Sua resposta, $9\pi \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$ é 0,28 Newton-metro de torque. Determinar o torque necessário no movimento angular é muito parecido com receber uma massa e uma aceleração necessárias e determinar a força do movimento linear.

Examinando os Momentos de Inércia

Calcular os momentos de inércia será bem simples se você tiver apenas que examinar o movimento de objetos esféricos, como, por exemplo, bolas de golfe, que têm um raio consistente. Para a bola de golfe, o momento de inércia depende do raio do círculo no qual ele está girando:

$$I = mr^2$$

Aqui, r é o raio no qual toda a massa da bola de golfe está concentrada. Porém, mexer nos números poderá ficar um pouco confuso quando você entra no mundo não das bolas de golfe, pois você pode não estar certo de qual raio deve usar. Por exemplo, e se você estiver girando uma vara? Toda a massa da vara não está concentrada em um único raio. O problema que você encontra é que quando tem um objeto estendido, tal como uma vara, cada parte da massa está em um raio diferente. Você não tem uma maneira fácil de trabalhar com isso, portanto, tem que somar a contribuição de cada partícula da massa em cada raio diferente assim:

$$\Sigma I = mr^2$$

Portanto, se você tiver uma bola de golfe no raio r_1 e outro no r_2 , o momento total da inércia será

$$I = \Sigma mr^2 = m(r_1^2 + r_2^2)$$

Então, como você encontra o momento da inércia de, digamos, um disco girando em um eixo preso em seu centro? Você tem que dividir o disco em esferas minúsculas e somá-las. Vários físicos já

fizeram isso; forneço uma lista dos objetos que provavelmente você encontrará e seus momentos de inércia, na Tabela 11-1.

Tabela 11-1: Momentos avançados de inércia

<i>Objeto</i>	<i>Momento de inércia</i>
Disco girando em seu centro (como um pneu)	$I = (\frac{1}{2}) mr^2$
Cilindro côncavo girando em seu centro (como um pneu)	$I = mr^2$
Esfera côncava	$I = (\frac{2}{3}) mr^2$
Aro girando em seu centro (como uma roda gigante)	$I = mr^2$
Massa pontual girando no raio r	$I = mr^2$
Retângulo girando em torno de um eixo ao longo de uma borda	$I = (\frac{1}{3}) mr^2$
Retângulo girando em torno de um eixo paralelo à borda e passando pelo centro	$I = (\frac{1}{12}) mr^2$
Vara girando em um eixo perpendicular, através de seu centro	$I = (\frac{1}{12}) mr^2$
Vara girando em torno de um eixo perpendicular, através de uma extremidade	$I = (\frac{1}{3}) mr^2$
Cilindro sólido	$I = (\frac{1}{2}) mr^2$
Esfera sólida	$I = (\frac{2}{5}) mr^2$

Verifique os seguintes exemplos para ver os momentos avançados de inércia em ação.

CD players e torque: um exemplo de inércia

Eis um fato interessante sobre os CD players: eles realmente fazem o CD girar em velocidades angulares diferentes para manter o CD sob a cabeça do laser, que se move em velocidade linear constante. Por exemplo, digamos que um CD tenha uma massa de 30 gramas e um diâmetro de 12 centímetros, e que começa em 700 rotações por segundo quando você pressiona a tecla play e cai para cerca de 200 rotações por segundo no final do CD, 50 minutos mais tarde. Qual é o torque médio necessário para criar essa desaceleração? Você começa com a equação do torque:

$$\tau = I\alpha$$

A partir da Tabela 11-1, você sabe que

$$I = (\frac{1}{2})mr^2$$

porque o CD é um disco girando em torno do seu centro. O diâmetro do CD é de 12 cm, assim, o raio tem 6 cm. Colocar em números fornecerá

$$I = (\frac{1}{2})mr^2 = (\frac{1}{2})(0,003)(0,06)^2 = 5,4 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

E a aceleração angular, α ? No Capítulo 10, forneço o equivalente angular da equação para a aceleração linear:

$$\alpha = \Delta\omega / \Delta t$$

Para este problema, você precisa encontrar a velocidade angular final menos a velocidade angular inicial para conseguir a aceleração angular:

$$\alpha = (\omega_f - \omega_o) / \Delta t$$

Você pode relacionar o número para obter o tempo:

$$\Delta t = 50 \text{ minutos} = 1.500 \text{ segundos}$$

Então, e ω_f e ω_o ? Você sabe que a velocidade angular inicial é 700 rotações por segundo, portanto, em termos de radianos por segundo, você obtém

$$\omega_o = 700 \text{ rotações por segundo} \times 2\pi \text{ radianos por rotação} = 1.400\pi \text{ radianos por segundo}$$

Do mesmo modo, poderá obter a velocidade angular final assim:

$$\omega_f = 200 \text{ rotações por segundo} \times 2\pi \text{ radianos por rotação} = 400\pi \text{ radianos por segundo}$$

Agora, você pode ligar os números:

$$\begin{aligned} \alpha &= \Delta\omega / \Delta t = (\omega_f - \omega_o) / \Delta t = (400\pi - 1.400\pi) / 1.500 = -1.000\pi / 1.500 \\ &= -2,09 \text{ rad por segundo}^2 \end{aligned}$$

Você encontrou o momento de inércia e a aceleração angular, portanto, agora, pode encontrar o torque:

$$\tau = I\alpha = (5,4 \times 10^{-5})(-2,09) = -1,13 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$$

O torque médio é $-1,13 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}$. Quanta força é aplicada quando aplicado na borda externa – ou seja, no raio de 6 cm? Torque = força vezes o raio, portanto,

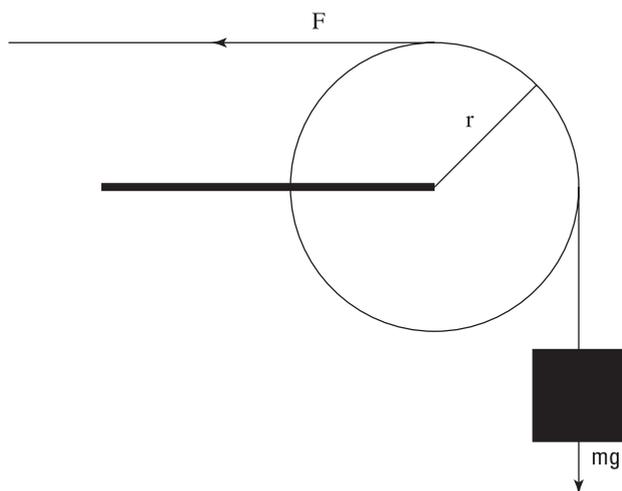
$$F = \tau / r = -1,13 \times 10^{-4} / 0,06 = 1,88 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Isto se converte em cerca de $4,23 \times 10^{-4}$ libras, ou mais ou menos $6,77 \times 10^{-4}$ onças de força. Não é necessária muita força, então para diminuir a velocidade do CD.

Aceleração angular e torque: outro exemplo de inércia

Nem sempre você pode ver um objeto em movimento e pensar: “movimento angular”, como faz ao ver um CD girando. Peça a alguém para levantar um objeto com uma corda em um sistema de roldanas, por exemplo. A corda e o objeto estão movendo-se de um modo linear, mas a roldana tem um movimento angular. Eis um exemplo para ajudar a lidar com a velocidade com a qual os objetos giram para cima (ou para baixo) quando você lhes aplica um torque. Digamos que você esteja puxando uma massa de 16 kg na vertical, usando uma roldana com uma massa de 1 kg e raio de 10 cm, como mostrado na Figura 11-2. Você está puxando com uma força de 200N; qual é a aceleração angular da roldana?

Figura 11-2: Você aplica o torque e o movimento angular, da roldana, para elevar os objetos em um sistema de roldanas.



Você usa a equação para o torque, inclusive o símbolo de somatória, Σ , porque está lidando com mais de um torque neste problema (você sempre usa o torque resultante, mas muitos problemas têm apenas um torque, portanto, o símbolo é omitido):

$$\Sigma\tau = I\alpha$$

onde $\Sigma\tau$ significa torque resultante. Neste caso, existem dois torques, τ_1 e τ_2 . Então,

$$\alpha = \Sigma\tau / I = (\tau_1 + \tau_2) / I$$

As duas forças atuam no raio de 10,0 cm, portanto, os dois torques são

$$\tau_1 = Fr, \text{ com } F \text{ como a força e } r \text{ como o raio}$$

$$\tau_2 = -mgr, \text{ com } m \text{ como a massa e } g \text{ como a aceleração devido à gravidade}$$

O suporte da roldana passa pelo eixo da rotação, portanto, nenhum torque vem dele. Relacionar os números fornecerá

$$\tau_1 = Fr = (200)(0,10) = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\tau_2 = -mgr = -(16)(9,8)(0,10) = -15,68 \text{ N}\cdot\text{m}$$

O torque resultante é $20 + (-15,68) = 4,32 \text{ N}\cdot\text{m}$. O resultado é positivo, portanto, a roldana irá girar para a esquerda, em direção aos ângulos maiores, significando que a massa subirá.

Para encontrar a aceleração angular da roldana, você precisa saber seu momento de inércia. A partir da Tabela 11-1, você sabe que para um disco como uma roldana, o momento é $I = (\frac{1}{2})mr^2$, portanto,

$$I = (\frac{1}{2})mr^2 = (\frac{1}{2})[(1,0)(0,10)^2] = 5,0 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Você tem tudo que precisa para encontrar a aceleração angular:

$$\alpha = \Sigma\tau / I = 4,32 / 5,0 \times 10^{-3} = 864 \text{ radianos por segundo}^2$$

Envolvendo sua Cabeça no Trabalho Rotacional e na Energia Cinética

Um grande jogador na partida da força linear é o *trabalho* (ver Capítulo 8); a equação para o trabalho é trabalho = força vezes distância. O trabalho tem um análogo rotacional – mas como você pode relacionar uma força linear atuando em certa distância à ideia de trabalho rotacional? Você converte força em torque, seu equivalente angular, e distância em ângulo. Mostro como, nas seguintes seções, e o que acontece quando você faz um trabalho girando um objeto, criando um movimento rotacional – o mesmo que acontece quando se faz um trabalho em movimento linear: você produz energia.

Fazendo algum trabalho rotacional

Imagine que uma engenheira automobilística esteja contemplando uma nova ideia no design de carros. O que ela deseja criar é algo com responsabilidade ambiental e arrojado – algo nunca visto antes na indústria.

Em uma explosão de inspiração, a resposta surge – não apenas a resposta para seus sonhos automobilísticos, mas também sua resposta para como relacionar o trabalho linear ao trabalho rotacional. Veja a Figura 11-3, onde esbocei a solução inteira. O que ela deve fazer é colocar um fio em volta do pneu do carro de modo que o motorista possa simplesmente puxar o fio para acelerar o carro! Isto permite dar um retorno para os motoristas sobre quanto trabalho ele está fazendo.

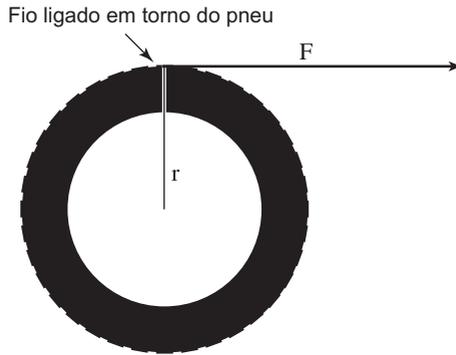


Figura 11-3:
Exercendo
uma força
para girar
um pneu.

Trabalho é a quantidade de força aplicada em um objeto, multiplicada pela distância na qual é aplicada. Neste caso, os motoristas aplicam uma força F e aplicam essa força com um fio. Bingo! O fio é o que permite fazer uma transição útil entre o trabalho linear e o rotacional. Portanto, quanto trabalho é feito? Use a equação

$$W = Fs$$

onde s é a distância sobre a qual o motorista aplica a força. Neste caso, a distância s é igual ao raio multiplicado pelo ângulo através do qual a roda gira, $s = r\theta$, portanto, você obtém

$$W = Fs = Fr\theta$$

Porém, o torque, τ , é igual a Fr neste caso, pois o fio está atuando em ângulos retos ao raio (ver Capítulo 10). Portanto, você fica com

$$W = Fs = Fr\theta = \tau\theta$$

O trabalho realizado, W , girando a roda com um fio e um torque constante é $\tau\theta$. Isso faz sentido porque o trabalho linear é Fs e para converter em trabalho rotacional, você converte a força em torque e a distância em ângulo. As unidades aqui são as unidades padrões para o trabalho – Joules no sistema MKS, por exemplo.



Note que você tem que fornecer o ângulo em radianos para que a conversão entre o trabalho linear e o trabalho rotacional fique correta.

Por exemplo, digamos que você tenha um avião que usa hélices para voar e deseja determinar quanto trabalho o motor do avião faz em uma hélice ao aplicar um torque constante de 600 N-m sobre 100 rotações. Você começa com

$$W = \tau\theta$$

Uma rotação completa é de 2π radianos, portanto, relacionar os números na equação fornecerá

$$W = \tau\theta = (600)(100 \times 2\pi) = 3.77 \times 10^5 \text{ J}$$

O motor do avião faz $3,77 \times 10^5$ Joules de trabalho. Mas o que acontece quando você coloca muito trabalho ao rodar um objeto? O objeto começa a girar. E, exatamente como no trabalho linear, o trabalho feito torna-se *energia*.

Controlando a energia cinética rotacional

Quando um objeto está girando, todas as suas partes estão em movimento, significando que a energia cinética está em trabalho. Contudo, você tem que converter o conceito linear de energia cinética para o conceito rotacional de energia cinética. Você pode calcular a energia cinética de um corpo no movimento linear com a seguinte equação (ver Capítulo 8):

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

onde m é a massa do objeto e v^2 é o quadrado de sua velocidade. Isso se aplica a todo objeto que está girando – cada pedacinho de massa tem sua energia cinética.



Para converter a versão linear para a versão rotacional, você tem que converter de massa para momento de inércia, I , e velocidade para velocidade angular, ω .

Você pode ligar a velocidade tangencial de um objeto à sua velocidade angular assim (ver Capítulo 10):

$$v = r\omega$$

onde r é o raio e ω é sua velocidade angular. Fazer a relação com a equação anterior fornecerá

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m(r^2\omega^2)$$

A equação parece boa até então, mas lembre-se de que será verdadeira apenas para uma única parte da massa sob análise – toda a outra parte da massa poderá ter um raio diferente, por exemplo, portanto, você ainda não terminou. Você tem que somar a energia cinética de cada parte da massa assim:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum (mr^2\omega^2)$$

Você pode estar imaginando se pode simplificar essa equação. Bem, pode começar notando que mesmo que cada parte da massa possa ser diferente e estar em um raio diferente, cada parte tem a mesma velocidade angular (elas giram através do mesmo ângulo ao mesmo tempo). Portanto, você pode tirar o ω da soma:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum (mr^2) \omega^2$$

Isto torna a equação muito mais simples, pois o momento de inércia, I (veja a seção “Enrolando a Segunda Lei de Newton no movimento angular” anteriormente neste capítulo), é igual a $\sum (mr^2)$. Fazer essa substituição irá tirar da equação todas as dependências no raio individual de cada parte da massa, fornecendo

$$E_c = \frac{1}{2} \sum (mr^2) \omega^2 = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Agora, você tem uma equação simplificada para a energia cinética rotacional. A equação é útil, pois a energia cinética rotacional está em todo lugar. Um satélite girando no espaço tem energia cinética rotacional. Um barril de cerveja rolando rampa abaixo tem energia cinética rotacional. O último exemplo (nem sempre com os caminhões de cerveja, claro) é um processo comum nos problemas de Física.

Medindo a energia cinética rotacional em uma rampa

Os objetos podem ter energias cinéticas linear e rotacional. Este fato é importante se você pensar, pois quando os objetos começam a descer rampas, qualquer habilidade anterior com rampas que você tenha sai pela janela. Por quê? Porque quando um objeto desce uma rampa ao invés de deslizar, parte de sua energia potencial gravitacional (ver Capítulo 8) entra em sua energia cinética linear e parte entra em sua energia cinética rotacional.

Veja a Figura 11-4, onde você está opondo um cilindro sólido contra um cilindro côncavo em uma corrida rampa abaixo. Cada objeto tem a mesma massa. Qual cilindro irá vencer?

Você pode reformular essa pergunta como: Qual cilindro terá a velocidade mais alta na parte inferior da rampa? A aceleração de cada cilindro será constante, portanto, aquele com a velocidade final mais alta será o que viajou mais rapidamente. Ao ver apenas o movimento linear, você pode lidar com um problema, como este, definindo a energia cinética final como sendo igual à energia potencial (supondo nenhum atrito!) assim:

$$E_c = E_p \text{ (energia potencial)} = \frac{1}{2} mv^2 = mgh$$

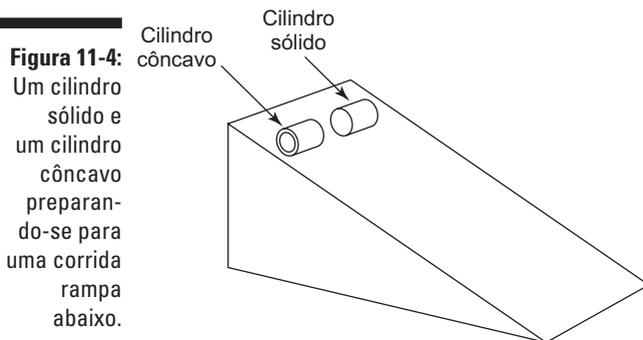


Figura 11-4: Um cilindro sólido e um cilindro côncavo preparando-se para uma corrida rampa abaixo.

onde m é a massa do objeto, g é a aceleração devido à gravidade e h é sua altura. Isso permitiria determinar a velocidade final. Mas a situação é diferente agora porque os cilindros estão rolando, o que significa que a energia potencial gravitacional inicial torna-se a energia cinética linear e a energia cinética rotacional. Agora, você pode escrever a equação como

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2$$

Você pode relacionar v e ω com a equação $v = r\omega$, que significa que $\omega = v / r$, portanto,

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I(v^2 / r^2)$$

Você deseja tirar v da equação, assim, tenta agrupar as coisas:

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I(v^2 / r^2) = \frac{1}{2}(m + I / r^2)v^2$$

Isolando v , você obterá

$$v = \sqrt{\frac{2mgh}{m + I/r^2}}$$

Em que essa equação se decompõe quando você substitui os dois momentos diferentes de inércia? Para um cilindro côncavo, o momento de inércia é igual a mr^2 , como pode ver na Tabela 11-1. Para um cilindro sólido, por outro lado, o momento de inércia é igual a $(\frac{1}{2})mr^2$. Substituir I para o cilindro côncavo fornecerá

$$v = \sqrt{gh}$$

Substituir I para o cilindro sólido fornecerá

$$v = \sqrt{\frac{4gh}{3}}$$

Agora, a resposta fica clara. O cilindro sólido será

$$\sqrt{\frac{4}{3}}$$

vezes tão rápido quanto o cilindro côncavo ou cerca de 1,15 vezes tão rápido, portanto, o cilindro sólido vencerá.



Faz sentido, intuitivamente, que o cilindro sólido nesta seção vença a corrida? Faz, pois o cilindro côncavo tem muito mais massa concentrada em um raio grande que o cilindro sólido tem distribuído, a partir do centro até esse raio. Com essa massa grande na borda, o cilindro côncavo não precisará ir tão rapidamente para ter tanta energia cinética rotacional como o cilindro sólido.

Isto não Pode Parar: Cinética Angular

Imagine um satélite de 40 toneladas girando em órbita em torno da Terra. Você pode querer pará-lo para realizar alguma manutenção, mas quando chega a hora de pegá-lo, para e considera a situação. Requer muito esforço parar esse satélite que gira. Por quê? Porque ele tem *quantidade de movimento angular*.

No Capítulo 9, falei sobre a quantidade de movimento linear, p , que é igual ao produto da massa e da velocidade:

$$p = mv$$

A Física também representa a quantidade de movimento angular. Sua letra, L , tem pouca relação com a palavra “quantidade de movimento” como a letra p tem. A equação para a quantidade de movimento angular fica assim:

$$L = I\omega$$

onde I é o momento da inércia e ω é a velocidade angular.



Note que a quantidade de movimento angular é uma quantidade vetorial, significando que tem uma grandeza e uma direção, que aponta na mesma direção do vetor ω (ou seja, na direção do polegar de sua mão direita que aponta quando você coloca seus dedos na direção do objeto que está girando).

As unidades da quantidade de movimento angular são I multiplicado por ω ou $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ no sistema MKS (veja o Capítulo 2 para saber mais sobre os sistemas de medida).

O importante sobre a quantidade de movimento angular, assim como a quantidade de movimento linear, é que ela é conservada.

Revisando a conservação da cinética angular

O princípio de conservação da quantidade de movimento angular determina que ela será conservada se não houver nenhum torque resultante envolvido. Este princípio é útil em todos os tipos de problemas, geralmente onde você menos espera. Você pode encontrar exemplos óbvios, como, por exemplo, quando dois patinadores no gelo começam a se abraçar enquanto giram, e então, acabam afastados apenas pelo comprimento do braço. Dada sua velocidade angular inicial, você pode encontrar sua velocidade angular final, pois a quantidade de movimento angular é conservada, o que informa o seguinte como sendo verdade:

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

Se você puder encontrar o momento inicial da inércia e o momento final, tudo bem. Mas você também pode encontrar casos menos óbvios, onde o princípio de conservação da quantidade de movimento angular ajuda. Por exemplo, os satélites não têm que girar em órbitas circulares; eles podem girar em elipses. E quando fazem isso, a matemática pode ficar muito mais complicada. Felizmente para você, o princípio de conservação da quantidade de movimento angular pode tornar os problemas muito simples.

Órbitas do satélite: Um exemplo de conservação da quantidade de movimento angular

Digamos, por exemplo, que a NASA planejou colocar um satélite em órbita circular em torno de Plutão para fazer estudos, mas a situação ficou um pouco fora de controle e o satélite acabou com uma órbita elíptica. Em seu ponto mais próximo de Plutão, $6,0 \times 10^6$ metros, o satélite move-se a 9.000 metros por segundo.

O ponto mais distante do satélite de Plutão é $2,0 \times 10^7$ metros. Qual é sua velocidade nesse ponto? A resposta é difícil de descobrir, a menos que você possa propor um ângulo e esse ângulo seja a quantidade de movimento angular. Ela é conservada, pois não há nenhum torque externo com o qual o satélite deve trabalhar (a gravidade sempre age perpendicular ao raio orbital). Como a quantidade de movimento angular é conservada, você pode dizer que

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

Para uma massa pontual como um satélite (é uma massa pontual comparada com o raio de sua órbita em qualquer local), o momento da inércia, I , é igual a mr^2 (ver Tabela 11-1). A velocidade angular é igual a v/r , portanto, a equação é resolvida como

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 = mr_1v_1 = mr_2v_2$$

Você pode colocar v_2 em um lado da equação dividindo por mr_2 :

$$v_2 = (r_1v_1) / r_2$$

Você tem a solução; e não há nenhuma matemática extravagante envolvida, pois você pode contar com o princípio de conservação da quantidade de movimento angular para fazer o trabalho. Tudo que precisa fazer é relacionar os números:

$$v_2 = (r_1v_1) / r_2 = [(6,0 \times 10^6)(9.000)] / 2,0 \times 10^7 = 2.700 \text{ metros por segundo}$$

Em seu ponto mais próximo de Plutão, o satélite estará zunindo a 9.000 metros por segundo e, em seu ponto mais distante, estará movendo-se a 2.700 metros por segundo. Bem fácil de descobrir, desde que você tenha o princípio de conservação da quantidade de movimento angular na manga.

Capítulo 12

Molas: Movimento Harmônico Simples

Neste Capítulo

- ▶ Fechando o caso da lei de Hooke
- ▶ Revisando as notas básicas do movimento harmônico simples
- ▶ Acertando as notas avançadas do movimento harmônico simples
- ▶ Reunindo energia para o movimento harmônico simples
- ▶ Prevendo o movimento de pêndulo e o período

Neste capítulo, sacudo as coisas com um novo tipo de movimento: o movimento periódico, que ocorre quando os objetos estão saltando em molas, cabos elásticos ou até se movendo na extremidade de um pêndulo. Este capítulo é sobre a descrição do movimento periódico. Não só você pode descrever os movimentos em detalhes, como também pode prever quanta energia as molas agrupadas têm, quanto tempo levará para um pêndulo balançar e muito mais.

Conectando-se com a Lei de Hooke

Objetos como, por exemplo, molas que você pode estender, mas que retornam às suas formas originais são chamados *elásticos*. A elasticidade é uma propriedade valiosa – significa que você pode usar molas para todos os tipos de aplicações: como amortecedores em módulos lunares, como cronômetros em relógios de parede e de pulso e até como martelos em ratoeiras.

Voltando a 1600, Robert Hooke, um físico da Inglaterra, dedicou-se ao estudo dos materiais elásticos. Ele criou uma nova lei, sem surpresa alguma, chamada de *lei de Hooke*, que determina que esticar um material elástico fornece uma força que é diretamente proporcional à quantidade do alongamento realizado. Por exemplo, se você esticar uma mola em uma distância x , obterá uma força de volta que é diretamente proporcional a x :

$$F = kx$$

onde k é a constante da mola. Na verdade, a força F resiste à sua tração, portanto, ela puxa na direção oposta, significando que você deve ter um sinal negativo aqui:

$$F = -kx$$

Mantendo as molas esticadas



A lei de Hooke é válida desde que o material elástico, com o qual você está lidando, fique elástico – ou seja, ele fique dentro de seu *limite elástico*. Se você puxar demais uma mola, ela perderá sua capacidade de extensão, por exemplo. Em outras palavras, desde que uma mola fique dentro de seu limite elástico, você pode dizer que $F = -kx$, onde a constante k é chamada de *constante da mola*. As unidades da constante são Newtons por metro. Quando uma mola fica dentro de seu limite elástico, é chamada *mola ideal*.

Digamos, por exemplo, que um grupo de designers de carro bata à sua porta e pergunte se você pode projetar um sistema de suspensão. “Com certeza”, você diz. Eles informam que o carro terá uma massa de 1.000 kg e você tem quatro amortecedores, cada um com 0,5 metro de comprimento, com os quais trabalhar. Qual força as molas devem ter? Supondo que esses amortecedores usam molas, cada uma tem que suportar, no mínimo, um peso de 250 kg, que é

$$F = mg = (250)(9,8) = 2.450 \text{ Newtons}$$

onde F é igual à força, m é igual a massa do objeto e g é igual à aceleração devido à gravidade, 9,8 metros por segundo². A mola no amortecedor terá, no mínimo, que fornecer 2.450N de força na máxima compressão de 0,5 metro. Então, qual deve ser a constante da mola? A lei de Hooke diz

$$F = -kx$$

Omitindo o sinal negativo (como pode ser visto na seção a seguir), você obterá

$$k = F / x$$

É hora de relacionar os números:

$$k = F / x = 2.450\text{N} / 0,5 \text{ m} = 4.900 \text{ Newtons/metro}$$

As molas usadas nos amortecedores devem ter constantes de mola de, pelo menos, 4.900 Newtons por metro. Os designers de carro saem rapidamente, em êxtase, mas você chama-os: “Não se esqueçam, vocês precisam de pelo menos dobrar esse valor no caso de realmente desejarem que seu carro seja capaz de lidar com os buracos em potencial...”

Deduzindo que a lei de Hooke é uma força de restauração

O sinal negativo na lei de Hooke para uma mola elástica é importante:

$$F = -kx$$

O sinal negativo significa que a força irá opor-se ao seu deslocamento, como você vê na Figura 12-1, que mostra uma bola anexada a uma mola.

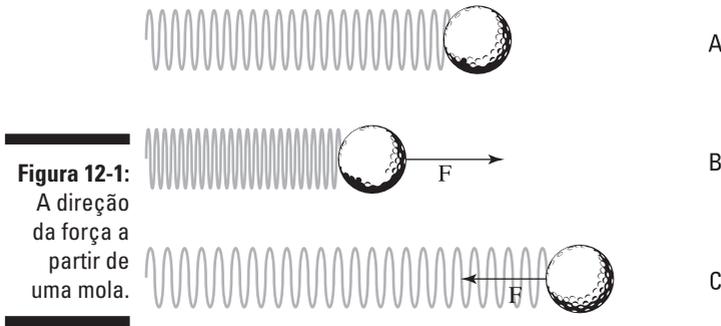


Figura 12-1:
A direção da força a partir de uma mola.

Como você pode ver na Figura 12-1, se a mola não estiver estendida ou comprimida, ela não exercerá nenhuma força na bola. Se você empurrar a mola, porém, ela empurrará para trás e se puxar a mola, ela puxará para trás.



A força exercida por uma mola é chamada de *força de restauração*. Ela sempre age de modo a se restaurar em direção ao equilíbrio.

Movendo-se com o Movimento Harmônico Simples

Um objeto sofre um *movimento harmônico simples* quando a força que tenta restaurar o objeto à sua posição de repouso é proporcional ao seu deslocamento. O movimento harmônico simples é simples porque as forças envolvidas são elásticas, significando que você pode supor que nenhum atrito está envolvido. As forças elásticas dão a entender que o movimento simplesmente continuará repetindo-se. Porém, isso não é realmente verdadeiro; até os objetos com molas param, depois de um tempo, quando o atrito e a perda de calor na mola cobram seus direitos. A parte harmônica do movimento harmônico simples significa que o movimento se repete – exatamente como a harmonia na música, onde as vibrações criam o som que você ouve.

Examinando os movimentos harmônicos simples horizontal e vertical

Veja a bola na Figura 12-1. Digamos, por exemplo, que você empurre a bola, comprimindo a mola e, então, solte; a bola irá mover-se rapidamente, estendendo a mola. Depois da extensão, a mola puxará de volta e passará novamente no ponto de equilíbrio (onde nenhuma força atua na bola), movendo-se para trás depois. Este evento acontece porque a bola tem inércia (ver Capítulo 11) e quando ela está movendo-se, requer alguma força para fazê-la parar. Estes são os vários estágios pelos quais a bola passa, coincidindo com as letras na Figura 12-1 (e supondo nenhum atrito):

- ✔ **Ponto A:** A bola está em equilíbrio e nenhuma força está atuando nela. Isto é chamado de *ponto de equilíbrio*, onde a mola não está estendida ou comprimida.
- ✔ **Ponto B:** A bola é empurrada contra a mola e ela revida com a força F , opondo-se a esse empurrão.
- ✔ **Ponto C:** A mola solta e a bola pula em uma distância igual, para o outro lado do ponto de equilíbrio. Nesse ponto, ela não está movendo-se, mas uma força atua nela, F , portanto, começa a voltar na outra direção.

A bola passa pelo ponto de equilíbrio em seu caminho de volta ao ponto B. Nesse ponto de equilíbrio, a mola não exerce nenhuma força sobre a bola, mas a bola está viajando em sua velocidade máxima. É isto que acontece quando uma bola de golfe salta para a frente e para trás; você empurra a bola para o ponto B, ela passa pelo ponto A, move-se para o ponto C, move-se de volta para A, vai para B etc.; B-A-C-A-B-A-C-A etc. O ponto A é o ponto de equilíbrio e os dois pontos B e C são equidistantes do ponto A.

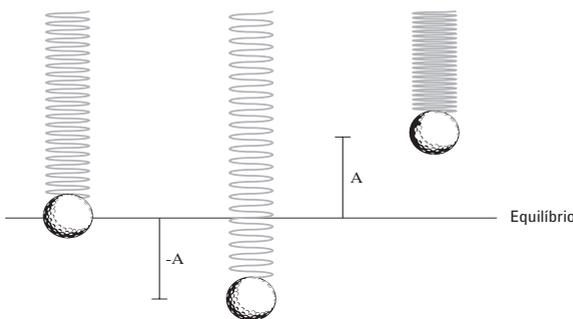
E se a bola na Figura 12-1 não estivesse em uma superfície horizontal sem atrito? E se ela ficasse pendurada na extremidade de uma mola no ar, como mostrado na Figura 12-2?

Neste caso, a bola oscila para cima e para baixo. Como quando a bola estava em uma superfície na Figura 12-1, ela oscilará em torno da posição de equilíbrio; desta vez, porém, a posição de equilíbrio não é o ponto onde a mola não está esticada.

A posição de equilíbrio é definida como a posição na qual nenhuma força resultante atua na bola. Em outras palavras, a posição de equilíbrio é o ponto onde a bola está em repouso. Quando a mola é mantida na vertical, o peso da bola para baixo é coincidido com a tração da mola para cima. Se a posição y da bola corresponder ao ponto de equilíbrio, y_0 , porque o peso da bola, mg , deve coincidir com a força exercida pela mola, $F = ky_0$, você terá

$$mg = ky_0$$

Figura 12-2:
Uma bola em
uma mola,
influenciada
pela
gravidade.



E você pode determinar y_0 :

$$y_0 = mg / k$$

Esta equação representa a distância na qual a mola se estenderá porque a bola está anexada a ela. Quando você puxa a bola para baixo ou levanta-a e, depois solta, ela oscila em torno da posição de equilíbrio, como mostrado na Figura 12-2. Se a mola for completamente elástica, a bola sofrerá um movimento harmônico simples na vertical em torno da posição de equilíbrio; a bola subirá a uma distância A e descerá a uma distância A em torno dessa posição (na vida real, a bola finalmente pararia na posição de equilíbrio).



A distância A , ou a altura na qual o objeto sobe, é importante ao descrever o movimento harmônico simples; é chamada de *amplitude*. Você pode descrever o movimento harmônico simples bem facilmente usando a matemática e a amplitude é uma parte importante disso.

Mergulhando mais no movimento harmônico simples

Calcular o movimento harmônico simples pode requerer tempo e paciência quando você tem que descobrir como o movimento de um objeto muda com o tempo. Imagine que um dia você tenha uma ideia brilhante para uma experiência. Você coloca um holofote para projetar a sombra de uma bola em uma parte móvel do filme fotográfico, como você vê na Figura 12-3. Como o filme está movendo-se, você consegue um registro do movimento da bola com o passar do tempo.

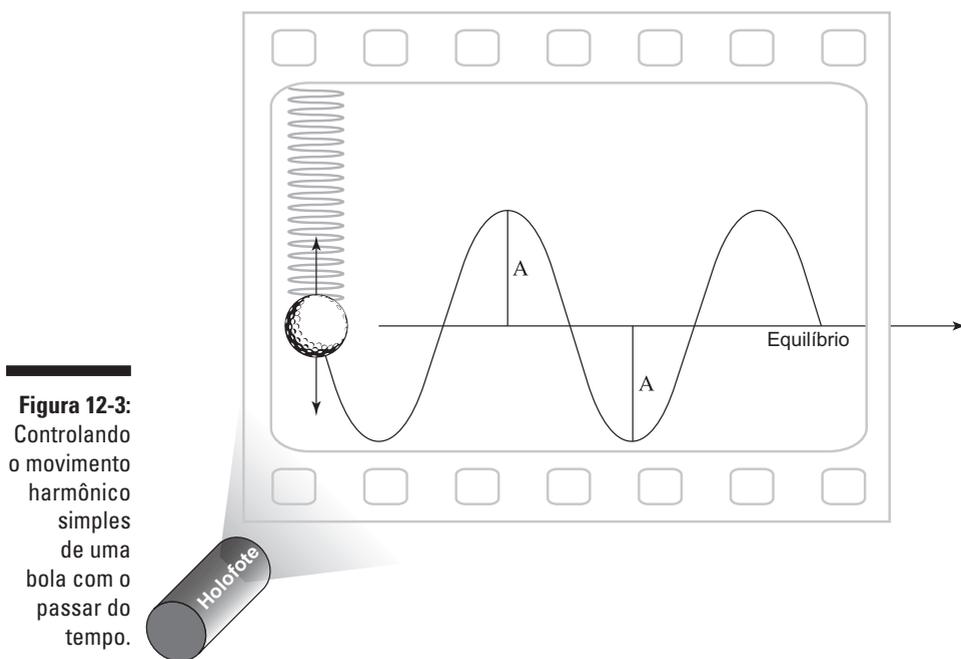


Figura 12-3: Controlando o movimento harmônico simples de uma bola com o passar do tempo.

Você liga o aparelho e deixa-o agir. Os resultados são mostrados na Figura 12-3 – a bola oscila em torno da posição de equilíbrio, para cima e para baixo, atingindo a amplitude A em seus pontos mais baixo e mais alto. Mas veja o caminho da bola. Perto do ponto de equilíbrio, é mais rápida, pois muita força a acelera. Nas partes superior e inferior, está sujeita a muita força, portanto, diminui de velocidade e inverte seu movimento.

Você deduz que o caminho da bola é uma *onda senoidal*, de amplitude A . Você também pode usar uma onda cossenoide, pois a forma é a mesma. A única diferença é que quando uma onda senoidal está em seu auge, a onda cossenoide está em zero e vice-versa.

Dividindo a onda senoidal

Você poderá conseguir uma imagem clara da onda senoidal se representar a função senoidal em um gráfico X-Y assim:

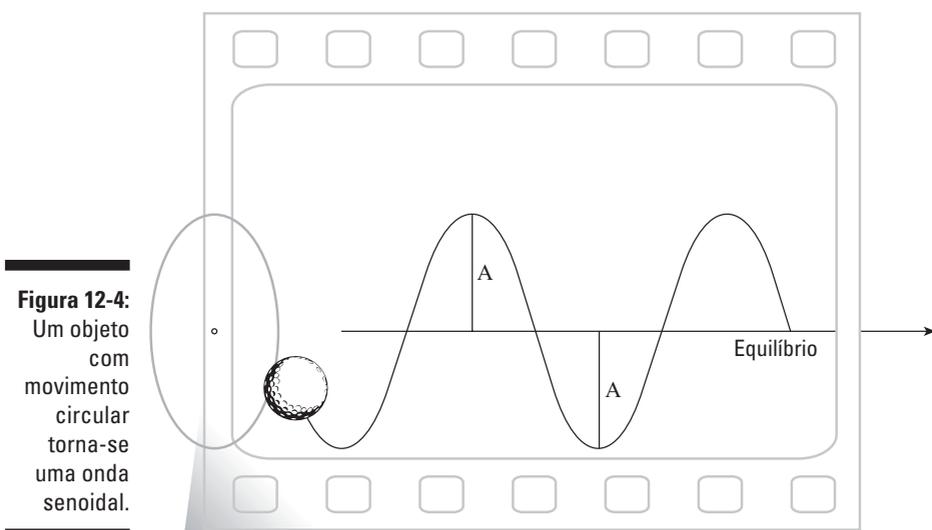
$$y = \text{sen}(x)$$

Você vê o tipo de forma na Figura 12-3 – uma onda senoidal – com a qual já pode estar familiarizado a partir de suas explorações da matemática ou em outros lugares, como, por exemplo, nas telas de monitores cardíacos. Veja a onda senoidal de um modo circular. Se a bola da Figura 12-3 fosse anexada a um disco giratório, como você vê na Figura 12-4, e você o iluminasse com um holofote, obteria o mesmo resultado de quando tem a bola pendurada em uma mola: uma onda senoidal.

O disco giratório geralmente é chamado de *círculo de referência*, que você pode ver na Figura 12-5. Na figura, a visão é de cima e a bola está grudada ao disco que gira. Os círculos de referência podem dizer muito sobre o movimento harmônico simples.

Quando o disco gira, o ângulo, θ , aumenta com o tempo. Como ficará a trajetória da bola no filme quando ele subir saindo da página? Você mesmo pode determinar o movimento da bola no eixo X; tudo que precisa é do componente X do movimento da bola. Em qualquer determinado momento, a posição X da bola será

$$x = A \cos \theta$$



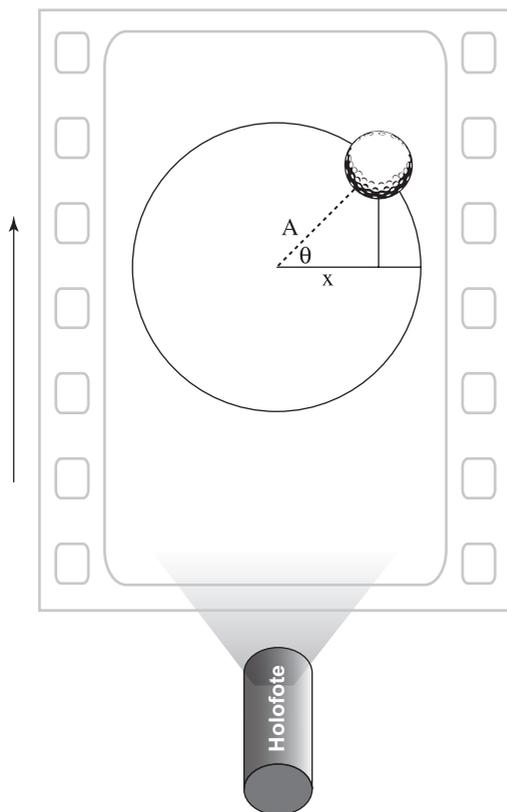


Figura 12-5:
Um círculo de referência ajuda a analisar o movimento harmônico simples.

Isto varia de A positivo ao A negativo em amplitude. Na verdade, você pode dizer que já sabe como θ mudará no tempo, pois $\theta = \omega \times t$, onde ω é a velocidade angular do disco e t é o tempo:

$$x = A \cos \theta = A \cos(\omega t)$$

Agora, você pode explicar qual será o caminho da bola quando o tempo passar, dado que o disco está girando com uma velocidade angular ω .

Obtendo o período

Sempre que um objeto se move em um círculo completo, ele completa um *ciclo*. O tempo que leva para completar o ciclo é chamado de *período*. A letra usada para o período é T e é medido em segundos.

Vendo a Figura 12-5, em termos do movimento X no filme, durante um ciclo, a bola se move de $X = A$ a $-A$ e, então, de volta para A . Na verdade, quando ela vai de qualquer ponto na onda senoidal (veja a seção anterior) e depois de volta para o mesmo ponto na onda senoidal, completa um ciclo. E o tempo que a bola leva para ir de uma certa posição, de volta para essa mesma posição, enquanto se move na mesma direção é seu período.

Como você pode relacionar o período a algo mais familiar? Quando um objeto se move em um círculo, vai em 2π radianos. Ele gira os muitos radianos em T segundos, portanto, sua velocidade angular, ω (ver Capítulo 10), é

$$\omega = 2\pi / T$$

Multiplicar os dois lados por T e dividir por ω permitirá que você relacione o período e a velocidade angular:

$$T = 2\pi / \omega$$

Porém, algumas vezes você fala em termos da frequência do movimento periódico, não em período. A *frequência* é o número de ciclos por segundo. Por exemplo, se o disco da Figura 12-4 girasse a 1.000 voltas completas por segundo, a frequência, f , seria de 1.000 ciclos por segundo. Os ciclos por segundo são também chamados de *Hertz*, abreviado como Hz, portanto, isso seria 1.000 Hz.

Então, como você conecta a frequência, f , ao período, T ? T é a quantidade de tempo que leva um ciclo, portanto, você obtém

$$f = 1 / T$$

Você achou que $\omega = 2\pi / T$, assim, pode modificar essa equação para obter o seguinte:

$$\omega = (2\pi / T) \times Tf = 2\pi f$$



Até então, você conhecia ω apenas como a velocidade angular. Mas quando está lidando com molas, não tem muitos ângulos envolvidos, portanto, ω é chamado de *frequência angular*.

Lembrando de não aumentar a rapidez sem a velocidade

Veja a Figura 12-5, onde uma bola está girando em um disco. Na seção “Dividindo a onda senoidal”, anteriormente neste capítulo, você descobriu que

$$x = A \cos (\omega t)$$

onde X significa a coordenada X e A significa a amplitude do movimento. Mas nessa seção, você não percebeu que outras forças estavam em vigor. Em qualquer ponto X , a bola tem velocidade, que varia com o tempo também. Portanto, como você descreve a velocidade matematicamente? Bem, você pode relacionar a velocidade tangencial à velocidade angular assim (ver Capítulo 10):

$$v = r\omega$$

onde r representa o raio. Como $r = A$, você obtém

$$v = r\omega = A\omega$$

Esta equação leva-o a algum lugar? Certamente, pois a sombra da bola no filme fornece um movimento harmônico simples. O vetor de velocidade (a direção da grandeza da velocidade; ver Capítulo 4) sempre aponta tangencialmente aqui, perpendicular ao raio, portanto, você obtém o seguinte para o componente X da velocidade em qualquer momento:

$$v_x = -A\omega \sin \theta$$

O sinal negativo aqui é importante, pois o componente X da velocidade da bola na Figura 12-5 aponta para a esquerda, em direção ao X negativo. E como a bola está em um disco giratório, você sabe que $\theta = \omega t$, então

$$v_x = -A\omega \sin \theta = -A\omega \sin (\omega t)$$



Esta equação descreve a velocidade de uma bola no movimento harmônico simples. Note que a velocidade muda com o tempo – de $-A\omega$ a 0, então, para $A\omega$ e novamente de volta. Assim, a velocidade máxima, que ocorre no ponto de equilíbrio, tem uma grandeza $A\omega$. Isto quer dizer, entre outras coisas, que a velocidade é diretamente proporcional à grandeza do movimento; quando a grandeza aumenta, também aumenta a velocidade e vice-versa.

Por exemplo, digamos que você esteja em uma expedição de Física observando uma equipe de intrépidos fazendo *bungee jumping*. Você nota que os membros da equipe, inicialmente, encontram o ponto de equilíbrio de suas cordas elásticas, portanto, você mede esse ponto.

A equipe decide deixar seu líder a alguns metros acima do ponto de equilíbrio e você observa quando ele passa rapidamente do ponto e, então, salta de volta a uma velocidade de 4,0 metros por segundo, a partir do ponto de equilíbrio. Ignorando todo o cuidado, a equipe eleva seu líder a uma distância 10 vezes maior a partir do ponto de equilíbrio e solta-o novamente. Desta vez, você ouve um grito distante quando o corpo move-se para cima e para baixo. Qual é sua velocidade máxima?

Você sabe que ele estava indo a 4,0 metros por segundo no ponto de equilíbrio anterior, o ponto onde ele consegue a velocidade máxima; você sabe que ele iniciou com uma grandeza 10 vezes maior na segunda tentativa; e sabe que a velocidade máxima é proporcional à grandeza. Portanto, supondo que a frequência de seu salto é igual, ele estará indo a 40,0 metros por segundo no ponto de equilíbrio – muito rápido.

Incluindo a aceleração

Você pode encontrar o deslocamento de um objeto submetendo o movimento harmônico simples à seguinte equação:

$$x = A \cos(\omega t)$$

E pode descobrir a velocidade do objeto com a equação

$$v = -A\omega \sin(\omega t)$$

Mas, você tem outro fator que deve levar em conta ao descrever um objeto no movimento harmônico simples: sua aceleração em qualquer ponto. Como você descobre? Sem sofrimentos. Quando um objeto está girando em um círculo, a aceleração é a aceleração centrípeta (ver Capítulo 10), que é

$$a = r\omega^2$$

onde r é o raio e ω é a velocidade angular. E como $r = A$ – amplitude – você obtém

$$a = r\omega^2 = A\omega^2$$

Essa equação representa a grandeza da aceleração centrípeta. Para ir de um círculo de referência (veja a seção “Dividindo a onda senoidal” anteriormente neste capítulo) para o movimento harmônico simples, você obtém o componente da aceleração em uma dimensão – a direção X – que fica assim

$$a = -A\omega^2 \cos \theta$$

O sinal negativo indica que o componente X da aceleração é para a esquerda. E como $\theta = \omega t$, onde t representa o tempo, você obtém

$$a = -A\omega^2 \cos \theta = -A\omega^2 \cos(\omega t)$$

Agora, você tem a equação para encontrar a aceleração de um objeto em qualquer ponto enquanto ele está movendo-se em um movimento harmônico simples. Por exemplo, digamos que seu telefone toque e você o atenda. Você ouve “Alô?” no fone.

“Hmm”, você pensa, “Imagino quais forças g (as forças exercidas em um objeto devido à gravidade) o diafragma do telefone está experimentando”.

O diafragma (um disco de metal que atua como um tímpano), em seu telefone passa por um movimento muito parecido com o movimento harmônico simples, portanto, calcular sua aceleração não é problema. Você pega sua calculadora; medindo com cuidado, você nota que a amplitude do movimento do diafragma é cerca de $1,0 \times 10^{-4}$ m. Até então, tudo bem. A fala humana está na faixa de frequência de 1,0kHz (quilohertz ou 1.000 Hz), portanto, você tem a frequência, ω . E você sabe que

$$a_{\max} = A\omega^2$$

E mais, $\omega = 2\pi f$, onde f representa a frequência, portanto, ligar os números fornecerá

$$a_{\max} = A\omega^2 = (1,0 \times 10^{-4})[(2\pi)(1.000)]^2 = 3.940 \text{ m/s}^2$$

Você obtém um valor de 3.940 m/s^2 , que é cerca de 402 g.

“Puxa”, você diz. “Isso é uma aceleração incrível para um pedaço de hardware tão pequeno”.

“O quê?”, diz a pessoa impaciente ao telefone. “Você está usando Física de novo?”

Encontrando a frequência angular de uma massa em uma mola

Se você pegar as informações que sabe sobre a lei de Hooke para as molas (veja a seção “Conectando-se com a Lei de Hooke” anteriormente neste capítulo) e aplicá-las ao que sabe sobre como encontrar o movimento harmônico simples (veja a seção “Movendo-se com um movimento harmônico simples”), poderá encontrar as frequências angulares das massas nas molas, junto com as frequências e os períodos de oscilações. E como você pode relacionar a frequência angular e as massas nas molas, pode encontrar o deslocamento, velocidade e aceleração das massas.

A lei de Hooke diz que

$$F = -kx$$

onde F é a força, k é a constante da mola e x é a distância. Por causa de Newton (ver Capítulo 5), você também sabe que Força = massa vezes aceleração, portanto, obtém

$$F = ma = -kx$$

Essa equação é, em termos de deslocamento e aceleração, o que você vê no movimento harmônico simples nas seguintes formas (veja a seção anterior neste capítulo):

$$x = A \cos(\omega t)$$

$$a = -A\omega^2 \cos(\omega t)$$

Inserir estas duas equações na equação anterior fornecerá

$$F = ma = -mA\omega^2 \cos(\omega t) = -kx = -kA \cos(\omega t)$$

Essa equação divide-se em

$$m\omega^2 = k$$

Reorganizar a equação para colocar ω em um lado fornecerá

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Agora, você encontra a frequência angular para uma massa em uma mola e ela está ligada à constante da mola e à massa. Você também pode relacionar com a frequência da oscilação e ao período de oscilação (veja a seção “Dividindo a onda senoidal”) usando a seguinte equação:

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f$$

Você pode converter isto em

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

e

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Digamos, por exemplo, que a mola na Figura 12-1 tenha uma constante de mola, k , de $1,0 \times 10^2$ Newtons por metro e que você anexe uma bola de 45 g à mola. Qual é o período de oscilação? Tudo que você tem que fazer é ligar os números:

$$T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{0,045}{1,0 \times 10^2}} = 0,338 \text{ segundo}$$

O período de oscilação é de 0,34 segundos. Quantos saltos você obterá por segundo? O número de saltos representa a frequência, que você encontra assim:

$$f = 1/T = 2,96\text{Hz}$$

Você obtém três oscilações por segundo.

Como você pode ligar a frequência angular, ω , à constante da mola e à massa no final da mola, pode prever o deslocamento, velocidade e aceleração da massa, usando as seguintes equações para um movimento harmônico simples (veja a seção “Mergulhando mais no movimento harmônico simples”, anteriormente neste capítulo):

$$x = A \cos(\omega t)$$

$$v = -A\omega \sin(\omega t)$$

$$a = -A\omega^2 \cos(\omega t)$$

Usando o exemplo anterior da mola na Figura 12-1 – tendo uma constante de $1,0 \times 10^2$ Newtons por metro com uma bola de 45 g anexada – você sabe que

$$w = \sqrt{\frac{k}{m}} = 0,471 \text{ seg}^{-1}$$

Digamos, por exemplo, que você puxe a bola em 10,0 cm antes de soltá-la (criando uma amplitude de 10,0 cm). Neste caso, você sabe que

$$x = (0,10) \cos (0,471t)$$

$$v = -(0,10)(0,471) \text{ sen } (0,471t)$$

$$a = -(0,10)(0,471)^2 \cos (0,471t)$$

Decompondo a Energia no Movimento Harmônico Simples

Junto com o movimento real que ocorre (ou que você causa) no movimento harmônico simples, você pode examinar a energia envolvida. Por exemplo, quanta energia é armazenada em uma mola quando você a comprime ou a estende? O trabalho que você faz comprimindo ou estendendo a mola deve entrar na energia armazenada na mola. Essa energia é chamada de *energia potencial elástica* e é a força, F , vezes a distância, s :

$$W = Fs$$

Quando você estende ou comprime uma mola, a força varia, mas varia de um modo linear, portanto, você pode escrever a equação em termos de força média, \bar{F} :

$$W = \bar{F}s$$

A distância (ou o deslocamento), s , é apenas a diferença na posição, $x_i - x_o$, e a força média é de $\frac{1}{2}(F_i + F_o)$, significando que

$$W = \bar{F}s = [\frac{1}{2}(F_i + F_o)](x_i - x_o)$$

Substituindo pela lei de Hooke (veja a seção “Conectando-se com a Lei de Hooke”, anteriormente neste capítulo), $F = -kx$, para F fornecerá

$$W = \bar{F}s = [\frac{1}{2}(F_i + F_o)](x_i - x_o) = [-\frac{1}{2}(kx_i + kx_o)](x_i - x_o)$$

Simplificando a equação você tem

$$W = \frac{1}{2}kx_o^2 - \frac{1}{2}kx_i^2$$



O trabalho feito na mola muda a energia potencial armazenada nela. A equação seguinte é exatamente como você fornece essa energia potencial ou a energia potencial elástica:

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

Por exemplo, se uma mola for elástica com uma constante de mola, k , de $1,0 \times 10^2$ Newtons por metro e você comprimi-la em 10,0 cm, armazenará a seguinte quantidade de energia:

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2} (1,0 \times 10^2) (0,10)^2 = 5,0 \times 10^{-5} \text{ J}$$



Você também pode notar que quando permite que a mola fique com uma massa em sua extremidade, a energia mecânica (a soma das energias potencial e cinética) é conservada:

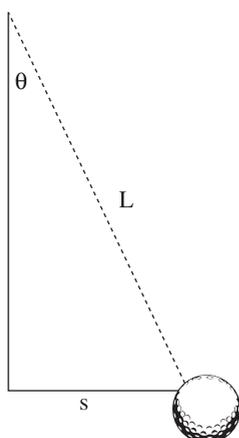
$$E_{p1} + E_{c1} = E_{p2} + E_{c2}$$

Quando você comprime a mola em 10,0 cm, sabe que tem $5,0 \times 10^{-5}$ J de energia armazenada. Quando a massa em movimento atinge o ponto de equilíbrio e nenhuma força a partir da mola está atuando na massa, você tem a velocidade máxima e, portanto, a energia cinética máxima – nesse ponto, a energia cinética é de $5,0 \times 10^{-5}$ J, pela conservação da energia mecânica (veja o Capítulo 8 para saber mais sobre este tópico).

Balançando com os Pêndulos

Outros objetos se movem no movimento harmônico simples além das molas, como, por exemplo, o pêndulo que você vê na Figura 12-6. Aqui, a bola está ligada a um fio e está balançando para a frente e para trás.

Figura 12-6:
Um pêndulo,
como
uma mola,
move-se no
movimento
harmônico
simples.



Você pode analisar o movimento deste pêndulo como analisaria o de uma mola (veja a seção “Movendo-se com um movimento harmônico simples”)? Sim, sem nenhum problema. Veja a Figura 12-6. O torque, τ (ver Capítulo 10), que vem da gravidade é o peso da bola, mg negativo, multiplicado pelo braço de alavanca, s (para saber mais sobre os braços de alavanca, veja o Capítulo 10):

$$\tau = -mgs$$

Aqui você faz uma aproximação. Para os pequenos ângulos θ , a distância s é igual a $L\theta$, onde L é o comprimento do fio do pêndulo:

$$\tau = -mgs = -(mgL)\theta$$

Esta equação lembrará a Lei de Hooke, $F = -kx$ (veja a seção “Conectando-se com a Lei de Hooke”), se você tratar mgL como trataria uma constante de mola. Você pode usar o momento rotacional da inércia, I (ver Capítulo 11), ao invés da massa para a bola; fazer isso permitirá determinar a frequência angular do pêndulo de modo muito parecido com a frequência angular de uma mola (veja a seção “Encontrando a frequência angular de uma massa em uma mola” anteriormente neste capítulo):

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL}{I}}$$

O momento de inércia é igual a mr^2 para uma massa pontual (ver Capítulo 11), que você pode usar aqui, supondo que a bola é pequena comparada com o fio do pêndulo. Isso fornecerá

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Agora, você pode relacionar com as equações de movimento para obter o movimento harmônico simples. Também pode encontrar o período de um pêndulo com a equação

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f$$

onde T representa o período e f representa a frequência. Você termina com a seguinte equação para o período:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Note que esse período é realmente independente da massa que você está usando no pêndulo!

Parte IV

Formulando as Leis da Termodinâmica

A 5ª Onda

Por Rich Tennant



Nesta parte...

Quanta água fervendo é preciso para derreter um bloco com 200 libras de gelo? Você congelaria no espaço? Por que o metal é frio ao toque? Tudo diminui de temperatura (ou congela) na termodinâmica, que é a Física do calor e o fluxo térmico. As respostas para suas perguntas estão vindo nesta parte na forma de equações e explicações.

Capítulo 13

Aumentando o Calor com a Termodinâmica

Neste Capítulo

- ▶ Obtendo a temperatura com Fahrenheit, Celsius e Kelvin
- ▶ Examinando o calor com a expansão linear
- ▶ Transferindo o calor com a expansão do volume
- ▶ Seguindo com o fluxo térmico
- ▶ Quantificando a capacidade do calor específico
- ▶ Atendendo às exigências para a mudança de fase

Você chega à cena de uma emergência onde um evento geotérmico inesperado está destruindo uma festa de aniversário no jardim. “É um gêiser”, os pais infelizes dizem, apontando para uma espuma no quintal. “Com certeza”, você diz. “Você tem um metro?”. Os pais entregam a você um metro e dizem: “Você pode correr? O sorvete está derretendo.”

Você mede rapidamente a profundidade da coluna de água fervente de 225 metros, com uma largura média de 0,5 metro. “Tudo bem”, você informa. “A Física nos deu a solução. Vocês precisam de 719 bolsas de gelo.”

“Setecentos e dezenove bolsas de... gelo?”, os pais repetem com voz fraca.

“As bolsas congelarão o gêiser o suficiente para que a festa de aniversário termine, supondo que vocês têm exatamente 120 minutos ou menos.”

“Setecentos e dezenove bolsas?”, os pais perguntam, entreolhando-se. “Sim”, você diz. “Enviarei minha conta.”

Este capítulo é uma exploração do calor e da temperatura. A Física tem muito a dizer sobre os temas e fornece muito poder para prever o que está acontecendo. Analiso as diferentes medidas de temperatura, expansão linear, expansão do volume e quanto a temperatura de um objeto mudará a temperatura de outro objeto quando eles são colocados juntos.

Entrando na Água Quente

Você sempre inicia um cálculo ou observação em Física tomando medidas; e quando os tópicos da Física que você está analisando são o calor e a temperatura, tem várias escalas diferentes à sua disposição – em destaque, Fahrenheit, Celsius e Kelvin.

Quando o termômetro informa Fahrenheit

Nos Estados Unidos, a escala de temperatura mais comum é a *escala Fahrenheit*. Como nas outras escalas de temperatura, as medidas na escala Fahrenheit são feitas em graus. Por exemplo, a temperatura do sangue de um ser humano saudável é de $98,6^{\circ}\text{F}$ – o F significa que você está usando a escala Fahrenheit.

Quando o termômetro informa Celsius

O sistema Fahrenheit não era muito fácil de utilizar, portanto, outro sistema foi desenvolvido – a escala *Celsius* (chamada inicialmente de sistema Centígrado). Usando este sistema, a água pura congela em 0°C e ferve em 100°C . Essas medidas são mais fáceis de utilizar do que 32° e 212° do Fahrenheit, pois a água pura é fácil de sugerir. Eis como reacionar os dois sistemas de medida de temperatura (essas medidas estão no nível do mar; elas mudam quando você aumenta a altitude):

Água congelando = $32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C}$

Água fervendo = $212^{\circ}\text{F} = 100^{\circ}\text{C}$

Trinta e dois graus de separação Fahrenheit

Quem sugeriu a escala Fahrenheit de temperatura? Você pode não ficar surpreso com seu nome — Daniel Gabriel Fahrenheit fabricava termômetros em Amsterdã no século XVIII. Para o ponto zero de sua escala, ele usava a temperatura de um banho de gelo em uma solução de sal (que

era um modo comum de alcançar baixas temperaturas em um laboratório no século XVIII). Ele escolheu 32°F como a temperatura do gelo derretendo (aumentando) ou da água congelando (diminuindo). Usando essa escala de temperatura, a água ferve a 212°F .



Cruzando Fahrenheit e Celsius

As escalas Fahrenheit e Celsius realmente se cruzam em um ponto, onde a temperatura em Fahrenheit e Celsius é igual. Qual é essa temperatura? Se você chamá-la de

t , saberá que $t = (9 / 5) t + 32$. Determinar t , fornecerá $t = -40$. Portanto, $-40^{\circ}\text{C} = -40^{\circ}\text{F}$, um fato bem peculiar.

Se você fizer o cálculo, encontrará 180°F entre os pontos de congelamento e fervura no sistema Fahrenheit e 100°C no sistema Celsius, portanto, a proporção de conversão é $180 / 100 = 18 / 10 = 9 / 5$. E não se esqueça de que as medidas são também deslocadas em 32 graus (o ponto 0 grau da escala Celsius corresponde ao ponto 32 graus da escala Fahrenheit). Reunir essas ideias permitirá que você converta de Celsius para Fahrenheit ou de Fahrenheit para Celsius bem facilmente; apenas lembre-se destas equações:

$$C = (5 / 9)(F - 32)$$

$$F = (9 / 5) C + 32$$

Por exemplo, a temperatura do sangue de um ser humano é de $98,6^{\circ}\text{F}$. Qual temperatura equivalente em Celsius? Simplesmente relacione os números:

$$C = (5 / 9)(F - 32) = (5 / 9)(98,6 - 32) = 37,0^{\circ}\text{C}$$

Quando o termômetro informa Kelvin

William Thompson criou um terceiro sistema de temperatura, que agora é comum na Física, no século XIX – o sistema Kelvin (ele depois se tornou Lorde Kelvin). O sistema Kelvin tornou-se tão comum na Física que os sistemas Fahrenheit e Celsius são definidos em termos do sistema Kelvin – um sistema baseado no conceito do zero absoluto.

Analizando o zero absoluto

A temperatura é realmente uma medida de movimento molecular – informa a velocidade e a quantidade de moléculas do objeto que você está medindo, que estão se movendo. As moléculas se movem cada vez mais lentamente quando a temperatura abaixa. No *zero absoluto*, as moléculas param, significando que você não pode congelá-las mais. Nenhum sistema de refrigeração no mundo – ou no universo inteiro – pode reduzir mais do que isso.

O sistema Kelvin é baseado no zero absoluto como seu ponto zero, o que faz sentido quando você pensa sobre ele. O que é um pouco estranho é que você não mede a temperatura nesta escala em graus; mede-a em *kelvins* (parece que Lorde Kelvin queria assegurar que seu nome nunca fosse esquecido). Uma temperatura de 100° no sistema Celsius é 100°C , mas uma temperatura de 100 é 100 kelvins na escala Kelvin. Esse sistema foi tão adotado que a unidade oficial metros-quilogramas-segundos (MKS) de temperatura é o kelvin (na prática, você vê $^\circ\text{C}$ usado mais frequentemente na Física introdutória).

Fazendo conversões Kelvin

Cada kelvin tem o mesmo tamanho de um grau Celsius, o que torna fácil a conversão entre graus Celsius e Kelvins. Na escala Celsius, o zero absoluto é $-273,15^\circ\text{C}$. Essa temperatura corresponde a 0 kelvins, que você também escreve como 0K (observe, não 0°K).



Portanto, para converter entre as escalas Celsius e Kelvin, tudo que você tem que usar é a seguinte fórmula:

$$K = C + 273,15$$

$$C = K - 273,15$$

E para converter de Kelvins para Fahrenheit, você poderá testar esta fórmula:

$$F = (9 / 5)(K - 273,15) + 32 = (9 / 5)K - 459,67$$

Em qual temperatura a água ferve em Kelvins? Bem, a água pura congela em 100°C , assim

$$K = C + 273,15 = 100 + 273,15 = 373,15\text{K}$$

A água ferve em 373,15K.

O hélio transforma-se em líquido em 4,2K; qual é a temperatura equivalente em $^\circ\text{C}$? Use a fórmula:

$$C = K - 273,15 = 4,2 - 273,15 = -268,95^\circ\text{C}$$

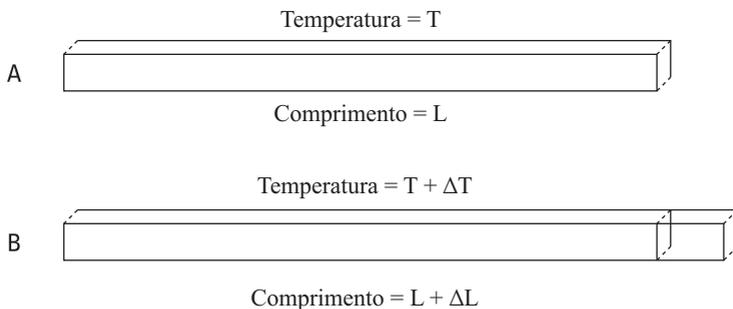
O hélio se liquefaz em $-268,95^\circ\text{C}$. Muito frio.

O Calor Está Ativado: Expansão Linear

Quando você fala em expansão de um sólido em qualquer dimensão sob a influência de calor, está falando na *expansão linear*. Por exemplo, alguns potes com tampa de rosca podem ser difíceis de

abrir, o que é enlouquecedor quando você realmente quer muito manteiga de amendoim ou o pides. Talvez, você se lembre de sua mãe colocando as tampas dos potes sob água quente quando era criança. Ela fazia isso porque a água quente, faz a tampa expandir, o que geralmente torna o trabalho de girá-la muito mais fácil. A Física tem um interesse neste fenômeno e os artistas em suas figuras representativas, como na Figura 13-1.

Figura 13-1: A expansão linear ocorre quando você aplica calor em sólidos, na maioria dos casos.



Se você elevar um pouco a temperatura de um objeto:

$$T_f = T_o + \Delta T$$

onde T_f representa a temperatura final, T_o representa a temperatura original e ΔT representa a mudança na temperatura; a expansão linear resulta em uma expansão em qualquer direção linear de

$$L_f = L_o + \Delta L$$

onde L_f representa o comprimento final do sólido, L_o representa seu comprimento original e ΔL representa a mudança no comprimento. Se a temperatura diminuir um pouco:

$$T_f = T_o - \Delta T$$

você obterá uma contração linear ao invés de uma expansão:

$$L_f = L_o - \Delta L$$

Em outras palavras, a mudança no comprimento, ΔL , é proporcional à mudança na temperatura, ΔT .



Porém, esta proporção não é verdadeira para todos os sólidos — há exceção para uma minoria. Alguns sólidos contraem quando você os aquece. Por exemplo, o gelo realmente contrai quando você eleva sua temperatura de 0°C para 4°C , pois suas moléculas se reorganizam a partir da estrutura cristalina do gelo.

Desconstruindo a expansão linear

No nível molecular, a expansão linear ocorre porque, quando você aquece os objetos, as moléculas movimentam-se mais rapidamente, levando à expansão física. Quando você aquece um sólido, ele expande em pequena porcentagem e essa porcentagem é proporcional à mudança na temperatura, portanto, você pode escrever:

$\Delta L/L_0$ (a fração na qual o sólido se expande) é proporcional a ΔT (a mudança na temperatura)

A constante de proporcionalidade depende de qual material você está trabalhando; portanto, na prática, a constante é algo que você mede, muito parecido com o coeficiente de atrito (ver Capítulo 6). E como o coeficiente de atrito, a constante da proporcionalidade também é um coeficiente – o coeficiente de expansão linear, que é dado pelo símbolo α (não fique confuso com o símbolo para a aceleração angular). Você pode escrever esta relação como uma equação assim:

$$\Delta L / L_0 = \alpha \Delta T$$

Geralmente, você escreve a equação desta forma:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$



Geralmente, você mede α , o coeficiente da expansão linear, em $1/^\circ\text{C}$ (ou seja, em $^\circ\text{C}^{-1}$).

Trabalhando nos trilhos: Um exemplo de expansão linear

Digamos que você seja chamado para verificar uma nova ferrovia. Dada a força gerada pela máquina, o declive do terreno e a massa da carga, você calcula que a máquina deve ser capaz de subir os trilhos em 1,0 metro por segundo, sem problemas.

“Huh”, diz o engenheiro. “Eu poderia ter dito que tudo está bem. Não é preciso ser um especialista em Física oneroso”. Enquanto sua equipe ri, você vê com mais atenção os trilhos com 10,0 metros de comprimento, notando que eles estão separados em 1 milímetro nas extremidades. “O quanto mais quente estas partes ficam durante o verão?”.

“Mais quente?”, o engenheiro gargalha. “Você tem medo que os trilhos *derretam*?”.

Todos riem em silêncio da ignorância quando você verifica seu calendário, informando-o que pode esperar que os trilhos fiquem 50°C mais quentes durante um verão normal. O coeficiente da expansão linear para o aço, do qual os trilhos são feitos, é de aproximadamente $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. (Não se preocupe; você sempre terá esses coeficientes quando precisar resolver um problema. Para prevenir, eis um Web site

útil que lista muitos coeficientes: www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-24_95.html). Desta forma, quanto um trilho típico expandirá durante o período mais quente do verão? Você sabe que

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Relacionar os números fornecerá

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = (1,2 \times 10^{-5})(10,0)(50) = 6,0 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Em outras palavras, você pode esperar que os trilhos expandam $6,0 \times 10^{-3}$ metros no verão ou cerca de 6 milímetros. Porém, os trilhos têm apenas um 1 milímetro de separação. A empresa ferroviária tem problemas.

Você olha para o engenheiro e diz: “Você e eu teremos uma longa conversa sobre Física”.



Muitos projetos de construção levam em conta a expansão linear. Geralmente, você vê pontes com “juntas de expansão”, conectando a ponte à superfície da estrada.

O Calor Continua: Expansão do Volume

A expansão linear, como o nome indica, ocorre em uma dimensão, mas o mundo nem sempre é linear. Ele tem três dimensões. Se um objeto sofrer uma pequena mudança de temperatura de somente alguns graus, você poderá dizer que o volume do sólido mudará de um modo proporcional à mudança da temperatura. Desde que as diferenças de temperatura envolvidas sejam pequenas, você obterá

$\Delta V/V_0$ (a fração na qual o sólido se expande) é proporcional a ΔT (a variação da temperatura)

onde ΔV representa a variação de volume e V_0 representa o volume original. Com a expansão do volume, a constante envolvida é chamada de *coeficiente de expansão do volume*. Essa constante é dada pelo símbolo β , e como α , é medida em $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Usando β , eis como você pode expressar a equação para a expansão do volume:

$$\Delta V / V_0 = \beta \Delta T$$

Quando você multiplica os dois lados por V_0 , obtém

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

Você criou o análogo (ou equivalente) da equação $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ para a expansão linear (veja a seção anterior).



Se as distâncias envolvidas forem pequenas e as mudanças de temperatura também, geralmente você poderá encontrar $\beta = 3\alpha$. Isso faz sentido, pois você vai de uma dimensão para três. Por exemplo, α para o aço é $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $\beta = 3,6 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Isso pode economizar tempo no futuro.

Digamos, por exemplo, que você esteja em uma refinaria de gasolina quando nota que os trabalhadores estão enchendo um caminhão-tanque com 5.000 galões até a borda, antes de sair da refinaria em um dia quente de verão.

“Oh oh”, você pensa quando pega sua calculadora. Para a gasolina, $\beta = 9,5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e você calcula que está 10°C mais quente sob o sol do que no prédio, portanto,

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T = (9,5 \times 10^{-4})(5.000)(10) = 47,5 \text{ galões}$$

Nada bom para a refinaria – esses caminhões com 5.000 galões de gasolina, que estão cheios até a borda, podem carregar 5.047,5 galões de gasolina depois que saem para o sol. Os tanques de gasolina também podem expandir, mas o β do aço é muito menor do que o β da gasolina. Você deve avisar os trabalhadores da refinaria? Ou deve pedir um aumento primeiro?

A Favor do Fluxo (de Calor)

O que, realmente, é calor? Quando você toca em um objeto quente, o calor flui do objeto para você e seus nervos registram esse fato. Quando você toca em um objeto frio, o calor flui de você para esse objeto e, novamente, seus nervos registram o que está acontecendo. Seus nervos registram porque os objetos são quentes ou frios – pois o calor flui deles para você ou de você para eles.

Então, o que é calor em termos físicos? *Calor* é a energia que flui dos objetos de temperaturas mais altas para os objetos de temperaturas mais baixas. A unidade dessa energia no sistema metros-quilômetros-segundos (MKS) é o Joule (J).

Embrulhado em um cobertor

Por que um cobertor o mantém aquecido? Você não está transferindo seu calor através do cobertor para o ar externo?

Certamente que sim, mas quando você aquece a massa do cobertor e o ar fica retido nele, esse material aquecido trans-

fere o calor em todas as direções, não apenas para o ar externo. Parte do calor volta para você. Quanto mais espesso for o cobertor, mais calor terá chance de ser transferido para você, quando ele passar de camada em camada através do cobertor.

De onde vem essa energia? O calor é uma medida da energia armazenada no movimento molecular interno de um objeto. O calor fica em um objeto até que seja transferido para o ambiente.

Materiais diferentes podem manter quantidades diversas de calor – se você aquecer uma batata, poderá manter seu calor por mais tempo (como sua língua pode comprovar) do que um material mais leve, como, por exemplo, um algodão-doce. A medida de quanto calor um objeto pode manter é chamada de sua *capacidade do calor específico*.

Os físicos gostam de medir tudo, portanto, não deve ser nenhuma surpresa que você estoure seu termômetro quando vê alguém fazendo uma xícara de café. Você mede exatamente 1,0 kg de café no bule e, então, volta para as medidas reais. Você descobre que são necessários 4.186 J de energia térmica para elevar a temperatura do café em 1°C, mas são necessários apenas 840 J para elevar em 1°C, 1,0 kg do copo em 1°C. Para onde está indo a energia? Vai para o objeto sendo aquecido, que a armazena como energia interna até que se transfira novamente. **Nota:** Se forem necessários 4.186 J para elevar 1,0 kg de café em 1°C, será requerido o dobro disso, 8.372 J, para elevar 2,0 kg de café, em 1°C.



Você pode relacionar a quantidade de calor, Q (que representa o calor), necessária para elevar a temperatura de um objeto, para mudar a temperatura e a quantidade de massa envolvida:

$$Q = cm\Delta T$$

onde Q é a quantidade de energia térmica envolvida (medida em Joules, se você estiver usando o sistema MKS), m é a quantidade de massa, ΔT é a variação de temperatura e c é uma constante chamada *capacidade térmica específica*, que é medida em $J/(kg\cdot^{\circ}C)$ no sistema MKS.



Uma caloria é definida como a quantidade de calor necessária para aquecer 1,0 grama de água a 1,0°C, portanto, 1 caloria = 4.186 J. Os nutricionistas usam o termo Caloria (C maiúsculo) para indicar 1.000 calorias – 1,0 kcal – portanto, 1,0 Caloria = 4.186 J. Os físicos usam outra unidade de medida também – a Unidade Térmica Inglesa (Btu). Um Btu é a quantidade de calor necessária para elevar 1 libra de água a 1,0°F. Para converter, você usa a relação 1 Btu = 1.055 J.

Agora se os 45 g de café em sua xícara estão frios, você pode chamar seu anfitrião. “Está a 45° C”, você diz, “mas gosto a 65° C”. O anfitrião se levanta e coloca mais.

“Só um momento”, você diz. “O café no bule está a 95°C. Espere até eu calcular exatamente quanto você precisa despejar.”

A seguinte equação representa o calor perdido pela nova massa de café, m_1 :

$$\Delta Q_1 = cm_1 (T_f - T_{1o})$$

E eis o calor conseguido pelo café existente, massa m_2 :

$$\Delta Q_2 = cm_2 (T_f - T_{2o})$$

Supondo que você tenha uma caneca de café com um superisolamento, o calor perdido pelo novo café é o calor que o café existente está ganhando, é representado por

$$\Delta Q_1 = -\Delta Q_2$$

que significa que

$$-cm_1 (T_f - T_{1o}) = cm_2 (T_f - T_{2o})$$

Dividir os dois lados pela capacidade do calor específico e ligar os números fornecerá

$$-m_1 (65 - 95) = -m_1 (-30) = m_1 (30)$$

$$-m_2 (T_f - T_{2o}) = (0,045)(65 - 45) = 0,9$$

$$m_1(30) = 0,9$$

Dividir os dois lados por 30 fornecerá

$$[m_1(30)] / 30 = 0,9 / 30 = m_1 = 0,03 \text{ kg} = 30 \text{ g}$$

Satisfeito, você afasta sua calculadora e diz: “Quero exatamente 30,0 gramas desse café”.

Mudanças de Fases: Quando as Temperaturas Não Mudam

A equação do momento é $Q = cm\Delta T$ – usada para encontrar a quantidade de energia térmica relacionada à variação na temperatura – mas, você também pode encontrar casos em que adicionar ou remover calor não muda a temperatura. Por exemplo, imagine que você esteja bebendo calmamente sua limonada em uma festa no jardim. Você pega gelo para resfriar sua limonada e a mistura em seu copo é agora metade gelo, metade limonada (que você pode supor que tem o mesmo calor específico da água; veja a seção anterior), com uma temperatura de exatamente 0°C .

Quando você segura o copo e observa a ação, o gelo começa a derreter – mas o conteúdo do copo não muda de temperatura. Por quê? O calor que vai para o copo está derretendo o gelo, não esquentando a mistura. Desta forma, a equação para a energia térmica é inútil? Absolutamente. Apenas significa que a equação não se aplica a uma mudança de fase.

As *mudanças de fases* ocorrem quando os materiais mudam de estado, de líquido para sólido (como quando a água congela), sólido para líquido (como quando as rochas se derretem em lava), líquido para gás (como quando você ferve um chá) etc. Quando o material em questão muda para um novo estado – líquido, sólido ou gás (você

também pode decompor em um quarto estado: plasma, um estado gasoso superaquecido) – algum calor entra ou sai do processo.



Você pode ainda ter sólidos que se transformam diretamente em gás, como quando tem um bloco de gelo seco, dióxido de carbono congelado. Quando o gelo seco fica mais quente, ele se transforma em gás dióxido de carbono. Esse processo é chamado de *sublimação*.

Quebrando o gelo com as mudanças de fase

Imagine que alguém pegou uma bolsa de gelo e colocou-a no fogão. Antes de alcançar o fogão, o gelo estava em uma temperatura abaixo do congelamento (-5°C), mas estando no fogão isso muda. Você pode ver a mudança ocorrendo de forma gráfica na Figura 13-2.

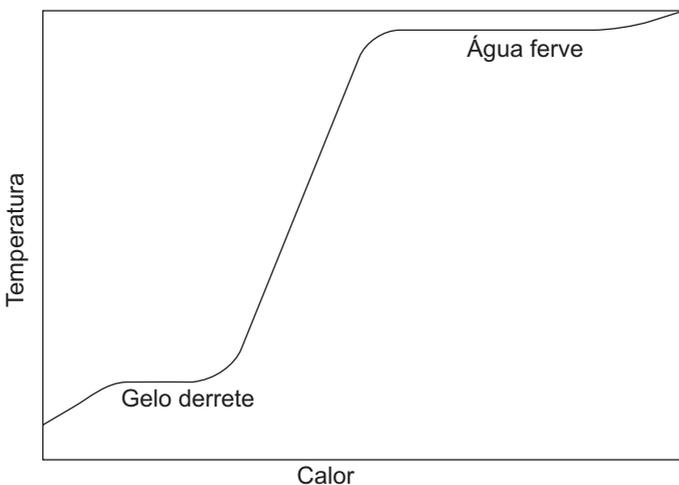


Figura 13-2:
As mudanças de fase da água.

Desde que nenhuma mudança de fase ocorra, a equação $Q = cm\Delta T$ mantém-se adequada [a capacidade do calor específico do gelo é em torno de $2,0 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$], que significa que a temperatura do gelo aumentará linearmente quando você adicionar mais calor, como vê no gráfico na Figura 13-2.

Contudo, quando o gelo atinge 0°C , você começa a ficar nervoso. O gelo está ficando quente demais para manter seu estado sólido e começa a derreter, passando por uma mudança de fase. Porém, no nível molecular, energia é necessária para fazer um objeto mudar de estado. Por exemplo, quando você derrete gelo, requer energia para dividir a estrutura cristalina do gelo. A energia necessária para derreter o gelo é fornecida como calor. É por isso que o gráfico na Figura 13-2 perde a uniformidade no meio – o gelo está derretendo. Calor é necessário para fazer o gelo mudar de fase para água,

portanto, mesmo que o fogão forneça calor, a temperatura do gelo não mudará quando ele derreter.

Porém, quando você observa a bolsa de gelo no fogão, nota que todo o gelo finalmente se derrete em água. Como o fogão ainda está fornecendo calor, a água começa a aquecer, que você vê na Figura 13-2. O fogão adiciona cada vez mais calor à água e com o tempo, a água começa a borbulhar. “Aha”, você pensa. “Outra mudança de fase”. E você está certo: A água está fervendo e tornando-se vapor. Contudo, a bolsa que mantém o gelo parece bem resistente e expande-se enquanto a água vira vapor; mas não se rompe.

Você mede a temperatura da água. Fascinante – embora a água ferva, transformando-se em vapor, a temperatura não muda, como mostrado na Figura 13-2. Novamente, você precisa fornecer calor para estimular uma mudança de fase – desta vez, de água para vapor. Você pode ver na Figura 13-2 que quando você adiciona calor, a água ferve, mas a temperatura dessa água não muda.

O que acontecerá em seguida, quando a bolsa aumentar enormemente? Você nunca descobrirá, pois a bolsa explodirá. Você pega alguns fragmentos da bolsa e examina-os de perto. Qual o calor necessário para mudar o estado de um objeto? Como pode incrementar a equação da energia térmica para levar em conta as mudanças de fase? É onde entra a ideia de calor latente.

Compreendendo o calor latente

O *calor latente* é o calor por quilograma que você tem que adicionar ou remover para fazer o objeto mudar seu estado; em outras palavras, o calor latente é o calor necessário para fazer uma mudança de fase ocorrer. Suas unidades são J/kg no sistema metros-quilogramas-segundos (MKS).

A Física reconhece três tipos de calor latente, correspondendo às mudanças de fase entre sólido, líquido e gás:

- ✓ **O calor latente de fusão, L_f :** O calor por quilograma necessário para fazer a mudança da fase sólida para líquida, quando a água vira gelo.
- ✓ **O calor latente de vaporização, L_v :** O calor por quilograma necessário para fazer a mudança da fase líquida para gasosa, quando a água ferve.
- ✓ **O calor latente de sublimação, L_s :** O calor por quilograma necessário para fazer a mudança da fase sólida para gasosa, quando o gelo seco evapora.

Por exemplo, o calor latente de fusão da água, L_f , é $3,35 \times 10^5$ J/kg e o calor latente da vaporização da água, L_v , é $2,26 \times 10^6$ J/kg. Em outras palavras, requer $3,35 \times 10^5$ Joules para derreter 1 quilograma de gelo a 0°C (apenas para derretê-lo, não para mudar sua temperatura). E requer $2,26 \times 10^6$ Joules para ferver 1 quilograma de água e vaporizá-la. Estas são as energias envolvidas para fazer a água mudar sua fase.

Eis um Web site que lista alguns números comuns para a fusão e a vaporização: www.physchem.co.za/Heat/Latent.html#fusion.

Capítulo 14

Aqui, Pegue Meu Casaco: Transferência de Calor em Sólidos e Gases

Neste Capítulo

- ▶ Transferindo calor através de condução, convecção e radiação
- ▶ Ficando gasoso com o Número de Avogadro
- ▶ Encontrando seu gás ideal
- ▶ Mantendo-se com as moléculas nos gases ideais

Você testemunha a transferência de calor e mudanças químicas todos os dias. Você cozinha massa e vê correntes de água circulando o macarrão na panela. Pega a panela sem um pegador e queima sua mão. Você olha para o céu em um dia de verão e sente que seu rosto está esquentando. Dá seu casaco para seu companheiro e o observa esquentar (através da radiação, claro!).

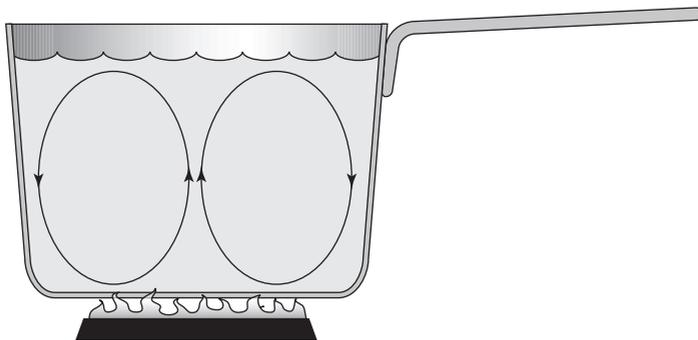
Neste capítulo, analiso três maneiras de distribuição do calor. Começo analisando como o calor pode ser transferido e, então, analiso como o calor afeta os gases — que é onde você prevê quantas moléculas estão presentes em certos líquidos ou sólidos. Você também descobre como o calor se move, com quantas moléculas está lidando e muito mais. Depois de ler este capítulo, você poderá surpreender as pessoas nas festas contando-lhes quantas moléculas de água elas têm em seus copos!

Fervendo a Água: Convecção

A *convecção* é um dos principais meios pelos quais o calor é transferido de ponto a ponto. Acontece quando uma substância como ar ou água é aquecida; parte dela torna-se menos densa e sobe. Veja a panela de água aquecendo na Figura 14-1. Como o calor se move na água? Quando a água é aquecida, ela se expande e fica menos densa. A água menos densa sobe em direção ao topo, iniciando uma corrente. Você poderá ver a convecção funcionando

se adicionar macarrão à panela e observar como eles circulam. Aqui, a transferência de calor conta com um meio que se expande e se move — a água.

Figura 14-1:
Você
pode ver a
convecção
em ação
fervendo
uma panela
de água.



Contudo, a convecção não precisa de água; o ar e muitas outras substâncias também podem passar por este processo. Talvez, você já tenha visto pássaros voando nas *termais* (colunas de ar quente que sobem) enquanto circulam e alcançam altitudes maiores — o *movimento convectivo* do ar que foi aquecido perto da superfície da Terra cria as termais.



Muitos fornos funcionam usando a convecção; você pode ter ouvido o termo forno de convecção em oposição a, digamos, forno de micro-ondas (aquece usando micro-ondas para polarizar rapidamente as moléculas na comida e fazê-las oscilar; portanto, acredite se quiser, o aquecimento em um micro-ondas realmente vem do atrito). O ar dentro de um forno de convecção fica quente, o que faz as correntes de ar circularem.

Você pode ter ouvido a máxima “o calor sobe”, que quer dizer convecção. O ar quente se expande e fica menos denso do que o ar frio à sua volta, fazendo-o subir. Portanto, se você tiver uma casa com dois ou três andares com uma escada aberta, todo seu ar cuidadosamente aquecido irá concentrar-se no andar superior durante o inverno. O calor de aquecedores em um cômodo também sobe pela convecção, circulando o ar em volta até certo ponto. Para aumentar o movimento do calor, algumas vezes as pessoas usam ventiladores de teto. Provavelmente, você vê a convecção diariamente e, agora, pode reconhecê-la em ação; contudo, existem outros eventos térmicos ocorrendo que você ainda não descobriu. Leia!

Quente Demais: Condução

A *condução* transfere calor diretamente através do material, sem precisar de correntes para sustentar a transferência (como a

convecção; veja a seção anterior). Veja a panela de metal na Figura 14-2 e sua alça de metal; a panela está fervendo por 15 minutos. Você gostaria de tirá-la do fogo pegando na alça sem uma luva? Provavelmente não, a menos que goste de fortes emoções.

A alça de metal está quente, mas por quê? Não por causa da convecção, pois nenhuma corrente de massa, resultante do calor, está funcionando aqui. A alça está quente por causa da condução.

No nível molecular, as moléculas próximas da fonte de calor são aquecidas e começam a se mover rapidamente. Elas se chocam com as moléculas perto delas e fazem com que se movam rapidamente (como qualquer pessoa que tenha jogado bilhar pode confirmar). Esse aumento dos choques é o que aquece uma substância.

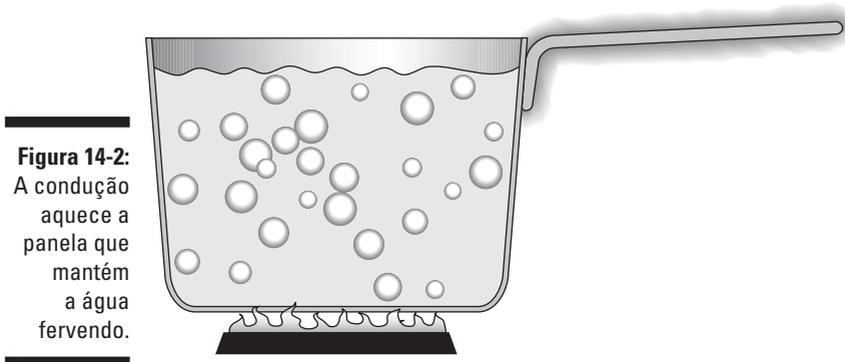


Figura 14-2:
A condução aquece a panela que mantém a água fervendo.

Alguns materiais, como, por exemplo, a maioria dos metais, conduzem calor melhor do que outros, tais como porcelana, madeira ou vidro. O modo como as substâncias conduzem calor depende muito de suas estruturas moleculares, portanto, diferentes substâncias reagem de modo diferente.

Examinando as propriedades que afetam a condução para encontrar a equação da condução

Você tem que levar em conta as diferentes propriedades dos objetos quando deseja examinar a condução. Se você tiver uma barra de aço, por exemplo, terá que levar em conta a área da barra e o comprimento, junto com a temperatura nas diferentes partes da barra. Veja a Figura 14-3, onde uma barra de aço está sendo aquecida em uma extremidade e o calor está migrando por condução em direção ao outro lado. Você pode descobrir a velocidade com a qual o calor migra? Sem problemas.

Você pode seguir alguns caminhos diferentes nesta situação. Por exemplo, como era de se esperar, quanto maior for a diferença

na temperatura entre as duas extremidades da barra, maior será a quantidade de calor transferida. Ou seja, a quantidade de calor transferida, Q , é proporcional à variação na temperatura, ΔT (\propto significa “é proporcional a”):

$$Q \propto \Delta T$$

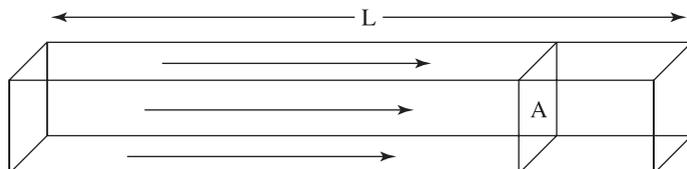


Figura 14-3:
Conduzindo
calor em
uma barra
de aço.



Por outro lado, uma barra duas vezes mais longa conduz duas vezes mais a quantidade de calor. Em geral, a quantidade de calor conduzida, Q , é proporcional à área transversal, A , assim:

$$Q \propto A$$

E quanto mais longa for a barra, menos quantidade de calor passará até a outra extremidade; na verdade, o calor conduzido é inversamente proporcional ao comprimento da barra, L :

$$Q \propto 1 / L$$

Finalmente, a quantidade de calor transferida, Q , depende da quantidade de tempo que passa, t – duas vezes o tempo, duas vezes o calor. Eis como você expressa isso matematicamente:

$$Q \propto t$$

Quando você reúne tudo e nomeia k como a constante que ainda será determinada, a transferência de calor por condução através de um material é dada por esta equação:

$$Q = (kA\Delta Tt) / L$$

Esta equação representa a quantidade de calor transferida por condução em uma dada quantidade de tempo, t , em um comprimento L , onde a área transversal é A . Aqui, k é a *condutividade térmica* do material, medida em Joules/(s·m·°C).



Materiais diferentes (vidro, aço, cobre, goma de mascar) conduzem calor com taxas diferentes, portanto, a constante da condutividade térmica depende do material em questão. O bom é que os físicos já mediram as constantes para vários materiais. Verifique alguns cálculos na Tabela 14-1.

Tabela 14-1: As condutividades térmicas para vários materiais

<i>Material</i>	<i>Condutividade termal</i>
Vidro	0,80 J/(s-m-°C)
Aço	14,0 J/(s-m-°C)
Cobre	390 J/(s-m-°C)
Isopor	0,01 J/(s-m-°C)
Metal	110 J/(s-m-°C)
Prata	420 J/(s-m-°C)

Aplicando a equação do calor transferido pela condução

A condutividade térmica da alça de aço de uma panela é de 14,0 J/(s-m-°C) (ver Tabela 14-1). Veja a Figura 14-3. Se essa alça medir 15 cm, com uma área transversal de 2,0 cm² (2,0 × 10⁻⁴ cm²) e o fogo em uma extremidade for de 600°C, quanto calor seria emitido para sua mão se você a pegasse? A equação para a transferência de calor por condução é

$$Q = (kA\Delta Tt) / L$$

Supondo que a ponta da extremidade fria da alça começa mais ou menos, a temperatura ambiente, 25°C, você obterá

$$Q = (kA\Delta Tt) / L = [(14)(2,0 \times 10^{-4})(600 - 25)t] / 0,15 = (10,7J)t$$

Tornando-se um engenheiro de refrigeração

Com base nas propriedades de condução ou isolamento térmico de diferentes materiais, você pode calcular como manter os objetos frios ou quentes, desde bebidas até cachorros-quentes e prateleiras de carne; por exemplo, imagine que tenham pedido que você desenhe um armário de armazenamento de comida congelada e seu primeiro pensamento seja fazê-lo de cobre, que tem uma condutividade térmica de 390J/(s-m-°C). Porém, o cobre daria resultados insatisfatórios, pois tem uma condutividade térmica muito alta, que per-

mitiria ao calor entrar ou sair do armário facilmente. Melhor verificar as condutividades térmicas dos diferentes objetos. O isopor tem uma condutividade térmica de apenas 0,01J/(s-m-°C), que é uma escolha muito melhor; se o gelo permanecer em um período de tempo *t* no armário de cobre, permanecerá 390 / 0,01 = 39.000 vezes mais tempo se você construir o refrigerador com isopor. (É apenas uma estimativa, claro; a resposta real depende da condutividade térmica do conteúdo do armário também).

Você encontra que 10,7 Joules (a unidade de medida em questão) de calor estão sendo transferidos para a extremidade da alça a cada segundo. E quando os segundos passarem, os Joules de calor aumentarão, tornando a alça cada vez mais quente.

Emitindo e Absorvendo Luz: Radiação

Você sai do chuveiro molhado no auge do inverno e está agradavelmente aquecido. Por quê? Por causa de um pouco de Física, claro. Em particular, a lâmpada quente que você tem em seu banheiro, que você pode ver na Figura 14-4, irradia calor para você e o mantém aquecido através da radiação.

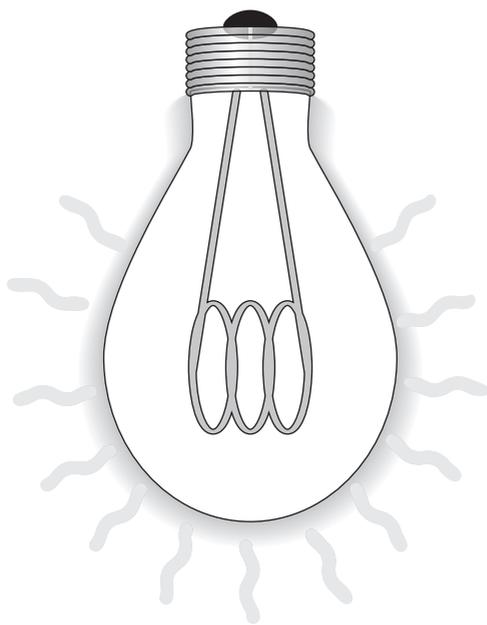


Figura 14-4:
Uma lâmpada irradia calor em seu ambiente.

A *radiação* é a luz que pode transferir calor. A energia quente transferida através da radiação é tão familiar quanto a luz do dia; na verdade, *é* a luz do dia. O Sol é um reator térmico enorme, cerca de 93 milhões de milhas distante no espaço, e nem a condução ou a convecção (veja as duas seções anteriores neste capítulo) produziriam energia suficiente para chegar à Terra através do vácuo no espaço. A energia do Sol chega à Terra através da radiação, o que você pode confirmar em um dia ensolarado ficando ao ar livre e permitindo que os raios do sol aqueçam seu rosto. Contudo, o único modo de você realmente ver a radiação é através da queimadura do sol com a qual terá que lidar mais tarde.

Você não pode ver a radiação, mas ela existe

Todo objeto à sua volta está irradiando continuamente, a menos que esteja em uma temperatura de zero absoluto, que é um pouco improvável porque você não pode chegar, fisicamente, a uma temperatura de zero absoluto. Uma casquinha de sorvete, por exemplo, irradia. A radiação eletromagnética vem da aceleração e da desaceleração das cargas elétricas, em nível molecular, que é o que acontece quando os objetos são aquecidos – seus átomos se movem cada vez mais rapidamente e se chocam com outros átomos fortemente.

Agora mesmo que você irradia o tempo inteiro, mas essa luz geralmente não é visível porque está na parte infravermelha do espectro. Porém, essa luz é visível nos aparelhos de infravermelhos. Você irradia calor em todas as direções o tempo todo e tudo em seu ambiente irradia calor de volta para você. Quando você tem a mesma temperatura que o ambiente, você irradia com a mesma velocidade e quantidade para seu ambiente, como ele faz com você.



Se seu ambiente não irradiasse de volta para você, você congelaria, sendo por isso que o espaço é considerado tão “frio”. Não há nada frio para tocar no espaço e o calor não é perdido através da condução ou da convecção. Tudo que acontece é que o ambiente não irradia de volta para você, significando que o calor que você irradia é perdido. E você pode congelar muito rapidamente a partir do calor perdido.

Quando um objeto aquece em cerca de 1.000 kelvin, ele começa a ficar vermelho (o que pode explicar por que você, mesmo que esteja irradiando, não fica vermelho no espectro de luz visível). Quando o objeto fica mais quente, sua radiação sobe no espectro passando pelo laranja, amarelo e continua até o branco quente em algum lugar algo em torno de 1.700K.



Os aquecedores, com bobinas que ficam vermelhas, contam com a radiação para transferir calor. A convecção ocorre quando o ar fica quente, sobe e espalha-se no cômodo (e a condução poderá ocorrer se você tocar no aquecedor em um ponto quente sem querer – não é a transferência de calor mais desejável). Mas, a transferência de calor ocorre, em grande parte, através da radiação. Muitas casas têm fios de aquecimento nas paredes, tetos ou pisos, que são chamados de *aquecimento irradiante* - você não vê nada (que, do ponto de vista arquitetônico, é o ideal), mas seu rosto sentirá o calor quando ficar de frente para a fonte de aquecimento.

Os seres humanos compreendem a radiação e a absorção de calor no ambiente, intuitivamente. Por exemplo, em um dia quente, você pode evitar vestir uma camiseta preta, pois sabe que ficará mais quente. Por quê? Porque ela absorve a luz do ambiente enquanto reflete menos do que uma camiseta branca. A camiseta branca mantém você mais resfriado, pois reflete mais calor irradiante para o ambiente. O que você preferiria ter em um dia quente: um carro com tapetes de couro preto ou branco?

Refletindo sobre o metal frio

Por que os metais são frios ao toque? Quando você pega um objeto de metal (mesmo na geladeira, como, por exemplo, uma lata de soda), sente frio ao toque. Provavelmente, isso ocorre em sua vida diária. Mas por quê?

A resposta está no calor irradiante. Os metais são brilhantes, portanto, podem

refletir o calor irradiante que os atinge melhor do que os outros objetos em um cômodo, mesmo os brancos. Portanto, se uma colher reflete 90% do calor irradiante que a atinge e um livro reflete apenas 10%, qual será mais frio ao toque? O metal, com certeza.

Radiação e corpos negros

Alguns objetos absorvem mais luz que os atinge do que outros. Os objetos que absorvem *todo* o calor irradiante que os atinge têm um nome — eles são chamados de *corpos negros*. Um corpo negro absorve 100% do calor irradiante que o atinge e, se estiver em equilíbrio com o ambiente, ele emitirá todo o calor irradiante também.

A maioria dos objetos classificam-se entre espelhos, que refletem toda a luz, e os corpos negros, que absorvem toda a luz. Os objetos intermediários absorvem parte da luz que os atinge e emite-a de volta para o ambiente. Os objetos brilhantes são assim porque refletem grande parte da luz, significando que não têm que emitir tanto calor, de modo irradiante, como os outros objetos. Os objetos escuros ficam escuros porque não refletem muita luz, o que significa que têm que emitir mais como calor irradiante (geralmente mais abaixo no espectro, onde a luz é infravermelha e não pode ser vista).

Você pode encontrar muita Física quando vê corpos negros, começando com a seguinte pergunta: quanto calor um corpo negro emite quando está em certa temperatura? A quantidade de calor irradiada é proporcional ao tempo permitido — duas vezes tanto tempo, duas vezes tanto calor irradiado, por exemplo. Assim, você pode escrever a equação, onde t é o tempo, como a seguir:

$$Q \propto t$$

E como você pode esperar, a quantidade de calor irradiada é proporcional à área total que promove a radiação. Portanto, você também pode escrever a equação como a seguir, onde A é a área que faz a radiação:

$$Q \propto At$$

A temperatura, T , tem que estar na equação em algum lugar — quanto mais quente for um objeto, mais calor será irradiado.

Experimentalmente, resulta que a quantidade do calor irradiado é proporcional a T à quarta potência T^4 . Então, agora, você tem

$$Q \propto AtT^4$$

Para fazer a equação final, você precisa adicionar uma constante, que é medida experimentalmente. Para encontrar o calor emitido por um corpo negro, você usa a constante Stefan-Boltzmann, σ , que fica assim:

$$Q = \sigma AtT^4$$



O valor de σ é $5,67 \times 10^{-8} \text{ J(s-m}^2\text{-K}^4\text{)}$. Porém, observe que essa constante funciona apenas para os corpos negros que são emissores perfeitos. A maioria dos objetos não é um emissor perfeito, portanto, você tem que adicionar outra constante na maioria das vezes – uma que dependa da substância com a qual você está trabalhando. A constante é chamada de *emissividade*, e . Assim, esta equação – a *lei da radiação Stefan-Boltzmann* – torna-se

$$Q = e\sigma AtT^4$$

onde e é a emissividade de um objeto, σ é a constante Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ J[s-m}^2\text{-K}^4\text{]}$), A é a área de irradiação, t é o tempo e T é a temperatura em kelvins.

Por exemplo, a emissividade de uma pessoa é cerca de 0,8. Em uma temperatura corporal de 37°C , quanto calor uma pessoa irradia por segundo? Primeiro, você tem que decompor na área que promove a radiação. Se você considerasse uma pessoa como um cilindro com 1,6 metro de altura e raio de 0,1 cm, a área da superfície total seria

$$A = (\text{área de um cilindro}) = 2\pi rh + 2\pi r^2 = 2\pi(0,1)(1,6) + 2\pi(0,1)^2 = 1,07 \text{ m}^2$$

onde r é o raio e h é a altura. Para encontrar o calor total irradiado por uma pessoa, relacione os números na equação da lei de radiação Stefan-Boltzmann:

$$Q = e\sigma AtT^4 = (0,8)(5,67 \times 10^{-8})(1,07)(37 + 273,15)^4 t = 449t$$

Você obtém um valor de 449 Joules por segundo ou 449 watts. Pode parecer um valor alto, pois a temperatura da pele não é igual à temperatura interna do corpo, mas é uma valor aproximado.

Quebrando o número de Avogadro

Muitas das informações deste capítulo lidam com os efeitos do calor nos sólidos e nos líquidos (como em reservatórios de metal líquido, por exemplo), mas você pode examinar a Física quando aquece gases também. Tudo começa descobrindo com quantas moléculas de uma substância você está lidando, que pode ser revelado usando um pouco de Física. Por exemplo, considere que uma pessoa encontra um grande diamante e traz para você examinar.

“Quantos átomos existem em meu diamante?”

“Depende”, você diz, “de quantos mols você tem”.

A pessoa ofendida, diz: “Peço seu perdão”!



Um *mol* é o número de átomos contidos em 12,0 gramas do isótopo de carbono 12. O isótopo de carbono 12 – também chamado de carbono-12 ou apenas carbono 12 – é a versão mais comum do carbono, embora alguns átomos de carbono tenham mais alguns nêutrons – o carbono 13 – portanto, a média é de 12,011. Você precisa saber quanto há de mols de matéria antes de saber a quantidade de átomos e um bom conhecimento do mundo atômico é essencial quando você começa a trabalhar com calor e gases.

O número de átomos foi medido como $6,022 \times 10^{23}$, que é chamado de Número de Avogadro, N_A . Portanto, agora você sabe quantos átomos existem em 12,0 gramas de carbono 12. Você encontra o mesmo número de átomos em, digamos 12,0 gramas de enxofre? Não. Cada átomo de enxofre tem uma massa diferente de cada átomo do carbono, portanto, mesmo que você tenha o mesmo número de gramas, tem um número diferente de átomos.

Quanta massa a mais o enxofre tem que ter em relação ao carbono 12? Se você verificar a tabela periódica dos elementos pendurada na parede de um laboratório de Física, descobrirá que a massa atômica do enxofre (geralmente o número que aparece à direita sob o símbolo do elemento) é 32,06. Mas 32,06 o quê? São 32,06 unidades de massa atômica, u.m.a, onde cada unidade atômica é 1/12 da massa de um átomo de carbono 12. Contudo, se um mol de carbono 12 tiver uma massa de 12,0 gramas e a massa do átomo de enxofre for maior que a massa de um átomo de carbono 12, de acordo com a proporção:

$$\text{Massa do enxofre} = 32,06$$

$$\text{Massa do carbono 12} = 12 \text{ u.m.a}$$

um mol de átomos de enxofre deverá ter esta massa:

$$(32,06 / 12 \text{ u})(12,0 \text{ g}) = 32,06 \text{ g}$$



Que conveniente! Saber que um mol de um elemento tem a mesma massa em gramas de sua massa atômica, em unidades de massa atômica, é bastante útil em seus cálculos. Você pode ler a massa atômica de qualquer elemento, em unidades de massa atômica em tabela periódica. Você pode encontrar que um mol de silício tem uma massa de 28,09 gramas, um mol de sódio tem uma massa de 22,99 gramas etc. E cada um desses mols contém $6,022 \times 10^{23}$ átomos.

Agora, você pode determinar o número de átomos em um diamante, que é um carbono sólido (massa atômica = 12,01 u.m.a). Um mol é 12,01 g de diamante, portanto, quando você descobre a quantidade de mols deve ser multiplicado por $6,022 \times 10^{23}$ átomos.



Nem todo objeto é composto por um único tipo de átomo. Quando foi a última vez que alguém lhe deu um quilograma de enxofre 100% puro na rua? A maioria dos materiais é composta, como, por exemplo, a água, que é composta por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio (H_2O). Em casos como esses, ao invés da massa atômica, você procura a *massa molecular* (quando os átomos se combinam, você tem moléculas), que também é medida em unidades de massa atômica. Por exemplo, a massa molecular da água é 18,0153 u.m.a, portanto, 1 mol de moléculas de água tem uma massa de 18,0153 g.

Forjando a Lei do Gás Ideal

Quando você começa a trabalhar no nível atômico e molecular, começa trabalhando com gases a partir do ponto de vista da Física. Por exemplo, qual o fator molar quando você aquece os gases? Você pode relacionar a temperatura, pressão, volume e número de mols do gás. A relação nem sempre se mantém totalmente verdadeira, mas é sempre constante os *gases ideais*. Os gases ideais são muito leves, tais como o hélio, e são como as rampas sem atrito da termodinâmica.

Experimentalmente, se você mantiver o volume constante e aquecer um gás, a pressão aumentará linearmente, como visto na Figura 14-5. Em outras palavras, em um volume constante, onde T é a temperatura medida em kelvins e P é a pressão

$$P \propto T$$

Você pode permitir que o volume varie também e, se fizer isso, encontrará que a pressão é inversamente proporcional ao volume – se o volume de um gás dobrar, sua pressão diminuirá em um fator de dois:

$$P \propto T / V$$

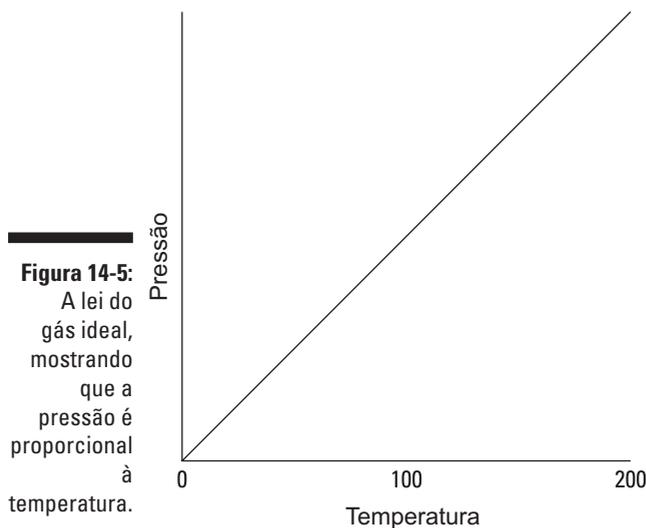


Figura 14-5:
A lei do gás ideal, mostrando que a pressão é proporcional à temperatura.

Por outro lado, quando o volume e a temperatura de um gases ideal são constantes, a pressão é proporcional ao número de mols do gás – duas vezes a quantidade de gás, duas vezes a pressão. Se o número de mols for n ,

$$P \propto nT / V$$

Adicionar uma constante, R – a *constante universal dos gase*, que tem valor de 8,31 Joules (mol-K) –, fornecerá a *lei do gás ideal*, que relaciona a pressão, volume, número de mols e temperatura:

$$PV = nRT$$



Os gases ideais são aqueles para os quais a lei do gás ideal se mantém. Usando a lei do gás ideal, você pode prever a pressão de um gás ideal, sua quantidade, temperatura e volume.



Você também pode expressar a lei do gás ideal de um modo um pouco diferente, usando o Número de Avogadro, N_A (veja a seção anterior), e o número total de moléculas, N :

$$PV = nRT = (N / N_A) RT$$

A constante R/N_A é também chamada de constante de Boltzmann, k , e tem um valor de 1.38×10^{-23} J/K. Usando essa constante, a lei de gás ideal torna-se

$$PV = NkT$$

Pressão do gás: Um exemplo de lei do gás ideal

Digamos que você esteja medindo um volume de 1 metro cúbico preenchido com 600 mols de hélio (que é muito próximo de um gás ideal) na temperatura ambiente, 27°C. Qual seria a pressão do gás? Usando a seguinte forma da lei do gás ideal:

$$PV = nRT$$

você pode colocar P em um lado dividindo por V. Agora, relacione os números:

$$P = nRT / V = [(600,0)(8,31)(273,15 + 27)] / 1,0 = 1,50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

A pressão em todas as paredes do contêiner é de $1,50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Note as unidades da pressão – N/m^2 . A unidade é usada tão comumente que tem seu próprio nome no sistema MKS: Pascals ou Pa. Um Pa = $1,45 \times 10^{-4}$ libras por polegada². A pressão atmosférica é $1,013 \times 10^5$, que é 14,70 lb/pol². A pressão de 1 atmosfera também é dada em *torr* e 1,0 atmosfera = 760 torr. Neste exemplo, você tem uma pressão de $1,50 \times 10^6$ Pa, que é cerca de 15 atmosferas.



Você pode encontrar um conjunto de condições especiais quando falar de gases – Condições Normais de Temperaturas e Pressão, também chamadas de CNTP. A pressão CNTP é de 1 atmosfera, $1,013 \times 10^5$ Pa, e a temperatura CNTP é 0°C. Você pode usar a lei do gás ideal para calcular em CNTP, 1,0 mol de um gás ideal ocupa 22,4 litros de volume (1,0 litro é $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Lei de Boyle e Lei de Charles: Expressões alternativas da lei do gás ideal

Geralmente, você pode expressar a lei do gás ideal de modos diferentes. Por exemplo, pode expressar a relação entre a pressão e o volume de um gás ideal antes e depois de uma dessas quantidades mudar, em uma temperatura constante, assim:

$$P_i V_i = P_o V_o$$

Essa equação, chamada de *Lei de Boyle*, diz que, todos os fatores sendo iguais, o produto PV será conservado. Do mesmo modo, em uma pressão constante, você pode dizer que

$$V_i / T_i = V_o / T_o$$

Essa equação, chamada de *Lei de Charles*, diz que a proporção de V/T será conservada para um gás ideal, com todos os fatores sendo iguais.

Medindo a pressão da água e do ar

Quer uma maneira de exibir sua habilidade em pressão? Bem, você pode determinar a pressão de fluidos, tais como água, com uma equação simples:

$$P = \rho gh$$

Aqui, ρ é a densidade do fluido, γ é a aceleração normal devido à gravidade (9,8 metros por segundo²) e h é a profundidade do fluido que você está medindo. Para a água, ρ , é cerca de 1.000 quilogramas por metro³, portanto, você obtém

$$P = (1.000,0)(9,8)h = 9.800h$$

Para cada metro que você avança sob a água, consegue cerca de 9.800 Pa de pressão ou mais ou menos 1/10 de atmosfera (veja a seção “Pressão do gás: m exemplo de lei do gás ideal” para ter esta conversão).

Esta equação funciona desde que a densidade do fluido não varie, significando que é difícil prever qual será a pressão devido ao ar, pois a densidade do ar varia no espaço. Você geralmente encontra problemas de Física que perguntam quanto a pressão do ar varia quando você sobe certa altura; em outras palavras, os problemas fornecem uma variação de na altura sobre a qual ρ é uma constante e pedem para calcular a variação de pressão.

Controlando Moléculas do Gás Ideal

Você pode observar determinadas propriedades das moléculas de um gás ideal quando elas se movem rapidamente. Por exemplo, você calcula a energia cinética média de cada molécula com uma equação muito simples:

$$E_{C_{\text{média}}} = 3/2kT$$

onde k é a constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K e T é a temperatura. E você pode determinar a massa de cada molécula, se souber com qual gás está lidando (veja a seção “Quebrando o número de Avogadro” anteriormente neste capítulo), poderá descobrir as velocidades das moléculas em várias temperaturas.

Prevendo a velocidade da molécula de ar

Imagine que você esteja em um piquenique com amigos em um belo dia de primavera. Você tem uma bela comida – salada de batatas, sanduíches e bebidas. Mas depois de um tempo, você imagina se seus amigos esqueceram de trazer alguma Física. Você deita para trás e examina o céu. Tudo parece um pouco chato, mas, então, lembra que a Física está em todo lugar, o tempo inteiro, mesmo que não possa ver os resultados diretos.

Por exemplo, você não pode ver as moléculas de ar movendo-se à sua volta, mas pode prever suas velocidades médias. Você pega sua calculadora e termômetro. Mede a temperatura do ar em cerca de 28°C ou 301 kelvin (veja o Capítulo 13 para ter esta conversão). Sabe que para as moléculas no ar, você pode medir sua energia cinética média com

$$E_{C_{\text{média}}} = 3/2kT$$

Agora, relacione os números:

$$E_{C_{\text{média}}} = 3/2kT = 3/2(1,38 \times 10^{-23})(301) = 6,23 \times 10^{-21} \text{ J}$$

A molécula média tem uma energia cinética de $6,23 \times 10^{-21}$ Joules. Por outro lado, as moléculas são bem pequenas – a qual velocidade $6,23 \times 10^{-21}$ Joules corresponde? Bem, você sabe isso do Capítulo 8

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

onde m é a massa e v é a velocidade, portanto

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

O ar é em grande parte nitrogênio e cada átomo de nitrogênio tem uma massa de cerca de $4,65 \times 10^{-26}$ kg (você mesmo pode descobrir isso encontrando a massa de um mol de nitrogênio e dividindo pelo número de átomos em um mol, N_A). Você pode relacionar os números para obter

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = 517 \text{ m/s} = 1.150 \text{ milhas por hora}$$

Puxa! Que imagem; números enormes de pequenos caras colidindo com você a 1.150 mph a cada segundo! Ótimo para você que as moléculas sejam tão pequenas. Imagine se cada molécula de ar pesasse algumas libras. O problema seria grande.

Calculando a energia cinética em um gás ideal

É verdade que os átomos têm muito pouca massa, mas existem muitos, muitos deles nos gases e como todos têm energia cinética, a energia cinética total pode acumular muito rapidamente. Quanta energia cinética total você pode encontrar em certa quantidade de gás? Cada molécula tem esta energia cinética média:

$$E_{C_{\text{média}}} = 3/2kT$$

Para descobrir a energia cinética total, você multiplica pelo número de moléculas, que é nN_A , onde n é o número de mols:

$$E_{C_{\text{total}}} = \frac{3}{2}nN_AkT$$

N_Ak é igual a R , a constante universal dos gases (veja a seção “Forjando a lei do gás ideal” anteriormente neste capítulo), portanto, esta equação torna-se

$$E_{C_{\text{média}}} = \frac{3}{2}nRT$$

Se você tiver 600 mols de hélio a 27°C , terá essa energia interna envolvida no movimento térmico:

$$E_{C_{\text{média}}} = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}(600,0)(8,31)(273,15 + 27) = 2,24 \times 10^6 \text{ J}$$

Isto se converte em um pouco menos de 1 Caloria (o tipo de unidade de energia que você encontra nas embalagens de alimentos).

Capítulo 15

Quando o Calor e o Trabalho Colidem: As Leis da Termodinâmica

Neste Capítulo

- ▶ Consequindo o equilíbrio térmico
- ▶ Armazenando o calor e a energia sob diferentes condições
- ▶ Embalando as máquinas térmicas para aumentar sua eficiência
- ▶ Chegando perto do zero absoluto

Se você já teve um trabalho de verão, sabe tudo sobre calor e trabalho, uma relação cercada pela *termodinâmica*. Este capítulo reúne dois tópicos, que tratei em detalhes no Capítulo 8 (trabalho) e no Capítulo 13 (calor). A termodinâmica tem três leis, muito parecidas com as de Newton, mas supera Newton com uma melhor – também tem uma lei zero da termodinâmica. Neste capítulo, falo sobre o equilíbrio térmico através da lei zero, conservação do calor e da energia através da primeira lei, fluxo do calor através da segunda lei e zero absoluto com a terceira lei. É hora de lançar o livro na termodinâmica.

Ganhando um Equilíbrio Térmico: A Lei Zero da Termodinâmica

As leis da termodinâmica começam com a lei zero. Você pode achar isso estranho, pois poucos grupos de objetos do cotidiano começam assim (“Fique atento com o degrau zero, é esquisito...”), mas você sabe como os físicos adoram as tradições. A *lei zero da termodinâmica* diz que dois objetos estão em equilíbrio térmico se o calor pode passar entre eles, mas nenhum calor está fazendo isso.

Por exemplo, se você e a piscina na qual está estiverem na mesma temperatura, nenhum calor está fluindo de você para ela ou dela para você (embora exista a possibilidade). Você está em equilíbrio termal. Por outro lado, se você pular na piscina no inverno, quebrando a cobertura de gelo, não estará em equilíbrio térmico com a água. E não desejará estar. (Não tente este experimento físico em casa!)



Para verificar o equilíbrio térmico, especialmente nos casos das piscinas congeladas nas quais você está preste a pular, deve usar um termômetro. Você pode verificar a temperatura da piscina com um termômetro e, então, verificar sua temperatura. Se as duas temperaturas concordarem – em outras palavras, se você estiver em equilíbrio térmico com o termômetro e o termômetro estiver em equilíbrio térmico com a piscina, você estará em equilíbrio térmico com a piscina.

O que o uso de um termômetro mostra é que os dois objetos em equilíbrio térmico com um terceiro objeto estão todos em equilíbrio térmico entre si – outro modo de determinar a lei zero.



Entre outros trabalhos, a lei zero estabelece a ideia de temperatura como um indicador do equilíbrio térmico. Os dois objetos mencionados na lei zero estão em equilíbrio com um terceiro, dando-lhe o que você precisa para estabelecer uma escala, tal como a escala Kelvin. Do ponto de vista da Física, a lei zero define uma base afirmando que nenhum calor resultante flui entre dois objetos na mesma temperatura.

Conservando Calor e Energia: A Primeira Lei da Termodinâmica

A *primeira lei da termodinâmica* é uma declaração de conservação da energia. Ela estabelece que a energia é conservada. A energia interna em um sistema, U_o , muda para um valor final U_f quando o calor, Q , é absorvido ou liberado pelo sistema e o sistema faz o trabalho, W , no seu ambiente (ou o ambiente faz trabalho no sistema), de modo que

$$U_f - U_o = \Delta U = Q - W$$

No Capítulo 8, apresentei muita análise sobre como conservar energia – energia mecânica de qualquer modo. Mostrei que a energia mecânica total – a soma das energias potencial e cinética – é conservada. Para dizer isso, você tem que trabalhar com sistemas onde nenhuma energia é perdida para aquecer – não poderia haver atrito, por exemplo. Tudo isso muda agora. O calor tem permissão para ficar (como você pode concluir com minha menção de termodinâmica). Agora, você pode dividir a energia total de um sistema, que inclui calor, trabalho e energia interna do sistema.

Essas três quantidades – calor, trabalho e energia interna – compõem toda a energia necessária a considerar, portanto, sua soma é conservada. Quando você adiciona a transferência de calor, Q , a um sistema e esse sistema não trabalha, a quantidade de energia interna no sistema, que é dada pelo símbolo U , muda conforme Q . Um sistema também pode perder energia fazendo trabalho no ambiente, como, por exemplo, quando um motor eleva peso na extremidade de um cabo.

Quando um sistema faz trabalho no ambiente e não desprende nenhum calor, sua energia interna, U , muda segundo W . Em outras palavras, você pode pensar em termos de calor como energia, assim, quando leva em conta todas as três quantidades – calor, trabalho e energia interna, a energia é conservada.



A primeira lei da termodinâmica é poderosa porque relaciona todas as quantidades. Se você souber duas delas, poderá encontrar a terceira.

Calculando a conservação



A quantidade Q , representando a transferência de calor, é positiva quando o sistema absorve calor e negativa quando o sistema libera calor. A quantidade W , representando o trabalho, é positiva quando o sistema faz trabalho em seu ambiente e negativa quando o ambiente faz trabalho no sistema.

Muitas pessoas ficam confusas tentando descobrir os valores positivos ou negativos de cada quantidade matemática. Não fique. Ao trabalhar com a primeira lei da conservação, você pode trabalhar a partir da ideia da conservação de energia. Digamos, por exemplo, que um motor faça 2.000 Joules de trabalho em seu ambiente enquanto libera 3.000 Joules de calor. Qual a variação da energia interna? Neste caso, você sabe que o motor faz 2.000 J de trabalho em seu ambiente, portanto, sabe que sua energia interna diminuirá em 2.000 J. E também libera 3.000 J de calor enquanto faz seu trabalho, assim, a energia interna do sistema diminui em 3.000 J.



Pense nos valores do trabalho e no calor fluindo do sistema como sendo negativos. No exemplo anterior, ocorre uma variação total da energia interna

$$\Delta U = -2.000 - 3.000 = -5.000 \text{ J}$$

A energia interna do sistema diminui em 5.000 J, o que faz sentido – o sistema faz 2.000 J de trabalho no ambiente e libera 3.000 J de calor. Por outro lado, e se o sistema *absorver* 3.000 J de calor a partir do ambiente enquanto faz 2.000 J de trabalho nesse ambiente? Neste caso, você tem 3.000 J de energia entrando e 2.000 J saindo. Os sinais agora são fáceis de entender:

$$\Delta U = -2.000 [\text{trabalho saindo}] + 3.000 [\text{calor entrando}] = 1.000 \text{ J}$$

Neste caso, a mudança resultante na energia interna do sistema é de +1.000 J. Você também pode ver um trabalho negativo quando o trabalho é feito no sistema pelo ambiente. Digamos, por exemplo, que um sistema absorva 3.000 J ao mesmo tempo que o ambiente executa 4.000 J de trabalho no sistema. Você pode dizer que essas duas energias fluirão no sistema, portanto, sua energia interna sobe em 3.000 J + 4.000 J = 7.000 J. Se você quiser colocar em números, use esta equação:

$$\Delta U = Q - W$$

e, então, note que, como o ambiente está fazendo trabalho no sistema, W é considerado negativo. Portanto, você obtém

$$\Delta U = Q - W = 3.000 - (-4.000) = 7.000 \text{ J}$$

Examinando os processos isobárico, isocórico, isotérmico e adiabático, ai meu!

Você encontra um grande número de quantificações neste capítulo – volume, pressão, temperatura etc. – e o modo como variam quando você faz trabalho. Por exemplo, se um gás estiver fazendo trabalho enquanto você mantém seu volume constante, o processo será diferente de quando você mantém sua pressão constante.

Existem quatro condições padrões sob as quais o trabalho é realizado na termodinâmica: pressão constante, volume constante, temperatura constante e calor constante.



Note que quando qualquer coisa mudar neste processos, a mudança será adotada como sendo *quase estática*, significando que a mudança ocorre bem lentamente a ponto de a pressão e de a temperatura serem iguais em todo volume do sistema.

Com pressão constante: isobárico

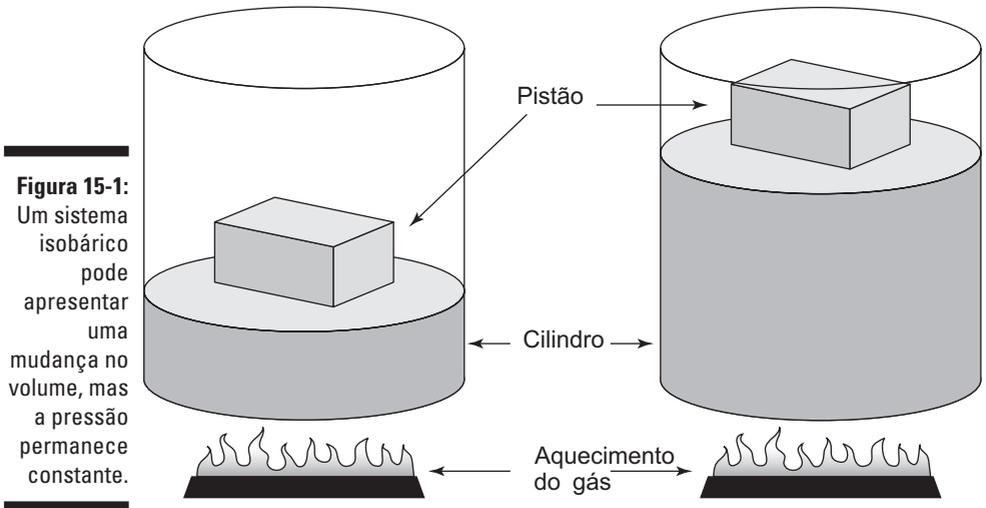
Quando você tem um processo onde a pressão fica constante, ele é chamado de *isobárico* (“bárico” significa pressão). Na Figura 15-1, você vê um cilindro com um pistão sendo elevado por uma quantidade de gás, quando é aquecido. O volume do gás está mudando, mas o pesado pistão mantém a pressão constante.

Que trabalho o sistema está fazendo quando o gás se expande? O trabalho é igual a F vezes s , onde F representa a força e s representa a distância, e Força é igual a P vezes A , onde P é a pressão e A é a área. Isto significa que

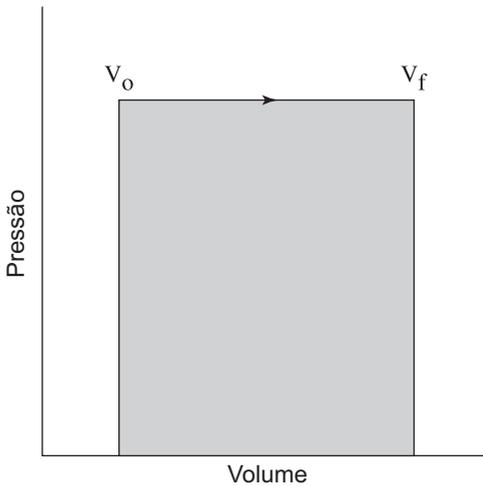
$$W = F\Delta s = P A \Delta s$$

Mas a área vezes a mudança em s é igual a ΔV , a mudança no volume, portanto, você obtém

$$W = P\Delta V$$



Graficamente, você pode ver como fica o processo isobárico na Figura 15-2, onde o volume está mudando enquanto a pressão fica constante. Como $W = P\Delta V$, o trabalho é a área gráfico abaixo.



Por exemplo, digamos que você tenha 60 m^3 de um gás ideal a 200 Pa (Pascals; veja o Capítulo 2) e aquece-o até ele expandir ($PV = nRT$, onde n representa o número de mols, R representa a constante do gás, 8.31 , e T representa a temperatura; veja o Capítulo 14) com um volume de 120 m^3 . Quanto trabalho faz o gás? Tudo que você tem que fazer é relacionar os números:

$$W = P\Delta V = (200)(120 - 60) = 12.000 \text{ J}$$

O gás faz 12.000 Joules de trabalho quando expande sob uma pressão constante.

Com volume constante: isocórico

E se a pressão em um sistema não for constante? Afinal, não é sempre que você encontra um pistão tão pesado, como na Figura 15-1. Muito provavelmente você verá um contêiner simples fechado, como na Figura 15-3, onde alguém jogou, com negligência, uma lata de spray no fogo. Neste caso, o volume é constante, portanto, este é um processo *isocórico*. Quando o gás dentro da lata de spray aquece, sua pressão aumenta, mas seu volume fica igual (a menos, claro, que a lata exploda).

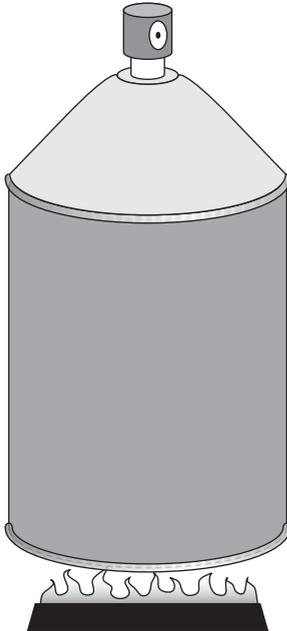


Figura 15-3:
Um sistema isocórico apresenta um volume constante quando as outras quantidades variam.

Quanto trabalho é feito na lata de spray? Veja o gráfico na Figura 15-4. Neste caso, o volume é constante, portanto, Fs (força vezes distância) é igual a zero. Nenhum trabalho está sendo feito – a área sob o gráfico é zero.

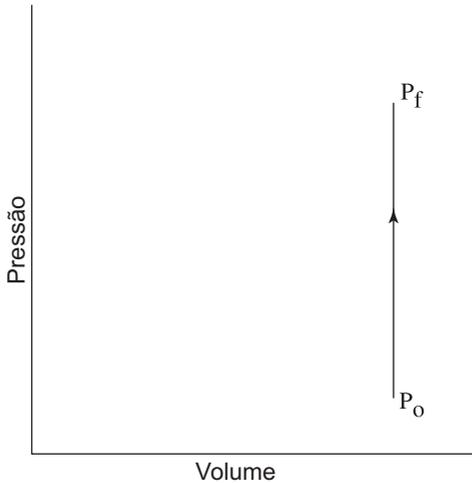


Figura 15-4:
Um gráfico isocórico.

Com temperatura constante: isotérmico

Em um sistema isotérmico, a temperatura permanece constante quando as outras quantidades mudam. Veja o aparelho notável na Figura 15-5. É especialmente designado para manter a temperatura constante do gás confinado, mesmo quando o pistão se eleva. Quando você aplica calor a esse sistema, o pistão levanta ou abaixa lentamente de tal modo a manter o produto, pressão vezes volume, constante. Como $PV = nRT$ (ver Capítulo 14), a temperatura fica constante também.

Como fica o trabalho quando o volume muda? Como $PV = nRT$, a relação entre P e V é

$$P = nRT / V$$

Você pode ver esta equação ilustrada no gráfico na Figura 15-6.

O trabalho aparece na área do gráfico a seguir. Mas o que é essa área? O trabalho realizado é dado pela seguinte equação, onde \ln é o logaritmo natural, R é a constante do gás, 8,31, V_f representa o volume final e V_0 representa o volume inicial:

$$W = nRT \ln (V_f / V_0)$$

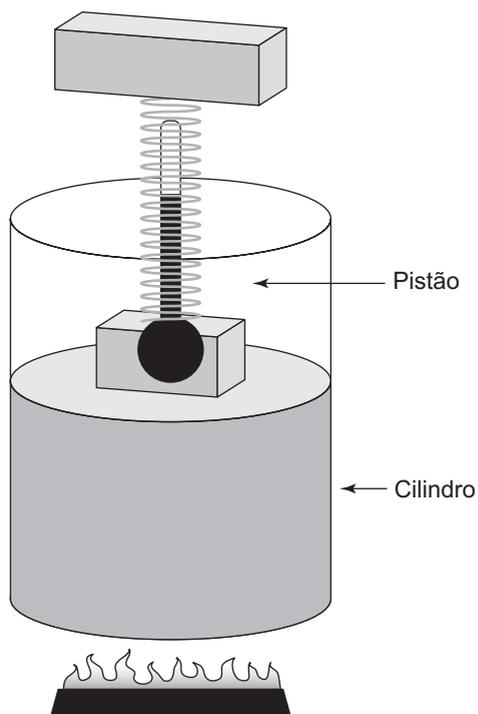


Figura 15-5: Um sistema isotérmico mantém uma temperatura constante em meio a outras mudanças.

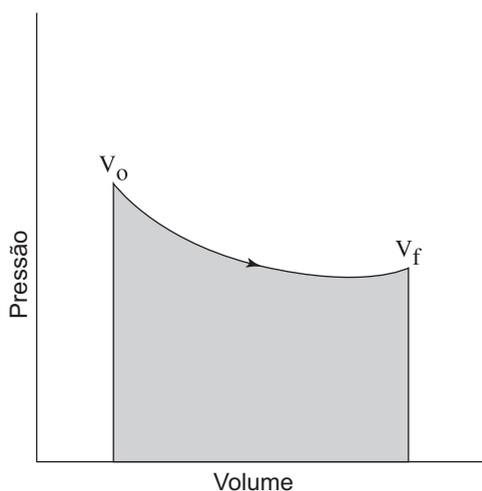


Figura 15-6: Um gráfico isotérmico.



Como a temperatura fica constante em um processo isotérmico e como a energia interna para um gás ideal (ver Capítulo 14) é igual a $(3/2)nRT$, a energia interna não muda. Portanto, você tem

$$\Delta U = 0 = Q - W$$

Em outras palavras,

$$Q = W$$

Portanto, se você afundasse o cilindro visto na Figura 15-5 em um banho quente, o que aconteceria? O calor, Q , fluiria no aparelho e como a temperatura do gás fica constante, todo esse calor se tornaria trabalho feito pelo sistema. Por exemplo, digamos que você tenha um mol de hélio para trabalhar em um dia chuvoso, com uma temperatura de 20°C e por diversão, decide expandi-lo de $V_o = 0,010 \text{ m}^3$ para $V_f = 0,020 \text{ m}^3$. Qual é o trabalho feito pelo gás na expansão? Tudo que você tem a fazer é relacionar os números:

$$W = nRT \ln(V_f/V_o) = (1,0)(8,31)(273,15 + 20) \ln(0,020 / 0,010) = 1.690 \text{ J}$$

O trabalho feito pelo gás é de 1.690 Joules. A mudança na energia interna do gás é de 0 Joule, como sempre em um processo isotermal. E como $Q = W$, o calor adicionado ao gás também é igual a 1.690 J.

Com calor constante: adiabático

Em um *processo adiabático*, o calor total em um sistema é mantido constante. Veja a Figura 15-7, que mostra um cilindro envolvido por um material isolante. O calor no sistema não escapa para nenhum lugar, portanto, quando uma mudança ocorre, é uma mudança adiabática.

Examinando o trabalho feito durante um processo adiabático, você pode dizer que $Q = 0$, portanto, ΔU (a variação da energia interna) = $-W$. Como a energia interna de um gás ideal é $U = (3/2)nRT$ (ver Capítulo 14), o trabalho realizado é

$$W = (3/2)nRT(T_o - T_f)$$

onde T_o representa a temperatura inicial e T_f representa a temperatura final. Portanto, se o gás realizar trabalho, será resultado de uma variação na temperatura – se a temperatura abaixar, o gás fará o trabalho no seu ambiente. Você pode ver como fica um gráfico da pressão *versus* volume para um processo adiabático na Figura 15-8. A curva adiabática nesta figura, chamada *adiábata*, é diferente das curvas isotérmicas, chamadas *isotérmicas*. O trabalho feito quando o calor total no sistema é constante é a área sob a adiabata, como mostrado na Figura 15-8.

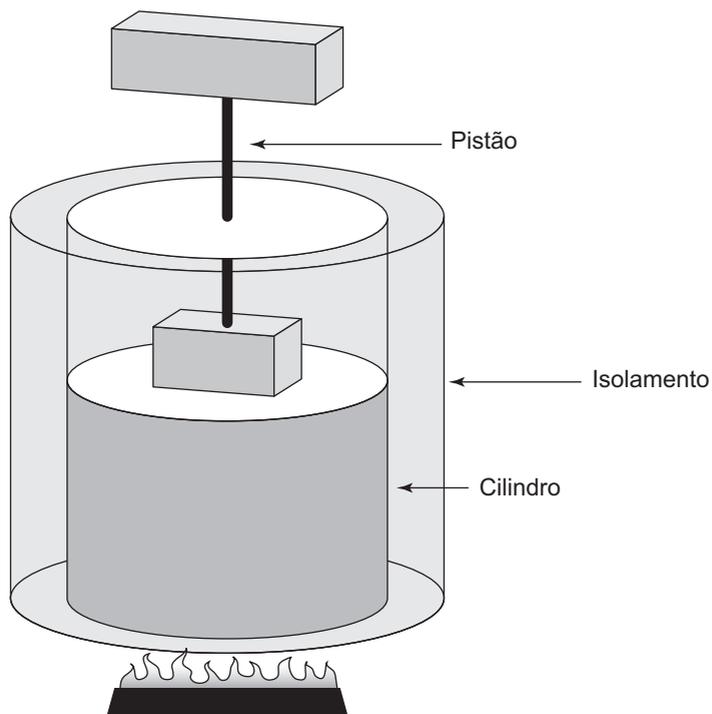


Figura 15-7: Um sistema adiabático não permite que o calor escape ou aumente.

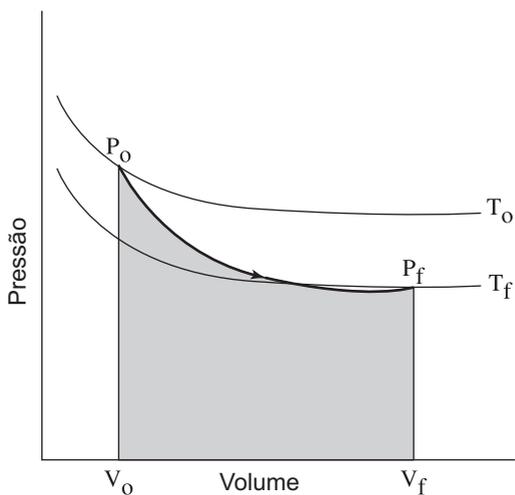


Figura 15-8: Um gráfico adiabático da pressão versus volume.

Descobrimo as capacidades do calor específico

Você pode relacionar a pressão e o volume iniciais à pressão e ao volume finais assim:

$$P_o V_o^\gamma = P_f V_f^\gamma$$

O que é γ ? É a proporção da capacidade do calor específico de um gás ideal com pressão constante dividida pela capacidade do calor específico de um gás ideal com volume constante, c_p / c_v . (A medida de quanto calor um objeto pode manter é chamada de sua *capacidade de calor específico*; veja o Capítulo 13 para saber mais.) Permita-me fugir do velho quadro-negro e giz. Para descobrir as capacidades do calor específico, você precisa relacionar calor, Q , e temperatura, T : $Q = cm\Delta T$, onde c representa o calor específico, m representa a massa e ΔT representa a variação na temperatura. Porém, neste caso, é mais fácil falar em termos de *capacidade de calor específico molar*, que é dada por C e cujas unidades são Joules/(mol·K). Você usa um número de mols, n , para a capacidade de calor específico molar ao invés da massa, m :

$$Q = Cn\Delta T$$

Como você pode determinar C ? Você deve levar em conta duas quantidades diferentes, C_p (pressão constante) e C_v (volume constante). A primeira lei da termodinâmica (veja a seção anterior neste capítulo) determina que $Q = \Delta U + W$, portanto, se você puder obter ΔU e W em termos de T , conseguiu. O trabalho feito é $P\Delta V$, portanto, com um volume constante, $W = 0$. E a variação na energia interna de um gás ideal é $(3/2)nR\Delta T$ (ver Capítulo 14), portanto, Q com um volume constante é

$$Q_v = (3/2)nR(T_f - T_o)$$

Com uma pressão constante, W não é 0, pois é $P\Delta V$. E como $PV = nRT$, você pode dizer que $W = P(V_f - V_o) = nR(T_f - T_o)$, portanto, Q com uma pressão constante é

$$Q_p = (3/2)nR(T_f - T_o) + nR(T_f - T_o)$$

Assim, como você obtém as capacidades de calor específico molar a partir disto? Você decidiu que $Q = Cn\Delta T$, portanto, $C = Q / n\Delta T$. Dividir as duas equações acima por $n\Delta T$ dará

$$C_v = (3/2)R$$

$$C_p = (3/2)R + R = (5/2)R$$

Agora, você tem as capacidades de calor específico molar de um gás ideal. A proporção que você deseja, γ , é a proporção destas duas equações:

$$\gamma = C_p / C_v = 5 / 3$$



Você pode relacionar pressão e volume em dois pontos quaisquer em uma adiabata (veja a seção “Com calor constante: adiabático”) assim:

$$P_o V_o^{5/3} = P_f V_f^{5/3}$$

Por exemplo, se você tivesse 1 litro de gás a 1 atmosfera e terminasse depois de uma mudança adiabática (onde nenhum calor é ganho ou perdido) com 2 litros de gás, qual seria a nova pressão, P_f ? Colocar P_f em um lado da equação fornecerá

$$P_f = P_o V_o^{5/3} / V_f^{5/3}$$

Relacionar os números fornecerá

$$P_f = P_o V_o^{5/3} / V_f^{5/3} = [(1,0)(1,0)^{5/3}] / (2,0)^{5/3} = 0,314 \text{ atmosfera}$$

A nova pressão seria 0.314 atmosfera.

Quando o Calor Flui: A Segunda Lei da Termodinâmica

A *segunda lei da termodinâmica* diz, formalmente falando, que o calor flui naturalmente de um objeto com uma temperatura mais alta para um objeto com uma temperatura mais baixa, e não flui sozinho na direção oposta. A lei certamente nasceu da observação diária – quando foi a última vez que você notou um objeto ficando mais frio sozinho que seu ambiente, a menos que outro objeto estivesse fazendo algum tipo de trabalho nele? Você pode forçar o calor fluir de um objeto através do trabalho – como na geladeira ou ar-condicionado – mas não aconteceria por si só.

Colocando o calor para trabalhar: máquinas térmicas

Você tem muitas maneiras de colocar o calor para trabalhar. Pode ter um motor a vapor, por exemplo, que tem uma caldeira e um conjunto de pistões ou pode ter um reator atômico que gera um vapor superaquecido que pode mover uma turbina. As máquinas que contam com uma fonte de calor para fazer o trabalho são chamadas de *máquinas térmicas*; você pode ver como funcionam consultando a Figura 15-9. Uma fonte de calor fornece calor para a máquina, que faz o trabalho. E o calor não utilizado é enviado para um *dissipador de calor*. O dissipador de calor poderia ser o ar do ambiente ou um radiador cheio de água, por exemplo. Desde que o dissipador de calor esteja em

uma temperatura mais baixa do que a fonte de calor, a máquina térmica poderá fazer o trabalho – pelo menos, teoricamente.

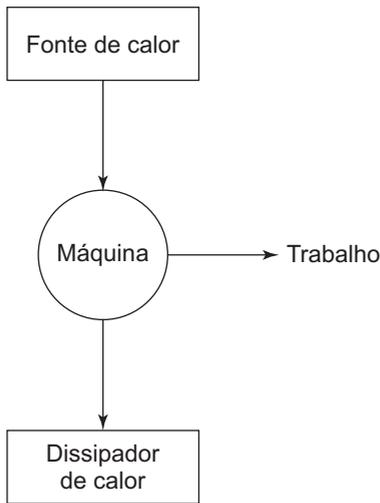


Figura 15-9:
Uma máquina térmica transforma calor em trabalho.

Avaliando o trabalho do calor: A eficiência das máquinas térmicas

O calor fornecido por uma fonte de calor é dado pelo símbolo Q_h (para fonte de calor) e o calor enviado para um dissipador de calor (veja a seção anterior) é dado pelo símbolo Q_c (para dissipador de calor a frio). Com alguns cálculos, você pode encontrar a eficiência de uma máquina térmica. É a proporção do trabalho que a máquina faz, W , sobre a quantidade de entrada de calor – a fração do calor de entrada que se converte em trabalho:

$$\text{Eficiência} = \text{Trabalho} / \text{Entrada de calor} = W / Q_h$$

Se todo o calor de entrada for convertido em trabalho, a eficiência será 1,0. Se nenhum calor de entrada for convertido em trabalho, a eficiência será 0,0. Geralmente, a eficiência é dada como uma porcentagem, assim, você expressa esses valores como 100% e 0 por cento. Como a energia total é conservada, o calor na máquina deve ser igual ao trabalho feito, mais o calor enviado para o dissipador de calor, significando que

$$Q_h = W + Q_c$$

Isto significa que você pode reescrever a eficiência em termos de Q_h e Q_c :

$$\text{Eficiência} = W / Q_h = (Q_h - Q_c) / Q_h = 1 - (Q_c / Q_h)$$

Digamos, por exemplo, que você tenha uma máquina térmica que seja 78% eficiente e possa produzir $2,55 \times 10^7$ Joules para esvaziar uma rodovia de água. Quanto calor ela usa e quanto rejeita? Bem, você sabe que $W = 2,55 \times 10^7$ J e que

$$\text{Eficiência} = W / Q_h = 2,55 \times 10^7 \text{ J} / Q_h = 0,78$$

Isso significa que

$$Q_h = 2,55 \times 10^7 \text{ J} / 0,78 = 3,27 \times 10^7 \text{ J}$$

A quantidade do calor de entrada é $3,27 \times 10^7$ Joules. Portanto, quanto calor f é enviado para o dissipador de calor, Q_c ? Você sabe que

$$Q_h = W + Q_c$$

portanto,

$$Q_h - W = Q_c$$

Relacionar os números fornecerá

$$Q_h - W = 3,27 \times 10^7 - 2,55 \times 10^7 = 0,72 \times 10^7 = Q_c$$

A quantidade de calor enviada para o dissipador de calor é de $0,72 \times 10^7$ Joules.

Carnot diz que não se pode ter tudo

Dada a quantidade de trabalho que uma máquina térmica faz e sua eficiência, você pode calcular quanto calor entra e quanto sai (junto com uma pequena ajuda da lei de conservação da energia, que relaciona o trabalho, calor que entra e calor que sai; ver Capítulo 8). Mas, que tal criar máquinas térmicas com 100% de eficiência? Seria ótimo para a eficiência se você pudesse converter todo o calor que entra em uma máquina térmica em trabalho. Carnot diz que não. As máquinas térmicas têm algumas perdas inevitáveis no mundo real, como, por exemplo, através do atrito nos pistões em uma máquina a vapor. No século XIX, um engenheiro chamado Sadi Carnot estudou esse problema e chegou à conclusão que o melhor que você pode fazer, de modo eficiente, é usar uma máquina que não tem tais perdas.

Se a máquina não tiver perdas, o sistema retornará ao mesmo estado no qual estava antes do processo ter ocorrido. Isso é chamado de *processo reversível*. Por exemplo, se uma máquina térmica perde energia ao superar o atrito, ela não tem um processo reversível, pois não termina no mesmo estado quando o processo se completa. Assim, quando você tem a máquina térmica mais eficiente? Quando a máquina opera de modo reversível (ou seja, quando o sistema não

tem perdas). Hoje, os físicos chamam isso de princípio de Carnot. O *princípio de Carnot* diz que nenhuma máquina que não seja reversível pode ser tão eficiente quanto uma máquina reversível, e todas as máquinas reversíveis que funcionam com duas temperaturas iguais têm a mesma eficiência.

Construindo a máquina de Carnot

Carnot propôs sua própria máquina – a *máquina de Carnot*. Sua máquina opera de modo reversível, o que nenhuma máquina real pode fazer, portanto, ele criou um tipo de máquina ideal. Na máquina de Carnot, o calor que vem da fonte de calor é fornecido com uma temperatura constante, T_h . E o calor rejeitado entra no dissipador de calor, que está com uma temperatura constante, T_c . Como a fonte de calor e o dissipador de calor estão sempre com a mesma temperatura, você pode dizer que a proporção do calor fornecido e rejeitado é igual à proporção dessas temperaturas (expressadas em Kelvins):

$$Q_c/Q_h = T_c/T_h$$

E como a eficiência de uma máquina térmica é:

$$\text{Eficiência} = 1 - (Q_c/Q_h)$$

a eficiência de uma máquina de Carnot é

$$\text{Eficiência} = 1 - (Q_c/Q_h) = 1 - (T_c/T_h)$$

Esta equação representa a *eficiência máxima possível* de uma máquina térmica. Você não pode fazer nada melhor que isso. E como a terceira lei da termodinâmica determina (veja a seção final neste capítulo), você não pode atingir o zero absoluto, significando que T_c nunca é 0, portanto, você nunca pode ter uma máquina térmica com 100% de eficiência.

Usando a equação para uma máquina Carnot

Aplicar a equação para a eficiência máxima possível (veja a seção anterior) é fácil. Por exemplo, digamos que você proponha uma invenção nova extraordinária: uma máquina Carnot que usa um plano para conectar o piso (27°C) com uma fonte de calor ao ar a 33.000 pés como o dissipador de calor (cerca de -25°C). Qual é a eficiência máxima que você pode obter para sua máquina térmica? Depois de converter as temperaturas em Kelvin, ligar os números fornecerá

$$\text{Eficiência} = 1 - (Q_c/Q_h) = 1 - (T_c/T_h) = 1 - (248,15 / 300,15) = 0,173$$

Sua máquina Carnot pode ser apenas 17,3% eficiente – não é muito impressionante. Por outro lado, suponha que você use a superfície do sol (cerca de 5.800 kelvin) como a fonte de calor e o espaço interplanetário (cerca de 3,4 kelvin) como o dissipador de calor (como são as histórias de ficção científica). Você teria uma história bem diferente:

$$\text{Eficiência} = 1 - (Q_c/Q_h) = 1 - (T_c/T_h) = 1 - (3,4 / 5.800) = 0,999$$

Você consegue uma eficiência teórica para sua máquina Carnot, de 99,9%.

Ficando Frio: A Terceira (e a Última Absoluta) Lei da termodinâmica

A terceira lei da termodinâmica é bem simples – apenas diz que você não pode atingir o zero absoluto através de nenhum processo que usa um número finito de etapas. Isso quer dizer que você não pode chegar ao zero absoluto. Cada etapa no processo de diminuir a temperatura de um objeto para o zero absoluto pode diminuir cada vez mais temperatura, mas você não consegue chegar lá, a menos que use um número infinito de etapas, o que não é possível.

As estranhas recompensas do quase zero

Embora você não possa chegar ao zero absoluto com processos conhecidos, pode chegar cada vez mais perto e se tiver algum equipamento caro, descobrirá cada vez mais fatos estranhos sobre o mundo perto do zero. Tenho um colega que descobriu como o hélio líquido funciona em temperatu-

ras muito, muito baixas. Por exemplo, o hélio fica tão fora do padrão de comportamento que escapará sozinho dos contêineres. Por estas e algumas outras observações, ele e alguns amigos ganharam o Prêmio Nobel, caras de sorte.

Parte V

Descobrimos a Carga da Eletricidade e do Magnetismo

A 5ª Onda

Por Rich Tennant



“... finalmente, os pesquisadores trabalhando após horas devem limitar sua investigação ao comportamento dos prótons e dos elétrons e, futuramente, abster-se de colocar ovos no acelerador de partículas.”

Nesta parte...

Duas das forças mais poderosas em seu ambiente – eletricidade e magnetismo – são invisíveis. As pessoas as têm por certo, mas se você fizer perguntas básicas sobre essas forças, irá vê-las balançar a cabeça e se afastar de você. Esta é a tarefa da Parte V – esclarecer todos os mistérios em torno da eletricidade e do magnetismo. Você conhecerá a história inteira, inclusive como o produto da eletricidade e o magnetismo juntos – a luz – comportam-se com espelhos e lentes.

Capítulo 16

Movendo com a Eletricidade Estática

Neste Capítulo

- ▶ Avaliando a carga e a força na eletricidade
- ▶ Examinando o campo elétrico
- ▶ Trabalhando o campo elétrico com cargas pontuais
- ▶ Simplificando o campo elétrico com capacitores de placa paralela
- ▶ Encontrando o potencial elétrico na forma de voltagem
- ▶ Combinando o potencial elétrico com cargas pontuais

Aletricidade está em tudo à sua volta. Cada átomo tem suas próprias cargas movendo-se em velocidades incríveis. Algumas vezes, essas cargas aparecem quando você menos espera, como quando se move rapidamente em um dia seco e toca em uma maçaneta de metal ou quando fecha a porta de seu carro. Outras vezes, você espera que essas cargas estejam à sua volta, como quando liga uma luz e sabe que a eletricidade está fluindo.

A atmosfera começa a ficar elétrica neste capítulo, quando falamos sobre a velocidade das cargas – as reações acontecem porque você tem um excesso de carga (por exemplo, quando tem elétrons extras). Isso é a eletricidade estática. Este capítulo (e o seguinte) trata das cargas que começam a se mover, que é o que gera eletricidade. Analiso as cargas elétricas, potencial elétrico, campos elétricos, forças entre as cargas e muito mais. Tudo começa com os elétrons.

Mais e Menos: Cargas de Elétron e Próton

Basicamente, os átomos consistem em um núcleo contendo prótons carregados, nêutrons neutros e elétrons leves que orbitam o núcleo, em altas velocidades.

As partículas carregadas – elétrons e prótons – têm a mesma grandeza de carga, que é

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

onde C é *Coulomb*, a unidade MKS da carga (ver Capítulo 2). A carga de um próton é $+1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e a carga de um elétron é $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (a carga negativa do elétron é apenas uma convenção). Porém, os elétrons são as partículas que geram a eletricidade estática e a eletricidade padrão que flui nos fios. Portanto, se você tiver 1 Coulomb inteiro de carga, quantas elétrons terá? Como cada elétron tem uma grandeza de carga de $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, você terá

$$\text{Número total de elétrons} = 1 / 1,6 \times 10^{-19} = 6,25 \times 10^{18} \text{ elétrons}$$

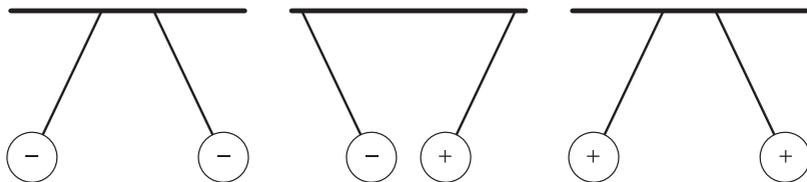
Você precisa de $6,25 \times 10^{18}$ elétrons para gerar 1 Coulomb. Mas coisas interessantes acontecem quando você obtém números enormes de elétrons. Como parentes dispersando no final de uma reunião familiar cansativa, eles desaparecem rapidamente.

Empurra e Puxa: Forças Elétricas

As cargas elétricas exercem uma força entre si e se você tivesse $6,25 \times 10^{18}$ elétrons, por exemplo, teria problemas para mantê-los juntos. Toda matéria tem cargas elétricas, mas se um objeto tiver um número excessivo de elétrons, terá uma carga *negativa resultante*. E se um objeto tiver um déficit de elétrons, terá uma carga *positiva resultante*.

Ao trabalhar com ímãs, as cargas iguais se repelem e as cargas diferentes se atraem. Veja a Figura 16-1, onde algumas bolas presas com fios têm cargas elétricas. Os pares com carga igual (++ ou --) irão repelir-se, mas os pares com carga diferente (+- ou -+) irão atrair-se.

Figura 16-1:
As forças de atração repulsão entre as cargas.



Carregando na Lei de Coulomb

A carga não é totalmente positiva e negativa; você tem que envolver os números. Qual o poder destas forças os objetos carregados? Tudo depende de quanta carga está envolvida e a distância que as cargas estão. No Capítulo 5, você viu outra força que atua entre os objetos – a força gravitacional:

$$F = -Gm_1m_2 / r^2$$

onde F é a força, G é a constante gravitacional universal, m_1 é a massa de um objeto, m_2 é a massa do segundo e r é a distância entre eles. Depois de fazer a medição no laboratório, a força elétrica fica assim

$$F = kq_1q_2 / r^2$$

Neste caso, q_1 e q_2 são as duas cargas atuando entre si, medidas em Coulombs, e r é a distância entre elas. Portanto, o que k representa? Uma constante cujo valor é $8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ (você sempre terá este valor, portanto, não se preocupe em memorizá-lo).



$F = kq_1q_2 / r^2$ é chamada de *lei de Coulomb*. Fornece a grandeza da força entre as cargas. Note que quando as cargas têm o mesmo sinal, a força entre elas é positiva, significando que elas se repelem; quando as cargas têm sinais opostos, a força entre elas é negativa, significando que a força atrai as duas cargas.



Algumas vezes, você vê a lei de Coulomb escrita em termos de uma constante ϵ_0 , que é chamada de *permissividade do espaço livre* (a constante tem relação com a facilidade com que o campo elétrico gerado por uma carga pode estender-se no espaço):

$$F = (q_1q_2) / 4\pi\epsilon_0 r^2$$

A constante ϵ_0 tem um valor de $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{n}\cdot\text{m}^2)$.

Reunindo objetos

A distância entre os objetos é uma parte importante da carga e da lei de Coulomb (veja as duas seções anteriores). Digamos, por exemplo, que você separa duas bolas em 1 metro e dá a cada bola 1 Coulomb de carga – uma negativa, uma positiva. Agora, você precisa mantê-las separadas – mas qual é a força atraindo as duas? Adicione números à lei de Coulomb:

$$F = \frac{kq_1q_2}{r_2} = \frac{(8,99 \times 10^9)(1,0)(-1,0)}{(1,0)^2} = 8,99 \times 10^9 \text{ N}$$

Você precisa de $8,99 \times 10^9$ Newtons de força para manter as bolas separadas. Esse é um número exageradamente grande de Newtons – são cerca de 1,1 bilhões de libras ou 560.000 toneladas, mais ou menos o peso de 10 navios petroleiros carregados. Melhor repensar ao colocar um Coulomb inteiro de carga em cada bola. Como você pode ver, as forças elétricas podem ficar muito grandes quando você coloca Coulombs inteiros de carga.

Calculando a velocidade dos elétrons

Você pode relacionar a força eletrostática e a força centrípeta (ver Capítulo 10) vendo a órbita circular de um elétron. Imagine que você esteja assistindo a uma aula expositiva de Física, trabalhando com grupo de átomos de hidrogênio. Você sabe que cada átomo é composto de um único elétron circulando em um único próton. É pequeno demais para ver, mas você sabe que o elétron está movendo-se em torno do próton muito rapidamente. Essa compreensão faz você pensar – com qual velocidade o elétron está movendo-se? Você sabe que a força eletrostática está entre o elétron e o próton, e supondo que a órbita do elétron seja um círculo, a força eletrostática é igual à força centrípeta (ver Capítulo 10), portanto, tem a lei de Coulomb igualando-se à equação para a força centrípeta:

$$F = (kq_1q_2) / r^2 = mv^2 / r$$



A massa de um elétron é $9,11 \times 10^{-31}$ kg e o raio de sua órbita é $5,29 \times 10^{-11}$ m. Portanto, relacionar os números para obter a força eletrostática – a constante k e as cargas do elétron e do próton – fornecerá

$$F = \frac{kq_1q_2}{r_2} = \frac{(8,99 \times 10^9)(1,6 \times 10^{-19})(1,6 \times 10^{-19})}{(5,29 \times 10^{-11})^2} = 8,22 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Você encontrou a força entre o elétron e o próton, e essa força tem que ser igual à força centrípeta, assim

$$F = mv^2 / r = (9,11 \times 10^{-31})v^2 / (5,29 \times 10^{-11}) = 8,22 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Determinar v fornecerá $2,18 \times 10^6$ metros por segundo ou cerca de *4,86 milhões de milhas por hora*. Tente imaginar essa velocidade; está aproximando-se de 1% da velocidade da luz.

Vendo as forças entre diversas cargas



Nem todo problema de carga que você encontra apresenta duas cargas atuando entre si. Sempre que você tem mais de duas cargas afetando-se, precisa usar vetores para encontrar a força resultante em qualquer carga. (Para obter mais informações sobre os vetores, veja o Capítulo 4).

Veja a Figura 16-2, que apresenta três cargas, todas atuando entre si – duas cargas negativas e uma positiva. Qual é a força resultante na carga positiva?

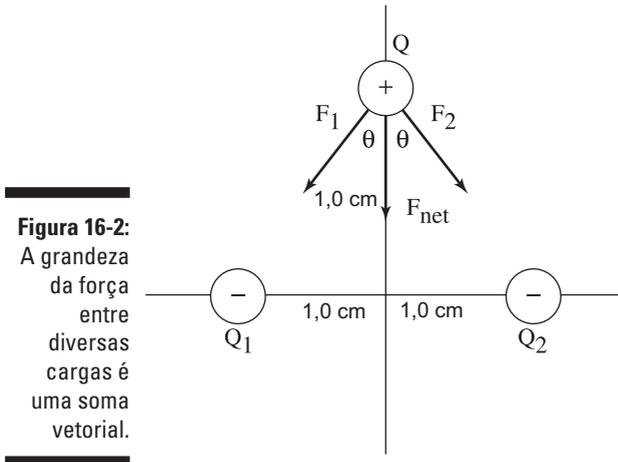


Figura 16-2:
A grandeza da força entre diversas cargas é uma soma vetorial.

As forças na carga positiva, \$Q\$, devido às duas cargas negativas, \$Q_1\$ e \$Q_2\$, são mostradas na Figura 16-2 como \$F_1\$ e \$F_2\$. As duas forças somam-se para dar \$F_{\text{resultante}}\$. Supondo que \$Q_1 = Q_2 = -1,0 \times 10^{-8}\text{ C}\$, \$Q = 3,0 \times 10^{-8}\text{ C}\$ e as cargas estão em \$1,0\text{ cm}\$ nos eixos \$X\$ e \$Y\$, como mostrado na Figura, qual é \$F_{\text{resultante}}\$? Usando o teorema de Pitágoras (ver Capítulo 2), você sabe que \$\theta = 45^\circ\$. Na grandeza, \$F_1 = F_2\$, portanto,

$$F_{\text{resultante}} = 2F_1 \cos(45^\circ) = \sqrt{2}F_1$$

Qual é a grandeza de \$F_1\$?

$$F_1 = \frac{kQ_1Q}{r_2} = \frac{(8,99 \times 10^9)(1,0 \times 10^{-8})(3,0 \times 10^{-8})}{(0,10)^2} = 8,99 \times 10^{-5}\text{ N}$$

\$F_1\$ é igual a \$8,99 \times 10^{-5}\text{ N}\$, significando que você pode encontrar a força resultante na carga positiva:

$$F_{\text{resultante}} = 2F_1 \cos(45^\circ) = \sqrt{2}F_1 = 1,27 \times 10^{-4}\text{ N}$$

A grandeza da força resultante na carga positiva, encontrada como uma soma vetorial (ver Capítulo 4), é \$1,27 \times 10^{-4}\text{ N}\$.

Influência à Distância: Campos Elétricos

Para encontrar a força entre as cargas, você tem que saber a grandeza (ou o tamanho) de ambas as cargas. Mas se você tiver um conjunto de cargas, terá um conjunto de grandezas. E se outra pessoa quiser adicionar uma carga ao conjunto? Você não sabe quanta carga a pessoa adicionará – a pessoa trará uma carga de 1,0 Coulomb para o conjunto? Que tal $1,0 \times 10^{-8}\text{C}$ ou $1,0 \times 10^{-3}\text{C}$? Quem sabe?

É por isso que os físicos criaram o conceito do *campo elétrico* – para descrever como o conjunto de cargas funcionará com alguma outra carga. Tudo que as outras pessoas têm que fazer para trabalhar com seu conjunto de cargas é multiplicar o campo elétrico em qualquer ponto (depois de você lhes dizer qual é o campo elétrico de seu conjunto) pelas cargas que elas têm. Você expressa um campo elétrico em Newtons por Coulomb e usa o símbolo E . (Note que um campo elétrico é uma quantidade vetorial, significando que tem uma direção e uma grandeza; ver Capítulo 4). Eis como você define um campo elétrico:

$$E = F / q$$

onde F representa a força e q representa a carga elétrica. Em outras palavras, o campo elétrico é a força por Coulomb em qualquer ponto. A direção do campo elétrico em qualquer ponto é a força sentida por uma *carga positiva*.

Digamos, por exemplo, que você esteja caminhando com seu animal de estimação com uma carga de 1,0 Coulomb. É um dia ensolarado e vocês dois estão divertindo-se com o tempo, mas, de repente e inexplicavelmente, você se encontra em um campo elétrico de 5,0 Newtons por Coulomb, apontando na direção da qual veio. Você pode ver a imagem na Figura 16-3.

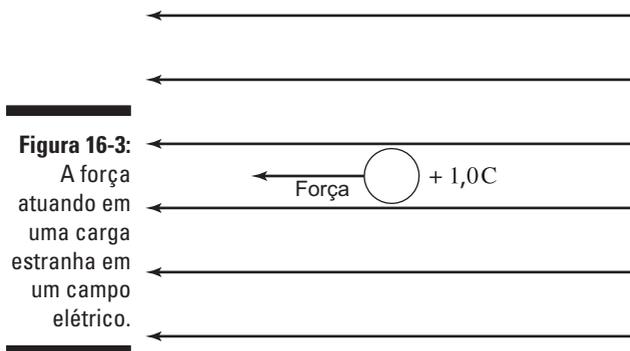


Figura 16-3:
A força atuando em uma carga estranha em um campo elétrico.

O que aconteceria? Seu animal de estimação com uma carga de 1,0 C de repente sentiria uma força oposta em seu percurso:

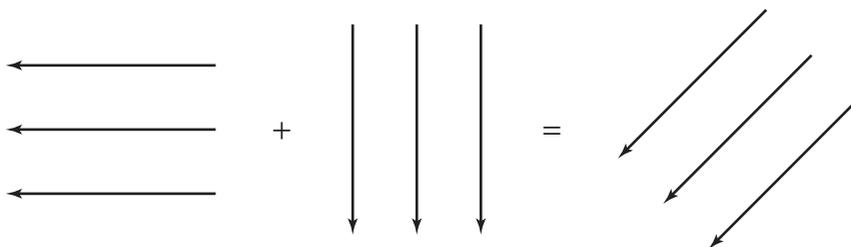
$$F = qE = (1,0)(5,0) = 5,0 \text{ Newtons}$$



Se você e seu animal de estimação com uma carga de 1,0 C virarem, a força estará em seu novo percurso. É como os campos elétricos funcionam – alguém lhe diz qual é o campo elétrico e você pode explicar quanta força seria exercida em uma determinada carga nesse campo. A força estará na mesma direção do campo elétrico se a carga for positiva, mas se a carga for negativa, a força estará na direção oposta.

Como o campo elétrico em qualquer ponto é um vetor (significando que tem uma direção e uma grandeza), você pode achá-lo através da adição vetorial (veja o Capítulo 4 para saber as particularidades da adição vetorial). Você pode ver isso mostrado na Figura 16-4, onde dois campos elétricos, um horizontal e um vertical, existem na mesma área. O campo elétrico resultante é a sua soma.

Figura 16-4:
Adicionar campos elétricos produzirá um campo elétrico resultante.



Vindo de todas as direções: campos elétricos a partir de cargas pontuais

Nem todos os campos elétricos encontrados parecem bons e regulares (como o que você vê na Figura 16-3). Por exemplo, como é o campo elétrico de uma carga pontual? Uma *carga pontual* é apenas uma carga minúscula. Você sabe que se tiver uma carga Q , ela criará um campo elétrico, mas o que será esse campo elétrico? Bem, a equação para um campo elétrico, $E = F / q$, torna essa pergunta bem fácil de descobrir. Digamos, por exemplo, que você tenha uma *carga de teste* (uma carga que você usa para medir as forças), q , e meça a força a partir da carga Q em vários pontos. A equação seguinte mostra a força obtida (usando a equação analisada anteriormente na seção “Empurra e puxa: forças elétricas” neste capítulo):

$$F = (kqQ) / r^2$$

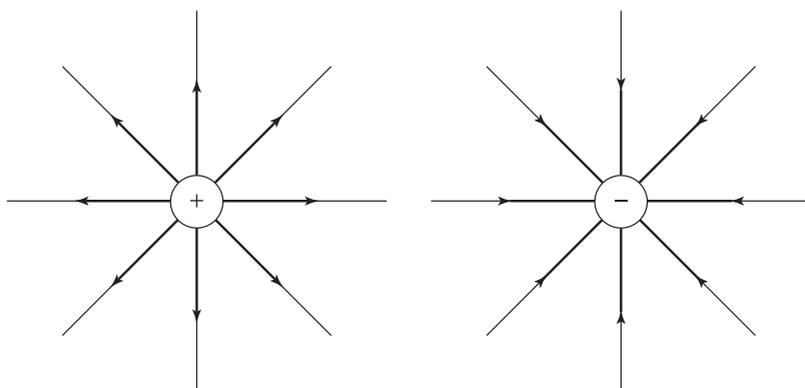
Portanto, qual é o campo elétrico? Você divide pela grandeza de sua carga de teste, q :

$$E = F / q = kQ / r^2$$

A grandeza do campo elétrico de uma carga pontual é $E = kQ / r^2$. O campo elétrico é um vetor (ver Capítulo 4), portanto, em qual direção ele aponta? Para determinar a direção do campo elétrico, volte para sua carga de teste, q , e diga se q é uma carga positiva (lembre-se, um campo elétrico é definido como a força por Coulomb em uma carga positiva).

Em qualquer lugar no campo elétrico, a força em q a partir de Q é *radial* ou está em uma linha que conecta os centros das duas cargas. Quando Q for positivo, a força em q , que também é positiva, será afastada diretamente de Q ; portanto, o campo elétrico em qualquer ponto também será afastado diretamente de Q . Você pode ver isso na Figura 16-5, que exibe um campo elétrico como uma coleção de linhas de campos elétricos, uma ideia conduzida primeiro por Michael Faraday, no século XIX.

Figura 16-5: Os campos elétricos positivos apontam para longe das cargas pontuais.



Ver as linhas dos campos elétricos pode dar uma boa ideia de como é um campo elétrico qualitativamente (não quantitativamente, em termos de números). Quando as linhas dos campos elétricos estão próximas em um ponto A em comparação com outro ponto B, o campo elétrico é mais forte em A do que em B. Observe também que o campo elétrico aponta para fora a partir das cargas positivas e para dentro em direção às cargas negativas, como mostrado na Figura 16-5.

E se pedirem que você examine o campo elétrico a partir de mais de uma carga? Você terá que adicionar o campo elétrico como vetores em cada ponto. Por exemplo, se você tiver duas cargas pontuais – uma carga positiva e uma negativa – acabará com o campo elétrico visto na Figura 16-6.



As linhas do campo (como na Figura 16-6) iniciam a partir de uma carga positiva e continuam até terminarem em uma carga negativa; elas não iniciam e param simplesmente no espaço vazio.

Carregando bem e regularmente: campos elétricos em capacitores de placa paralela

Ao lidar com vetores (ver Capítulo 4), um campo elétrico entre diversas cargas pontuais não é o conceito mais fácil de entender (veja a seção anterior para ter uma análise das diversas cargas pontuais). Para facilitar sua vida, os físicos propuseram o *capacitor de placa paralela*. Um capacitor é um objeto que armazena carga como faz um capacitor de placa paralela – mantendo as cargas separadas para que elas se atraiam, mas sem permitir que elas vão e migrem espontaneamente de uma para outra.

Veja a Figura 16-7. Nela, uma carga $+q$ é propagada igualmente em uma placa e uma carga $-q$ é propagada igualmente em outra. Isso é ótimo, pois o campo elétrico a partir de todas as cargas pontuais nessas placas cancela todos os componentes, exceto aqueles que apontam entre as placas. Em outras palavras, os capacitores de placa paralela fornecem campos elétricos constantes, tudo na mesma direção, que são mais fáceis de trabalhar do que os campos a partir das cargas pontuais.

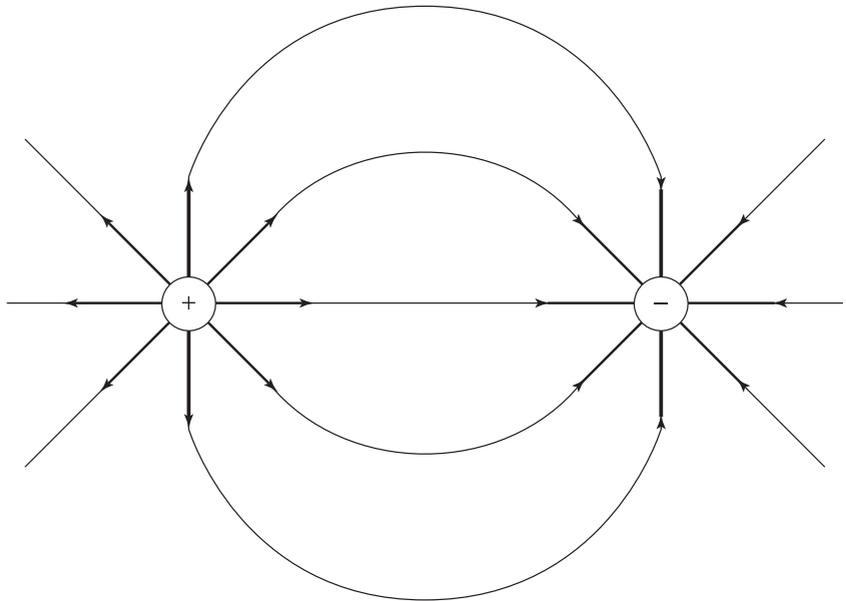
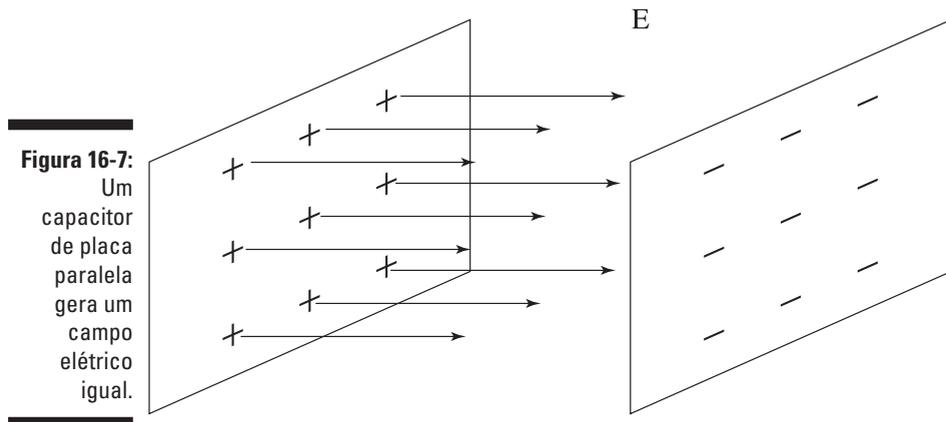


Figura 16-6:
Adicionando
campos
elétricos
a partir de
duas cargas
pontuais.



Se você fizer muito cálculo, poderá descobrir que o campo elétrico, E , entre as placas é constante (desde que as placas estejam próximas o suficiente) e, em grandeza, é igual a

$$E = q / \epsilon_0 A$$

onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{n}\cdot\text{m}^2)$ (veja a seção “Carregando na lei de Coulomb” anteriormente neste capítulo), q é a carga total em qualquer uma das placas (uma placa tem carga $+q$ e a outra tem $-q$) e A é a área de cada placa. Você também pode escrever a equação em termos de *densidade da carga*, σ , em cada placa, onde $\sigma = q / A$ (a carga por metro quadrado). É assim que fica a equação ao incluir a densidade da carga:

$$E = q / \epsilon_0 A = \sigma / \epsilon_0$$

Trabalhar com um capacitor de placa paralela torna a vida um pouco mais fácil, porque o campo elétrico tem um valor constante e uma direção constante (da placa positiva para a placa negativa), portanto, você não tem que se preocupar na sua posição entre as placas para encontrar o campo elétrico.

Potencial elétrico: Acionando a Voltagem

Os campos elétricos (veja a seção anterior) são apenas parte da história elétrica: você tem outros conceitos para levar em conta. Você está trabalhando com forças na eletricidade, portanto, tem que levar consideração a *energia potencial* ou a energia armazenada no objeto ou sistema. Misturar a força e a energia potencial é um ajuste natural; por exemplo, quando você levanta um peso em um campo

gravitacional, acaba com energia potencial, a energia armazenada no objeto por causa de sua nova posição:

$$E_p = mgh_i - mgh_o$$

onde m representa a massa, g representa a aceleração devido à gravidade, h_f representa a altura final e h_o representa a altura inicial. Como uma força atua nas cargas em um campo elétrico, você também pode levar em consideração a energia potencial nos campos elétricos. Tal energia potencial é a *energia potencial elétrica* e uma mudança na energia potencial elétrica cria uma nova quantidade chamada *voltagem* ou a força motriz da corrente elétrica.

Calculando a energia potencial elétrica

A energia potencial elétrica é a energia potencial armazenada nos campos elétricos. Introduzir o conceito de energia também introduz o conceito de trabalho (ver Capítulo 8). Suponha que você esteja movendo a carga positiva, na Figura 16-8, em direção à placa carregada positivamente à esquerda. Como estaria a força nessa carga? Você pode considerar o campo elétrico saindo das cargas positivas, em direção às cargas negativas, portanto, a carga na figura está de frente para uma folha inteira de cargas positivas. E como a própria carga é positiva, a força irá afastá-la das outras cargas positivas, portanto, a carga será direcionada para a direita. A folha de carga negativa, atrás da carga positiva, também estará puxando-a para a direita.

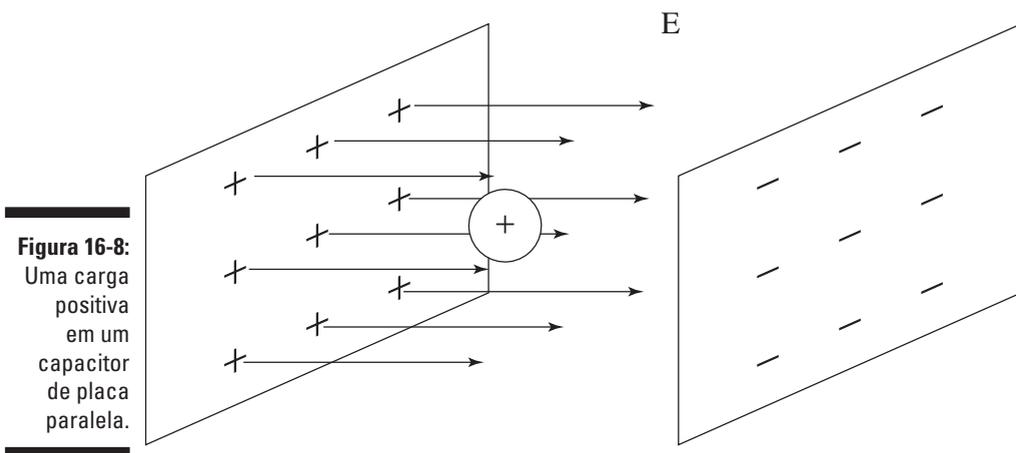


Figura 16-8:
Uma carga positiva em um capacitor de placa paralela.

Então, quanta energia potencial uma carga positiva adquire quando se move entre as placas – indo da direita para a esquerda e opondo-se à força que a puxaria para trás? O trabalho que você faz na carga deve ser igual ao seu ganho em energia potencial e esse trabalho é igual a

$$W = Fs$$

onde F representa a força e s representa a distância. A força na carga positiva é qE , onde q é a grandeza da carga e E é o campo elétrico no qual está a carga. Portanto, a equação torna-se

$$W = qEs$$

Esta equação fornece a grandeza da energia potencial que a carga adquire. Quando o campo elétrico é constante na direção e no comprimento, você pode dizer que

$$\text{Energia potencial} = qEs$$



Se você definir a energia potencial da carga como 0 na placa negativa (como pode definir a energia potencial gravitacional de uma bola para 0 quando ela está em repouso no solo), a variação, Δ , na energia potencial em direção à placa positiva será

$$\Delta E_p = qE\Delta s$$

Como ficou definido o campo elétrico como força por Coulomb (veja a seção “Influência em uma distância: campos elétricos” anteriormente neste capítulo), os físicos também gostam de definir uma nova quantidade para a energia potencial elétrica, que é a energia potencial por Coulomb. A nova quantidade gerada pela variação na energia potencial elétrica é a *voltagem*.

Percebendo o potencial na voltagem

Fisicamente falando, a *voltagem* é chamada de *potencial elétrico* (em oposição à energia potencial elétrica). Você também pode chamá-la apenas de *potencial*. É a quantidade gerada por uma mudança na energia potencial; você mede-a em volts, com o símbolo V (volts são iguais a Joules por Coulomb; ver Capítulo 2). O potencial elétrico, V , em um determinado ponto é a energia potencial elétrica de uma carga de teste dividida pela grandeza da carga de teste:

$$V = E_p / q$$

Em outras palavras, a voltagem é a energia potencial por Coulomb. O trabalho de mover uma carga, q , a partir de uma placa negativa em

uma distância, s , em direção a uma placa positiva em um capacitor de placa paralela (ver a seção “Carregando bem e regularmente: campos elétricos em capacitores de placa paralela”) é

$$W = qEs$$

Esse trabalho torna-se a energia potencial da carga, portanto, o potencial nesse local é

$$V = E_p / q = Es$$

Digamos, por exemplo, que você passa por um carro no acostamento de uma estrada, que está com a capota aberta. Você para e pergunta o que está errado: “A droga do carro não anda”, o motorista diz.

Isso não indica exatamente o problema, você pensa, quando pega o voltímetro e testa a bateria do carro – 12,0 volts, portanto, sem problemas. Dado que 12,0 volts é a variação na energia potencial por Coulomb, de um terminal da bateria para outro, quanto trabalho requer para mover um elétron entre esses terminais? Você sabe que

$$V = W / q$$

portanto,

$$W = qV$$

Você pega sua calculadora enquanto o motorista parado observa com interesse. Lembrando que a grandeza da carga de um elétron é $1,6 \times 10^{-19}$, C (veja a seção “Mais e menos: cargas de elétron e próton” anteriormente neste capítulo), você relaciona os números:

$$W = qV = (1,6 \times 10^{-19})(12,0) = 1,92 \times 10^{-18} \text{ J}$$

“São necessários”, você diz com orgulho, “ $1,92 \times 10^{-18}$ Joules para mover um elétron entre os terminais de sua bateria”.

O motorista perde a esperança e olha para você com estranheza.

Descobrimo que o potencial elétrico é conservado

Ao trabalhar com as energias cinética e potencial (verifique uma análise dos tópicos no Capítulo 8), você sempre pode contar com a conservação da energia total:

$$E_1 = E_{C1} + E_{C1} = E_{P2} + E_{C2} = E_2$$

Você pode ficar contente ao descobrir que a energia é conservada também na energia potencial elétrica. Digamos, por exemplo, que uma partícula infeliz de poeira, com massa $1,0 \times 10^{-5}$ kg, atinja a placa negativa no capacitor de placa paralela (veja a seção “Carregando bem e regularmente: campos elétricos em capacitores de placa paralela”) e obtém uma carga de $-1,0 \times 10^{-5}$ C. Negativamente carregada, a partícula de poeira descobre que não pode resistir à tração da placa positiva e começa a acumular nela.

A diferença da voltagem entre as duas placas é de 30 V – com qual velocidade a partícula de poeira migra quando atingir a placa positiva (negligenciando a resistência do ar)? Como a energia é conservada, a energia potencial que a carga tem na placa negativa será convertida em energia cinética ($E_c = \frac{1}{2}mv^2$) quando atingir a placa positiva. Você encontra a grandeza da energia potencial que a partícula de poeira tem, para iniciar com a equação

$$E_p = qV$$

Relacionar os dados fornecerá

$$E_p = qV (1,0 \times 10^{-5})(30) = 3,0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

Esta energia transforma-se em energia cinética, portanto, você obtém

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

Relacionar os números nesta equação fornecerá

$$E_c = \frac{1}{2}(1,0 \times 10^{-5})v^2 = 3,0 \times 10^{-4} \text{ J}$$

Determinando v , a partícula de poeira acaba com a seguinte velocidade:

$$v = 7,75 \text{ m/s}$$

O que significa que a partícula de poeira terá um impacto na placa positiva, com uma velocidade de cerca de 7,75 metros por segundo ou mais ou menos 17 mph.

Encontrando o potencial elétrico das cargas pontuais

O potencial elétrico ou a voltagem (V ; veja a seção anterior) entre as placas de um capacitor depende da distância que você está da placa negativa em direção à placa positiva, s (veja a seção “Carregando bem e regularmente: campos elétricos em capacitores de placa paralela” para saber mais sobre os capacitores):

$$V = Es$$

Agora, pense em uma carga pontual (uma carga minúscula) Q – o campo elétrico não é tão constante quanto está entre as placas de um capacitor. Como você pode descobrir o potencial em qualquer distância a partir da carga pontual? A força em uma carga de teste, q , é igual a

$$F = kQq / r^2$$

onde k representa uma constante cujo valor é $8,99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ e r representa a distância. Você também sabe, a partir da seção “Vindo de todas as direções: campos elétricos a partir de cargas pontuais”, que o campo elétrico em qualquer ponto em torno de uma carga pontual, Q , é igual a

$$E = kQ / r^2$$



Portanto, como você encontra o potencial elétrico para as cargas pontuais? Em uma distância infinita, o potencial é zero. Quando você aproxima uma carga de teste, para um ponto r distante da carga pontual, simplesmente tem que somar todo o trabalho feito e, então, dividir pelo tamanho da carga de teste. O resultado acaba sendo agradavelmente fácil; é assim que fica a equação:

$$V = \frac{W}{q} = kQ / r$$

Este é o potencial, medido em volts, em qualquer ponto com uma distância r a partir de uma carga pontual de carga Q , onde o potencial zero está em $r = \infty$. Isto fará sentido se você lembrar que o potencial é o trabalho necessário para ter uma carga de teste em um certo local, dividido pelo tamanho da carga de teste. Por exemplo, digamos que você tenha um próton, $Q = +1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, no centro de um átomo de hidrogênio e que a órbita típica de um elétron esteja a $5,29 \times 10^{-11}$ metros distante do próton. Qual é a voltagem do próton nessa distância? Você sabe que

$$V = kQ / r$$

Ligar os números fornecerá

$$V = \frac{kQ}{r} = \frac{(8,99 \times 10^9)(1,6 \times 10^{-19})}{5,29 \times 10^{-11}} = 27,2 \text{ volts}$$

O potencial elétrico, nessa distância, para o próton é de 27.2 volts completos. Nada mal para uma minúscula carga pontual.

Você também pode representar o potencial elétrico graficamente, exatamente como pode representar os campos elétricos com as linhas do campo. Você pode exibir o potencial usando *superfícies equipotenciais* – superfícies onde o potencial em cada superfície é igual. Por exemplo, como o potencial de uma carga pontual depende da distância (ou o raio de uma esfera), as superfícies equipotenciais devido a uma carga pontual são esferas em torno dessa carga pontual, como você pode ver na Figura 16-9.

E as superfícies equipotenciais entre as placas de um capacitor de placa paralela? Se você iniciar na placa carregada negativamente e mover-se em uma distância s em direção à placa carregada positivamente, saberá que

$$V = Es$$

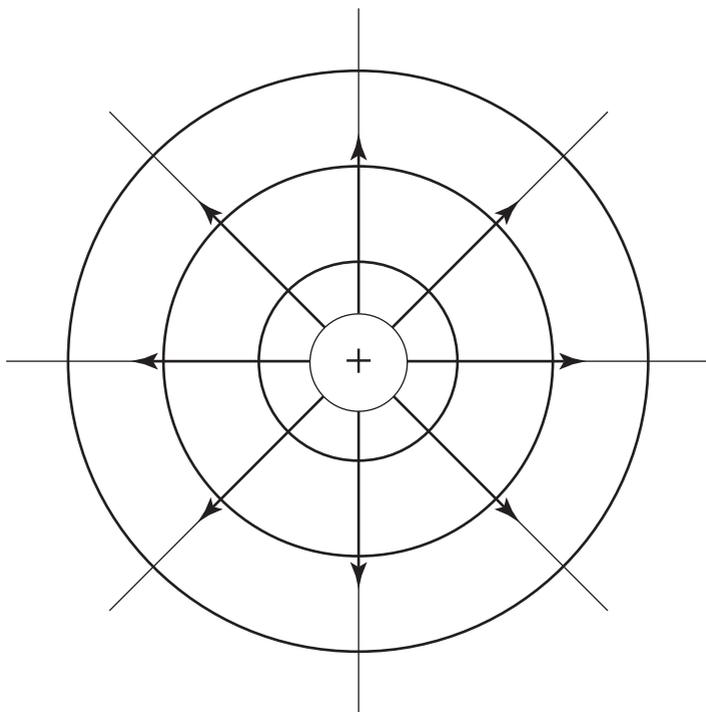


Figura 16-9: Superfícies equipotenciais como esferas em torno de uma carga pontual.

Em outras palavras, as superfícies equipotenciais dependem apenas da distância na qual você está entre as duas placas, como pode ser visto na Figura 16-10, onde duas superfícies equipotenciais estão entre as placas.

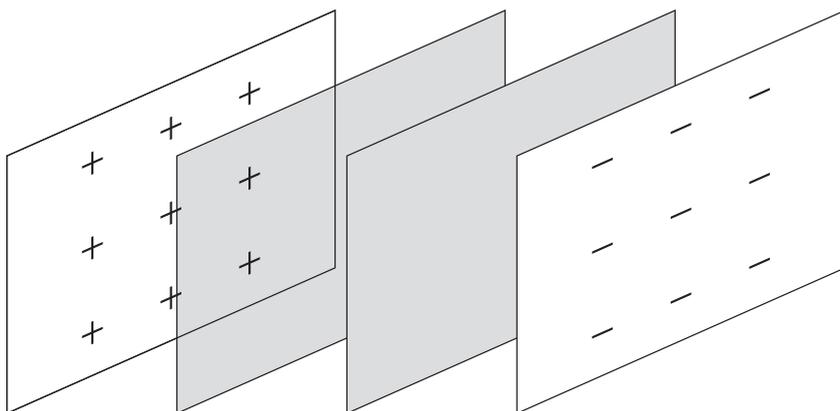


Figura 16-10: As superfícies equipotenciais entre as placas de um capacitor de placa paralela.

Ficando totalmente carregado com a capacitância

Um *capacitor* armazena carga mantendo as cargas separadas para que elas se atraíam, mas impede que migrem de uma placa para outra sozinhas.

Quanto de carga é armazenada? Isso depende da *capacitância*, C , do capacitor. A quantidade de carga que aparece nas duas placas do capacitor é igual (as cargas são opostas no sinal) e depende da voltagem entre essas placas, como dado pela seguinte equação, onde C é a capacitância:

$$q = CV$$

e q é uma carga elétrica. Para um capacitor de placa paralela, o campo elétrico, E , é igual ao seguinte (veja a seção “Influência em uma distância: campos elétricos”):

$$E = q / \epsilon_0 A$$

onde ϵ é uma constante e A representa a área das placas. E a voltagem entre as placas separadas por uma distância s é

$$V = Es$$

Portanto,

$$V = qs / \epsilon_0 A$$

Como $q = CV$, você pode determinar a equação anterior para q / v para obter

$$C = q / V = \epsilon_0 A / s$$



A equação $C = q / V = \epsilon_0 A / s$ permite encontrar a capacitância de um capacitor de placa paralela cujas placas têm, cada, uma área A e estão distantes em s . A unidade MKS para a capacitância é Coulombs por volt, também chamada de *Faraday*, F .

Bom, mas você não terminou ainda. A maioria dos capacitores não depende apenas do ar entre as placas – eles usam um dielétrico entre as placas. Um *dielétrico* é um material semi-isolante que aumenta quanta carga um capacitor pode manter por sua constante dielétrica, k . Portanto, quando o espaço entre as placas de um capacitor de placa paralela é preenchido com um dielétrico, de constante dielétrica k , a capacitância aumenta para

$$C = k\epsilon_0 A / s$$

Por exemplo, a constante dielétrica da mica (um mineral comumente usado nos capacitores) é de 5,4, portanto, aumenta a capacitância em 5,4 vezes que o mesmo capacitor com vácuo entre as placas, pois um vácuo tem uma constante dielétrica de apenas 1,0.



Como um capacitor é preenchido com cargas que você separou uma das outras, tem alguma energia associada. Quando você carrega um capacitor, reúne a carga final, q , em um potencial elétrico médio, $V_{\text{médio}}$ (você usa o potencial médio porque o potencial aumenta quando adiciona mais carga, portanto, com o tempo, cada parte da carga trazida para as placas interage com, em média, o potencial médio), portanto, a energia armazenada é

$$\text{Energia} = qV_{\text{médio}}$$

O que é $V_{\text{médio}}$? Como a voltagem é proporcional à quantidade de carga no capacitor ($q = CV$), $V_{\text{médio}}$ é metade da carga final:

$$V_{\text{médio}} = \frac{1}{2}V$$

Relacionar essa equação do $V_{\text{médio}}$ à equação anterior, para obter a energia e substituir $q = CV$, finalmente fornecerá

$$\text{Energia} = \frac{1}{2}CV^2$$

Agora, você pode encontrar a energia armazenada em um capacitor: $E = (\frac{1}{2}) CV^2$. Quando você relaciona os valores nessa equação, os resultados terminam em Joules, J.

Capítulo 17

Dando um Empurrão aos Elétrons com Circuitos

Neste Capítulo

- ▶ Seguindo o movimento dos elétrons na corrente
- ▶ Calculando a voltagem e a resistência com a lei de Ohm
- ▶ Sentindo o poder da voltagem
- ▶ Pegando o circuito dos circuitos paralelo e em série
- ▶ Introduzindo as regras de Kirchoff na eletricidade

A eletricidade estática ocorre quando você tem um excesso ou um déficit de elétrons, significando que existem objetos carregados negativa ou positivamente. No tipo normal de eletricidade – que flui através dos circuitos elétricos – você não tem um excesso de carga, o que significa que não há carga resultante. Ao contrário, a voltagem, como a voltagem que você pode obter com uma bateria ou tomada na parede, fornece um campo elétrico nos fios condutores e os elétrons fluem em resposta a esse campo elétrico. (Para saber mais sobre a voltagem, veja o Capítulo 16).

Este capítulo é sobre elétrons em movimento nos circuitos – o tipo de circuito com o qual você está familiarizado. O Capítulo 16 analisou a eletricidade estática e este capítulo é sobre eletricidade padrão. Aqui exploro as diferenças através de análise de correntes, lei de Ohm, força elétrica e, finalmente, circuitos.

Elétrons em Marcha: Corrente

Quando os elétrons estão fluindo, existe uma corrente. Mas como você faz para que os elétrons comecem a se mover para criar uma corrente elétrica? Você tem que fornecer uma força eletromotriz ou uma FEM. Uma FEM fornece uma diferença no potencial (ou voltagem), significando que os elétrons sentirão uma força.

Portanto, o que é exatamente uma FEM? Uma bateria. Ou uma tomada na parede. Uma *FEM* é qualquer coisa que pode fornecer

uma voltagem, pois uma voltagem é tudo o que é preciso para criar um campo elétrico em um fio e esse campo elétrico faz os elétrons moverem-se (você descobriu no Capítulo 16 que o Campo elétrico = $F [força] / q$, [carga elétrica]). Como no Capítulo 16, aqui pode haver muito sobre a corrente que já seja familiar para você.



Em Física, a corrente elétrica é dada pelo símbolo I e suas unidades são os *ampères*. O símbolo utilizado é A .

Definindo a corrente

Como você realmente define *corrente*? É a quantidade de carga que passa por uma parte do circuito em determinado tempo. Eis como fica essa explicação em forma de equação:

$$I = q / t$$

onde q é a carga elétrica e t é o tempo. Se você tiver 1 Coulomb de carga passando por segundo, terá 1 A de corrente.

Calculando a corrente nas baterias

Você poderá calcular a corrente que flui através de uma bateria se souber a quantidade de carga no circuito e no tempo, $I = q / t$. Veja a Figura 17-1; as duas linhas verticais no topo representam uma bateria (as linhas representam as placas de metal de vários tipos, que foram alternadas com placas químicas e empilhadas para criar as primeiras formas de baterias).

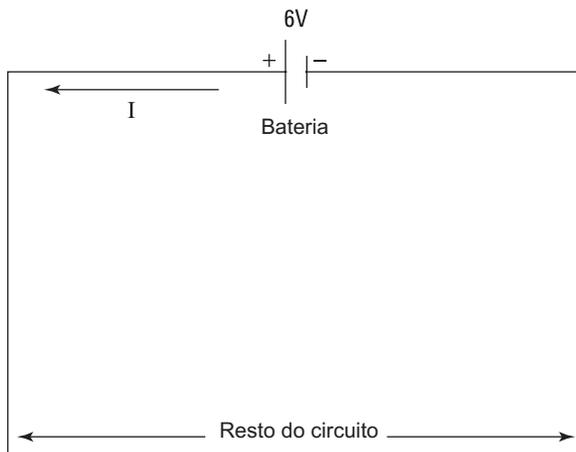


Figura 17-1:
Uma bateria funcionando.

A bateria fornece 6,0 volts de força eletromotriz (FEM), que conduz a corrente no circuito. Se você tiver 19,0 Coulombs de carga fluindo no circuito em 30 segundos, qual será a corrente?

$$I = q / t = 19,0 / 30 = 0,633 \text{ amps}$$



Neste caso, você tem 0,633 amps fluindo no circuito. Observe que a corrente, I , sai do lado positivo da bateria, que é a linha mais longa representada na bateria. Se você tiver apenas uma bateria fornecendo a força eletromotriz no circuito, a corrente sairá de seu lado positivo (o lado longo) e entrará em seu lado curto (o lado negativo).



Ajuda se você considerar uma bateria em um circuito como uma etapa da voltagem; em outras palavras, a corrente que chega no lado negativo da bateria é aumentada – 6,0 volts no caso da Figura 17-1 – e, então, começa a fluir através do circuito novamente.



Embora a corrente seja sempre representada passando, no circuito, dos sinais positivos para os negativos de uma bateria, a verdade mostra que os elétrons realmente fluem na direção oposta. Qual o motivo? Historicamente, os primeiros pesquisadores pensavam que as cargas positivas fluíam no circuito, mas o oposto acaba sendo verdade. Contudo, isso não é um problema, desde que você tenha consciência e saiba que a corrente sai do lado positivo da bateria (a menos que tenha outra bateria ou fonte de voltagem que domine a primeira bateria).

Dando Alguma Resistência: Lei de Ohm

A *resistência* relaciona a quantidade de voltagem à corrente que você realmente tem. Uma equação relaciona a voltagem, corrente e resistência:

$$V = IR$$

onde V é a voltagem, I é a corrente e R é a resistência. A resistência é medida em ohms e o símbolo para ohms é a letra grega ômega: Ω . Portanto, se você aplicar certa voltagem, V , em certa resistência, R , terá uma corrente, I . Isso é chamado de *Lei de Ohm*, segundo seu descobridor, Georg Simon Ohm (ele fez a descoberta no século XIX).

Determinando o fluxo da corrente

Usando a lei de Ohm, você pode determinar quanta corrente estará fluindo do terminal positivo para o negativo de uma bateria. Olhe o circuito visto na Figura 17-2, onde uma bateria de 6,0 V está fornecendo a corrente que flui através de um resistor, R , de 2,0 Ω .

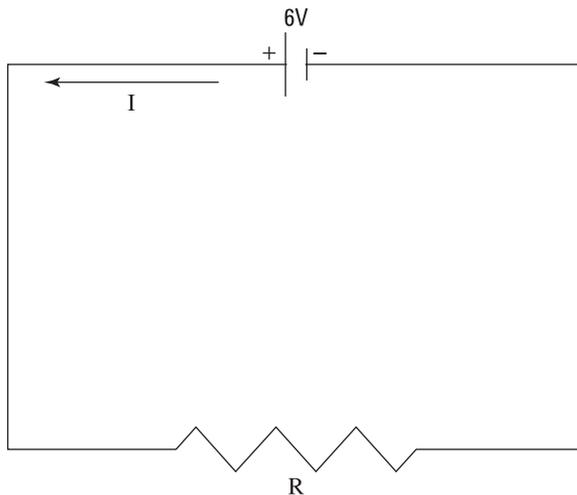


Figura 17-2: Uma bateria fornecendo a corrente que flui através de um resistor.

Usando a lei de Ohm, você sabe que

$$I = V / R$$

Ligar os números fornecerá

$$I = 6,0 / 2,0 = 3,0 \text{ A}$$

Você consegue uma corrente de 3,0 A, fluindo para a esquerda no circuito.

Examinando a resistividade

Em suas viagens elétricas, você pode encontrar uma grandeza chamada *resistividade*, ρ , cujas unidades são $\Omega\cdot\text{m}$. Se você tiver uma corrente fluindo através de um material, a resistividade desse material informará quanta resistência você terá. Os físicos calcularam as resistividades de muitos materiais comuns para você e mostrei algumas delas na Tabela 17-1.



Você pode encontrar a resistência multiplicando a resistividade pelo comprimento, L , do material (quanto mais longo for, mais resistência causará) e dividindo pela área transversal do material, A (quanto mais área a corrente tiver para fluir, menor será a resistência):

$$\text{Resistência} = \rho L / A$$

Tabela 17-1: As resistividades de materiais comuns

<i>Material</i>	<i>Resistividade</i>
Cobre	$1,72 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$
Borracha	$1,0 \times 10^{15} \Omega\text{-m}$
Alumínio	$2,82 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$
Ouro	$2,44 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$
Madeira	$3,0 \times 10^{10} \Omega\text{-m}$
Carbono	$3,5 \times 10^{-5} \Omega\text{-m}$

Aumentando a Força: Voltagem

Alguns itens domésticos, como, por exemplo, lâmpadas ou secadores de cabelo, usam energia elétrica. A energia é medida em *watts*. Como você calcula a energia elétrica? A quantidade de trabalho realizado para mover uma carga, q , em um circuito é qV , onde V é a força eletromotriz. Se você dividir esse trabalho pelo tempo, obterá a energia:

$$P = W / t = qV / t$$

Porém, a carga, q , dividida pelo tempo, t , é igual à corrente, I , portanto,

$$P = W / t = qV / t = IV$$



A energia fornecida para o circuito por uma fonte FEM, tal como uma bateria, é $P = IV$. Por exemplo, suponha que uma bateria forneça 0,5 A para uma lâmpada com 10 volts. Qual é a força da lâmpada? $P = IV$, assim, a força é $(0,5)(10) = 5$ watts. Contudo, como $I = V / R$, você pode ter variações. A força fornecida para um circuito por uma determinada voltagem é

$$P = IV = V^2 / R = I^2R$$

Fluindo de Um Para Outro: Circuitos em Série

Nas seções anteriores deste capítulo, você lidou com o fluxo da corrente em um único resistor; porém, você pode ter dois resistores em um circuito também, como mostrado na Figura 17-3.

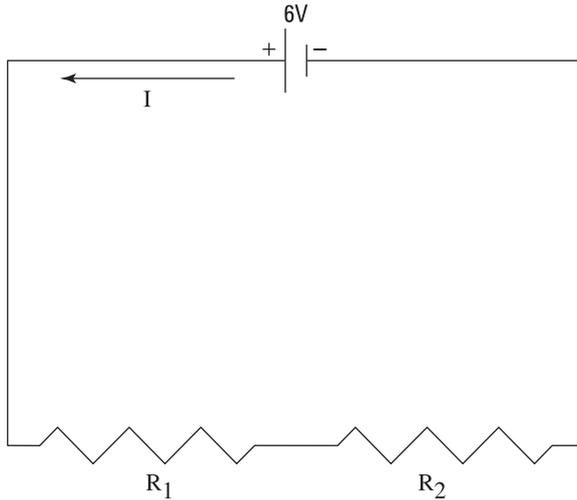


Figura 17-3:
A corrente fluindo através de dois resistores em série.

Dois resistores podem ser conectados em *série*, onde a corrente no circuito flui de um para o outro no circuito até a força eletromotriz (FEM; veja a primeira seção deste capítulo). Como você lida com um caso onde tem dois resistores em série, no qual a corrente tem que fluir por *ambos*, R_1 e R_2 , antes de voltar para a bateria? A resistência total, R_T , deve ser a soma das duas resistências:

$$R_T = R_1 + R_2$$

Para obter a resistência total dos dois resistores em série, R_1 e R_2 , você soma-os. Por exemplo, se $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ e a bateria tiver 6,0 V, qual será a corrente que flui no circuito? A resistência total deverá ser de 30 Ω , portanto,

$$I = V / R = 6,0 / 30 = 0,2 \text{ A}$$

Dividindo a Corrente: Circuitos Paralelos

Se diversos resistores trabalham no mesmo circuito, eles não precisam ser resistores em série (veja a seção anterior), onde a corrente vai de um para o outro. Dois resistores, R_1 e R_2 , podem estar conectados de modo que a corrente divide-se, como na Figura 17-4. Uma parte da corrente passa por um resistor e o resto passa para o outro.

Os resistores na Figura 17-4 são *paralelos*, significando que eles têm a mesma voltagem aplicada neles e não a mesma corrente.

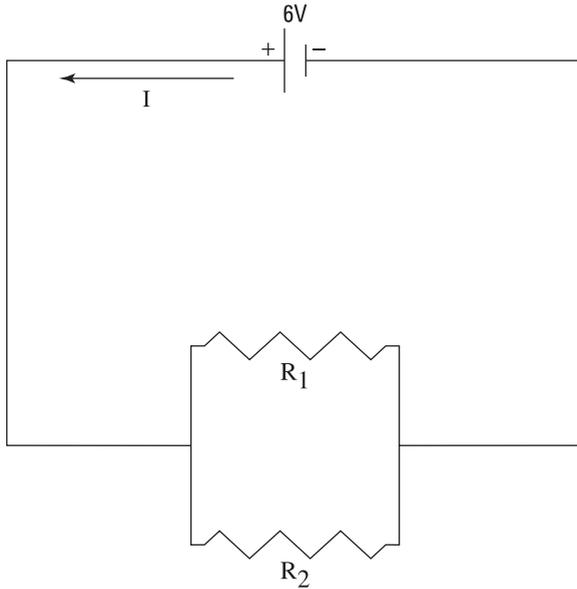


Figura 17-4: Os resistores em um circuito paralelo dividem a corrente.



A voltagem através de cada resistor paralelo é igual – os 6,0 V da bateria – que é a diferença entre os resistores em série e paralelos. Quando os resistores estão em série, a mesma corrente flui por eles. Quando são paralelos, têm a mesma voltagem.

Portanto, qual é a resistência total quando R_1 e R_2 são paralelos? A corrente total, I_T , é a corrente que flui por ambos os resistores, $I_1 + I_2$:

$$I_T = I_1 + I_2$$

E como $I = V / R$ (veja a seção “Dando alguma resistência: Lei de Ohm”), você poderá escrever

$$I_T = I_1 + I_2 = V_1 / R_1 + V_2 / R_2$$



O truque para os circuitos paralelos é que $V_1 = V_2$, portanto, se você chamar a voltagem V , poderá dizer que

$$I_T = I_1 + I_2 = V_1 / R_1 + V_2 / R_2 = V(1 / R_1 + 1 / R_2)$$

A equação tem a forma $I_T = V / R_T$, portanto, finalmente você encontra

$$1 / R_T = 1 / R_1 + 1 / R_2$$

Esta equação informa como calcular a resistência total dos dois resistores em um circuito paralelo. Se você continuar a derivação de

qualquer número de resistores, terá o seguinte modo de calcular a resistência total:

$$1 / R_T = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3 + 1 / R_4 \dots$$

Por exemplo, se $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 30\Omega$ na Figura 17-4 e a bateria tiver 6,0 V, qual será a corrente que está fluindo? A resistência total no circuito é

$$R_T = 1 / 10 + 1 / 30 = 4 / 30$$



Para encontrar a resistência total nos circuitos paralelos, você adiciona as resistências e obtém a recíproca do resultado. Portanto, a resistência total é de $30/4\Omega$, tornando a corrente $(6,0) / (30/4) = 0,8\text{ A}$.

Fazendo um Circuito Elétrico com as Regras de Kirchoff

Infelizmente, nem sempre você pode dividir os circuitos em componentes em série e paralelos, sendo por isso que as *regras de Kirchoff*, nomeadas segundo seu inventor, Gustav Kirchoff, são importantes. Suas regras permitem analisar circuitos com variável complexidade, aplicando dois princípios simples:

- ✓ **Regra da junção:** A corrente total que entra em qualquer ponto em um circuito deve ser igual à corrente total que sai desse ponto.
- ✓ **Regra do circuito fechado:** Em qualquer circuito fechado, a soma das elevações no potencial (a partir de uma bateria, por exemplo) deve ser igual a soma das quedas no potencial (a partir de um resistor, por exemplo).

A regra da junção é bem fácil de entender – a corrente que entra em qualquer ponto deve ser igual a corrente que sai desse ponto. Mas, e a regra do circuito fechado, que diz que as elevações no potencial, em qualquer circuito fechado, devem ser iguais as quedas no potencial?

A regra do circuito fechado significa que os elétrons tanto aumentam quanto diminuem e terminam onde iniciaram. As baterias, por exemplo, podem ter elevações no potencial – quando um elétron entra no lado negativo e sai do lado positivo, a voltagem da bateria aumenta. Por outro lado, quando um elétron entra em um resistor, ele requer algum esforço para passar por ele (sendo, por isso, que um resistor é chamado assim), portanto, há uma queda no potencial quando o elétron sai do outro lado.

Implementando a regra do circuito fechado

Você pode ver um exemplo que mostra a regra do circuito fechado na Figura 17-5. Você vê dois resistores e duas baterias. Qual é a corrente fluindo neste circuito fechado?

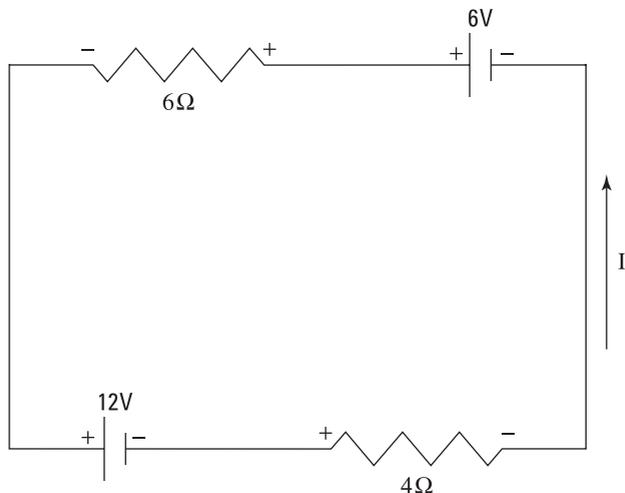


Figura 17-5:
Um circuito fechado com dois resistores e duas baterias carregando uma corrente.

A regra do circuito fechado de Kirchoff diz que

$$\sum V = 0 \text{ em volta de um circuito fechado}$$

onde $\sum V$ é a soma das voltagens em torno de um circuito fechado. Como você pode colocar essa regra em funcionamento?



Para iniciar a resolução do problema, escolha uma direção da corrente desenhando uma seta para I , como você vê na Figura 17-5. A corrente real pode acabar indo na outra direção, mas tudo bem, pois o valor da corrente obtida será negativo, mostrando que a corrente real flui na outra direção. Depois de você decidir sobre a direção da corrente – para a esquerda neste exemplo – ajudará desenhar sinais de + onde a corrente entra em um resistor e sinais de - onde ela sai (essas etapas não fazem parte das regras de Kirchoff; estou apenas fornecendo uma técnica que achei útil).

Você sabe que $\sum V = 0$ em torno do circuito fechado e que a queda no potencial em um resistor é de $V = IR$. Simplesmente siga o circuito fechado em uma direção (direita ou esquerda, não importa) e quando encontrar um sinal de + ou - (em um resistor ou uma bateria), elimine esse sinal, seguido da queda ou da elevação do potencial. Por exemplo, iniciando na bateria com 6 volts e indo para a direita, você obterá a seguinte equação da regra do circuito fechado de Kirchoff:

$$+6 - 4I - 12 - 6I = 0$$

Quando você combinar os termos, obterá

$$6 - 12 = -6$$

$$-4I + -6I = -10I$$

portanto,

$$-6 - 10I = 0$$

ou

$$I = -6 \text{ A} / 10$$

A corrente tem $-0,6 \text{ A}$.

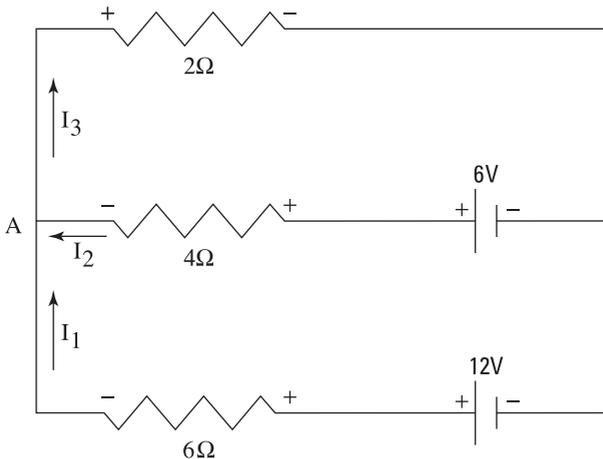


O fato de a corrente ser negativa indica que realmente ela entra na direção oposta da seta escolhida na Figura 17-4.

Usando circuitos com diversos, circuitos fechados

As regras de Kirchoff são um verdadeiro desperdício quando usadas, em circuitos, com apenas um circuito fechado. Olhe o novo desafio visto na Figura 17-6.

Figura 17-6:
Resistores em paralelo compartilham uma voltagem comum.



A figura mostra três desvios deste circuito e três correntes diferentes – I_1 , I_2 e I_3 . Você pode encontrar essas correntes? Com certeza, mas precisa das regras de Kirchoff. A regra da junção diz que $\sum I = 0$ em qualquer ponto, onde $\sum I$ é a soma das correntes entrando e saindo desse ponto, portanto, veja o ponto A à esquerda na Figura 17-6. I_2 flui para ele e I_3 flui saindo dele, portanto,

$$I_1 + I_2 = I_3$$

Agora, a regra do circuito fechado, que diz que $\sum V = 0$. O exemplo tem três circuitos fechados: os dois internos e o externo. Como existem I_1 , I_2 e I_3 – tudo que você precisa são três equações, levando-se em consideração que $\sum I = 0$. Portanto, você trabalha com dois circuitos fechados internos para obter essas equações. A partir do circuito fechado de cima, você obtém

$$+6 - 2I_3 - 4I_2 = 0$$

E a partir do circuito fechado de baixo, obtém

$$+12 - 6 + 4I_2 - 6I_1 = 0$$

Eis o que você tem; três equações em três incógnitas:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$+6 - 2I_3 - 4I_2 = 0$$

$$+12 - 6 + 4I_2 - 6I_1 = 0$$

Se você substituir a primeira equação para I_3 na segunda equação, terá

$$+6 - 2(I_1 + I_2) - 4I_2 = 0$$

$$+12 - 6 + 4I_2 - 6I_1 = 0$$

ou

$$+6 - 2I_1 - 6I_2 = 0$$

$$+12 - 6 + 4I_2 - 6I_1 = 0$$

Você pode determinar I_1 , em termos de I_2 , usando a primeira equação aqui:

$$I_1 = 3 - 3I_2$$

Você pode substituir este valor de I_1 , na segunda equação, para obter

$$+12 - 6 + 4I_2 - 6(3 - 3I_2) = 0$$

ou

$$-12 + 22I_2 = 0$$

Portanto,

$$I_2 = \frac{12}{22} = \frac{6}{11} \text{ A}$$

Agora, você tem uma das correntes: $I_2 = \frac{6}{11}$ A. Agora, pode ligar esta fração em

$$+6 - 2I_3 - 4I_2 = 0$$

Para obter

$$+6 - 2I_3 - 4\left(\frac{6}{11}\right) = 0$$

Ou dividindo por 2,

$$+3 - I_3 - \left(\frac{12}{11}\right) = 0$$

Para obter I_3 , você tem

$$I_3 = \frac{12}{11} \text{ A}$$

Agora, você tem I_2 e I_3 . Mas e I_1 ? Você sabe que

$$I_1 + I_2 = I_3$$

que significa que

$$I_1 = I_3 - I_2$$

O cálculo é fácil daqui em diante:

$$I_1 = \frac{12}{11} - \frac{6}{11} = \frac{6}{11}$$

Você tem todas as correntes agora, graças às regras de Kirchoff. $I_1 =$

$\frac{6}{11}$ A, $I_2 = \frac{6}{11}$ A e $I_3 = \frac{12}{11}$ A.

Descobrir as correntes para este tipo de problema requer muito trabalho e uma boa quantidade de cálculo, mas se você dominar isto, estará pronto para os circuitos fechados.

Dominando os Capacitores em Circuitos Paralelos e em Série

Os resistores não são os únicos objetos que você pode colocar em circuitos em série ou paralelos. Você pode fazer o mesmo com os outros companheiros elétricos conhecidos como *capacitores* (ver Capítulo 16). Um capacitor é um objeto que armazena carga, assim como um capacitor de placa paralela – mantendo as cargas separadas para que elas se atraiam, mas sem ocorrer migração de forma espontânea. Para adicionar capacitores em circuitos paralelos, você simplesmente adiciona a capacitância de cada capacitor para obter a capacitância total:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Capacitores nos circuitos paralelos

Em uma situação onde os capacitores são paralelos, a bateria fornece a voltagem e essa voltagem é igual em ambos os capacitores. Veja a situação na Figura 17-7, que mostra dois capacitores em um circuito paralelo.

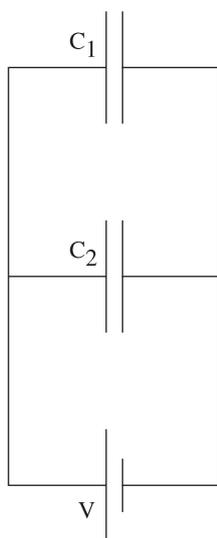


Figura 17-7:
Somando a carga de dois capacitores em um circuito paralelo.

Como você trabalha com uma situação como esta? Examine a carga total, Q , armazenada nesses dois capacitores, $C_1 + C_2$, que é a soma da carga armazenada em cada capacitor:

$$Q = C_1V + C_2V$$

Como a bateria fornece a mesma voltagem, V , em ambos os capacitores, a voltagem nos capacitores é igual, portanto, você pode reescrever a equação em termos de um único capacitor cuja capacitância é $C_1 + C_2$:

$$Q = (C_1 + C_2)V$$

Em outras palavras, se você pensar em termos de um capacitor, C_T , de capacitância $C_1 + C_2$, obterá a mesma coisa:

$$Q = (C_1 + C_2)V = C_T V$$

Capacitores nos circuitos em série

Quando os capacitores são paralelos, uma bateria fornece a voltagem e essa voltagem é igual nos dois capacitores. Em um circuito em série, a *carga* é a mesma para cada capacitor. Veja a Figura 17-8, que apresenta dois capacitores em um circuito em série. Como você trabalha com esta situação?

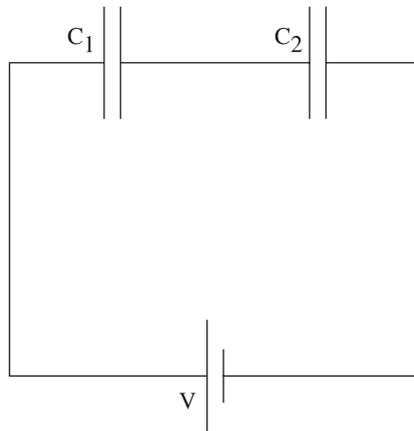


Figura 17-8:
Os capacitores em série têm a mesma carga.

Como você vê na Figura 17-8, a placa mais à direita de C_1 e a placa mais à esquerda de C_2 estão conectadas entre si, mas não ao resto do circuito. Em outras palavras, as duas placas estão isoladas do resto do circuito e elas iniciam neutras eletricamente (carga resultante total = 0).

Qualquer carga negativa, $-q$, que termina na placa mais à direita de C_1 deve ser igual, em grandeza, a qualquer carga positiva, q , que termina na placa mais à esquerda de C_2 , pois a carga total nessas duas placas tem que ser zero. E como a carga total nas duas placas com um único capacitor também deve ser zero, a placa mais à direita de C_1 deve ter uma carga q e a placa mais à direita de C_2 deve ter uma carga q .

Portanto, cada placa tem a mesma *grandeza* de carga (seja positiva, seja negativa), q .

Tudo bem, então, cada capacitor tem a mesma quantidade de carga. O que isso quer dizer para você? Agora, você sabe que a voltagem total nos dois capacitores é igual a

$$V = q / C_1 + q / C_2$$

Como a carga em cada capacitor é igual, a equação torna-se

$$V = q / C_1 + q / C_2 = q(1 / C_1 + 1 / C_2)$$

Escrever a equação em termos de uma única capacitância total, C_T , fornecerá

$$V = q / C_1 + q / C_2 = q(1 / C_1 + 1 / C_2) = q / C_T$$

Em outras palavras, para adicionar as capacitâncias em série, você adiciona-as como adiciona os resistores paralelos (veja a seção “Dividindo a corrente: circuitos paralelos”) – adicionando as recíprocas e obtendo a recíproca do resultado:

$$1 / C_T = 1 / C_1 + 1 / C_2$$

Se você tiver que lidar com mais capacitores, irá adicioná-los do mesmo modo:

$$1 / C_T = 1 / C_1 + 1 / C_2 + 1 / C_3 + \dots$$

Reunindo Resistores e Capacitores: Circuitos RC

Trabalhei com os resistores (um componente eletrônico que impede o fluxo da corrente em um circuito elétrico) e os capacitores (os objetos que armazenam carga mantendo as cargas separadas para que elas se atraiam, sem que ocorra migração espontânea de uma placa para outra) como situações distintas nas seções anteriores deste capítulo – agora, é hora de reuni-los. Veja o resistor e o capacitor na Figura 17-9. Uma equipe em eletrônica carregou o capacitor para que ele tenha uma voltagem, V_0 . Quando a equipe fecha o comutador, eles esperam que uma corrente constante flua.

Contudo, a corrente que a equipe realmente obtém parece com o gráfico visto na Figura 17-10. A corrente inicia em V_0 / R como deveria (onde R representa a resistência), mas começa a diminuir. O que está acontecendo?

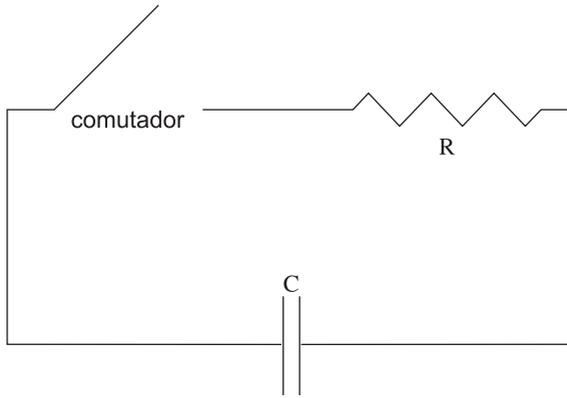


Figura 17-9:
Um resistor e um capacitor em série, com um comutador.

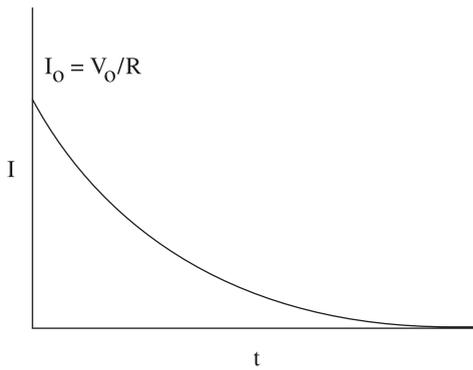


Figura 17-10:
Descarregando um capacitor.

A carga está escapando do capacitor com o tempo, portanto, a corrente diminui. Um capacitor não é uma bateria, apesar da equipe em eletrônica desejar isto. Ele pode fornecer corrente, mas apenas enquanto ainda tem alguma carga disponível. A corrente inicia em um valor V_0/R porque o capacitor tem voltagem V_0 e a corrente cria fluxos através de um resistor R . Mas, com o tempo, essa corrente diminui seguindo esta equação:

$$I = I_0 e^{-t/RC} = (V_0 e^{-t/RC}) / R$$

Aqui, I é a corrente, e é a base logarítmica natural, 2,71828 (provavelmente, você pode encontrar uma tecla para e^x em sua calculadora), t é o tempo, R é a resistência e C é a capacitância. A carga no capacitor também segue o mesmo tipo de curva:

$$q = q_0 e^{-t/RC}$$

Capítulo 18

Magnetismo: Mais do que uma Atração

Neste Capítulo

- ▶ Correndo através do campo magnético
- ▶ Acompanhando as cargas em movimento
- ▶ Identificando as forças devido aos campos magnéticos
- ▶ Examinando as partículas carregadas em um campo magnético
- ▶ Fluindo com a corrente nos campos magnéticos
- ▶ Usando solenoides para conseguir um campo magnético uniforme

Você pode observar uma forte conexão entre a eletricidade e o magnetismo na forma de cargas em movimento, que podem criar campos magnéticos (como nos eletroímãs e nos motores elétricos) e ímãs em movimento que criam corrente elétrica (como nos geradores elétricos). Até os elétrons, em suas órbitas velozes nos átomos de um objeto, geram campos magnéticos. Você tem muito mais coisas legais a descobrir, pois este capítulo é sobre magnetismo. Começo com os ímãs permanentes e passo a analisar as forças e as cargas devido aos campos magnéticos.

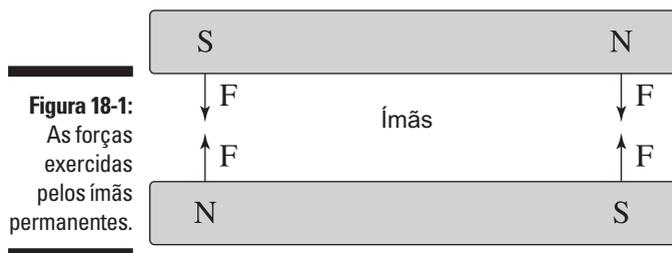


Os satélites que precisam ser orientados em tempo real para apontar para as estrelas, lua ou locais na Terra são geralmente guiados por bobinas magnéticas que puxam em direção ao campo magnético da Terra, ao invés de contarem com propulsão a gás. O magnetismo ainda é uma força no espaço!

Encontrando a Origem da Atração

Se você já segurou dois ímãs em suas mãos, sabe que pode haver forças entre eles, unindo-os ou separando-os. Essas forças são o resultado dos campos magnéticos criados no nível microscópico.

Geralmente, todos os átomos em um objeto não são orientados de nenhum modo em particular, portanto, todos os pequenos campos magnéticos que os átomos geram cancelam-se. Porém, com alguns materiais, como, por exemplo, o ferro, você pode orientar os átomos para que um número significativo de seus minúsculos campos magnéticos aponte na mesma direção, tornando o objeto magnético. Quando um objeto é magnético sem a aplicação de uma corrente externa, é chamado de *ímã permanente*. Você pode ver dois ímãs permanentes na Figura 18-1, exercendo uma força entre si.



O magnetismo é como a eletricidade, pois apresenta aspectos positivos e negativos também, na forma de *polos magnéticos*. Exatamente como os campos elétricos vão das cargas positivas para as negativas, os campos magnéticos vão de um polo para outro. Os polos no magnetismo são chamados de *polo norte* e *polo sul*.



Os nomes dos polos vêm do uso de ímãs permanentes nas bússolas, pois o polo norte orienta em uma direção para o norte, no campo magnético da Terra.

Os campos magnéticos vão do polo norte para o sul, como você pode ver na Figura 18-2, que mostra o campo magnético de um ímã permanente.

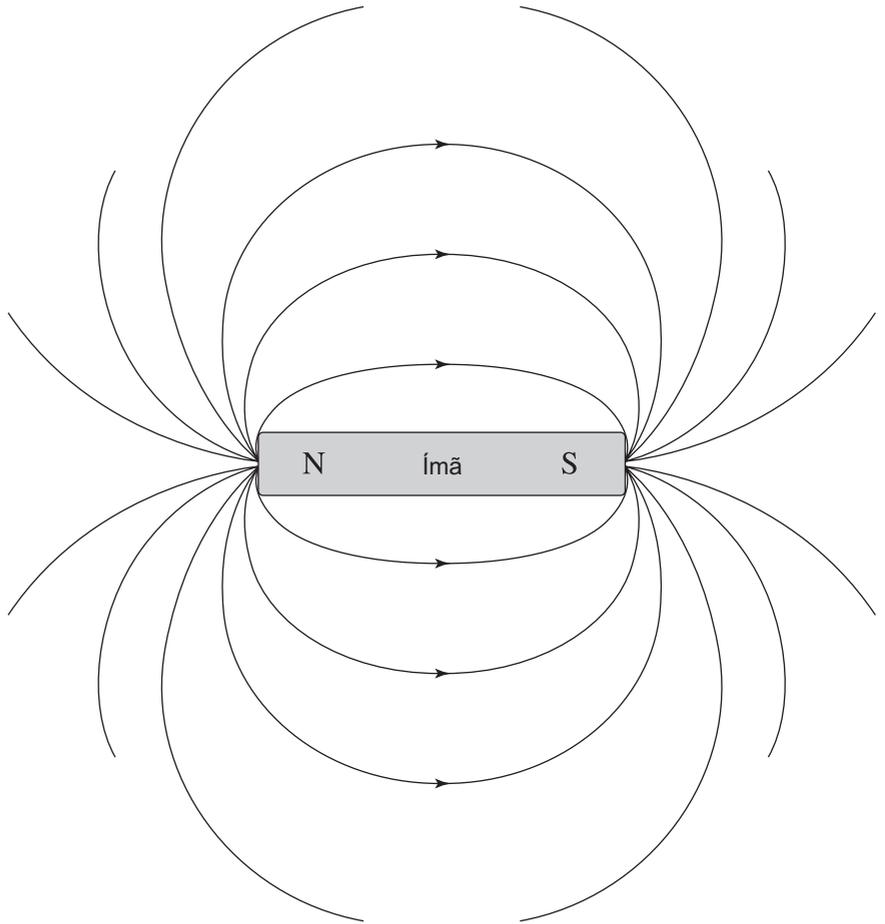


Figura 18-2:
O campo magnético indo do norte para o polo sul em um ímã permanente.

Forçando uma Carga em Movimento

Os ímãs têm um efeito sobre a corrente elétrica – eles exercem uma força nas cargas que se movem nas correntes. Porém, a carga tem que estar movendo-se. Um campo magnético não exerce uma força em uma carga sem movimento.

Você pode ver como isto funciona na Figura 18-3, onde uma carga em movimento iniciou, para sua surpresa, o movimento através de um campo magnético dado pelo vetor V na figura. (Por que B significa campo magnético? A única razão que posso imaginar é que todas as outras letras devem ter sido usadas.) (Veja o Capítulo 4 para saber mais sobre os vetores.) O campo magnético cria uma força na carga em movimento. Qual a trajetória da força? Você pode ver a resposta na Figura 18-3 e há uma nova regra da mão direita que permite determinar essa resposta.

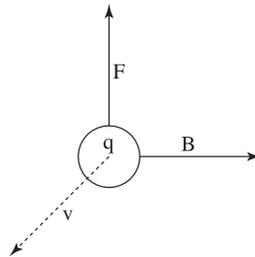


Figura 18-3:
A força em
uma carga
positiva em
movimento.



Uma nova regra da mão direita opera para as cargas em movimento e há duas versões – use a que achar mais fácil:

- **Versão 1:** Se você colocar os dedos de sua mão direita aberta no campo magnético – o vetor B na Figura 18-3 – e seu polegar direito apontar na direção da velocidade da carga, v , a força em uma carga positiva irá estender-se de sua palma. Para uma carga negativa, inverta a direção da força.
- **Versão 2:** Coloque seus dedos na direção da velocidade da carga, v , e, então, cubra esses dedos fechando sua mão no menor ângulo possível (menos de 180°), até que seus dedos fiquem na direção do campo magnético, B . Seu polegar direito apontará na direção da força.

Trabalhar com essas regras pode lembrá-lo de trabalhar com o torque (ver Capítulo 10). O vetor de força está fora do plano formado pelos vetores v e B . Qualquer regra da mão direita escolhida funcionará. Agora, você pode descobrir a direção da força atuando em uma carga em movimento. Mas que *tamanho* tem essa força? É hora de ser quantitativo.

Descobrindo o Tamanho Quantitativo das Forças Magnéticas

O conhecimento das forças do magnetismo é útil quando você está trabalhando com ímãs. Por exemplo, você pode determinar a força real, em Newtons, em uma partícula carregada em movimento, em um campo magnético. Essa força acaba sendo proporcional à grandeza da carga e ao campo magnético, o que faz sentido.

A força magnética também é proporcional ao componente da velocidade *perpendicular* ao campo magnético. Em outras palavras, se a carga estiver movendo-se em paralelo à direção do campo magnético, nenhuma força atuará nessa carga. Se a carga estiver movendo-se em ângulos retos ao campo magnético, a força máxima atuará na carga. Reunir essas informações sobre as cargas fornecerá a equação para encontrar a grandeza da força da carga em movimento, q , onde θ é o ângulo (entre 0° e 180°) entre os vetores v e B :

$$F = qvB \sin \theta$$

Na verdade, esta equação é um pouco atrasada. Acaba que, em Física, o campo magnético é realmente definido em termos de intensidade da força exercida em uma carga de teste positiva. Portanto, eis a definição formal do campo magnético, de um ponto de vista da Física:

$$B = F / (qv \sin \theta)$$

para uma força, F , em uma carga de teste positiva, q , movendo-se em uma velocidade, v , tal que θ é o ângulo (entre 0° e 180°) entre a velocidade e o campo.



As unidades do campo magnético, no sistema (MKS) (ver Capítulo 2), são a Tesla, T. No sistema (CGS) (também veja o Capítulo 2), as unidades são o gauss, G. Você pode relacionar as duas unidades de medida assim:

$$1,0 \text{ G} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ T}$$

Digamos, por exemplo, que você esteja levando seu elétron de estimacão para dar uma volta e um campo magnético de 12,0 Teslas aparece (uma força magnética enorme, dado que o campo magnético da Terra em sua superfície é cerca de 0,6 gauss ou $6,0 \times 10^{-5}$ T). Qual força atuará em seu elétron de estimacão se ele estiver movendo-se em uma velocidade de $1,0 \times 10^6$ metros por segundo em uma direção perpendicular ao campo? A grandeza da força é dada por

$$F = qvB \sin \theta$$

portanto, tudo que você tem que fazer é relacionar os números:

$$F = qvB \sin \theta = (1,6 \times 10^{-19})(1,0 \times 10^6)(12,0) \sin 90^\circ = 1,92 \times 10^{-12} \text{ N}$$

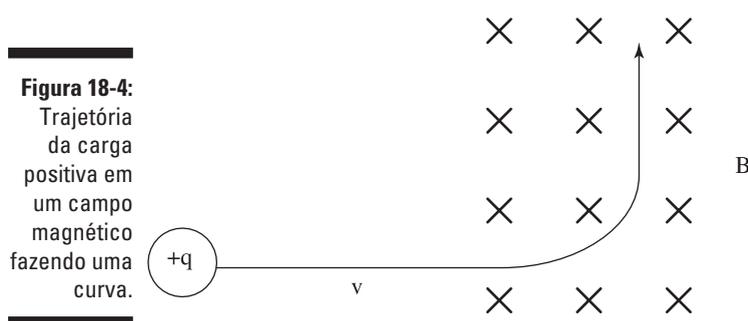
A força atuando em seu elétron de estimacão é de $1,92 \times 10^{-12}$ N, que não parece muito, mas lembre-se: os elétrons de estimacão são pesos-levos com $9,11 \times 10^{-31}$ kg. Então, qual é a aceleração do elétron? Usando a equação Força = massa vezes aceleração, você obtém

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1,92 \times 10^{-12}}{9,11 \times 10^{-31}} = 2,11 \times 10^{18} \text{ m/s}^2$$

É uma aceleração de cerca de 210.000.000.000.000.000 g, onde g é a aceleração devido à gravidade na superfície da Terra, que é muito, mesmo para um elétron. Por outro lado, se seu elétron de estimação decidisse viajar no campo magnético, nenhuma força atuaria nele.

Movendo-se em Órbitas: Partículas Carregadas nos Campos Magnéticos

Quando você tem uma carga positiva em um campo elétrico, como dentro de um capacitor com placa paralela (ver Capítulo 17), a carga será empurrada na direção oposta na qual estão indo as linhas do campo, pois as linhas do campo vêm das cargas na placa positiva, que irão repelir uma carga positiva. Porém, a história é diferente quando o campo em questão é um campo magnético, pois existem mais ângulos retos envolvidos. Veja a Figura 18-4, que mostra a trajetória de uma carga positiva movendo-se em um campo magnético.



Vê todos os Xs na figura? Os Xs são os caminhos que a Física mostra, que neste caso é o campo magnético *entrando* na página. A Física pretende que estejam na extremidade das setas vetoriais, fixados (imagine voltados para baixo na extremidade de uma seta, com a parte final em sua direção). A carga positiva viaja em uma linha reta até entrar no campo magnético, quando uma força aparece na carga. Como você pode verificar com a regra da mão direita, a força aponta para cima e fará a trajetória da partícula carregada se curvar, como você vê na figura.

Os campos magnéticos não trabalham...

Como você é um mestre em Física, provavelmente está fazendo perguntas sobre as partículas carregadas. Você sabe que uma força atua em uma partícula carregada em um campo magnético, mas quanto *trabalho* o campo magnético faz nesta carga? É uma boa pergunta. Quando uma carga move-se em um campo elétrico,

o campo faz trabalho nela, o que introduz o conceito de potencial ou o trabalho feito na carga, W , dividido pela grandeza da carga, q (trabalho por Coulomb):

$$V = W / q$$

Portanto, qual trabalho é feito por um campo magnético em uma carga? Você pode calcular o trabalho assim (apresentado no Capítulo 6):

$$W = Fs \cos \theta$$

onde s é a distância. Oh, oh. Você viu o problema? θ é o ângulo entre a força e o deslocamento sobre o qual essa força atua. Mas, como pode verificar com a regra da mão direita, θ é sempre igual a 90° para as cargas nos campos magnéticos e $\cos 90^\circ = 0$, significando que o trabalho feito por um campo magnético em uma carga que se move, é zero.



O trabalho é outro caso onde os campos elétricos atuam de modo diferente dos campos magnéticos. Um campo elétrico definitivamente faz o trabalho nas cargas. Como um campo magnético não faz nenhum trabalho em uma carga em movimento, não pode mudar a energia cinética dessa carga.

...mas afetam as partículas carregadas em movimento

Para fazer trabalho em uma partícula carregada em movimento, um campo magnético pode e muda a *direção* do movimento de uma carga em movimento. Na verdade, um campo magnético sempre mudará a direção de uma carga em movimento se essa direção estiver livre para mudar, pois a força na carga é sempre perpendicular ao movimento da carga.

Lembra de algum outro tipo de movimento onde sua direção é perpendicular à força sendo aplicada? Sim, o movimento circular, que apresentei no Capítulo 7. Você pode ver esse movimento da carga na Figura 18-4. Ela curva-se quando se move em um campo magnético. Por causa do modo como os campos magnéticos funcionam, tornando a força na carga perpendicular à direção do movimento, você pode obter movimentos circulares para conseguir cargas sob a ação de campos magnéticos.

Veja a Figura 18-5, onde uma carga positiva está indo para a esquerda em um campo magnético. O campo B está subindo e saindo da página. Vê todos os pontos com círculos? Exatamente como um X representa a seta de um vetor visto de trás, um ponto com um círculo representa uma seta vindo para você. Portanto, neste caso, o campo B está vindo para você, sobe e sai da página.

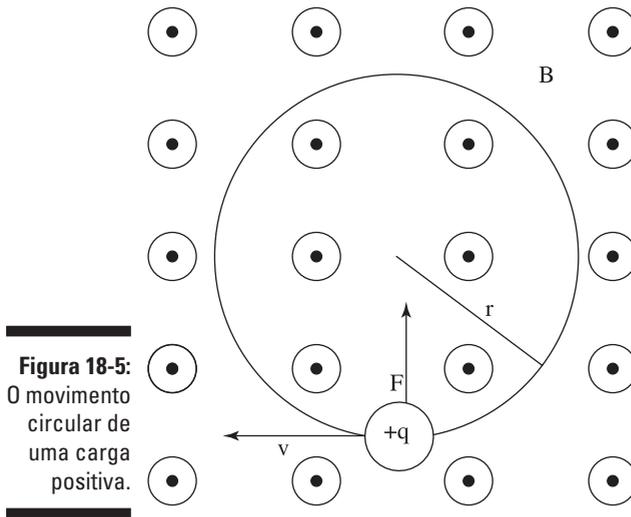


Figura 18-5: O movimento circular de uma carga positiva.

Então, o campo B está saindo da página e a carga positiva está movendo-se para a esquerda. Usando sua mão direita, você pode dizer que a força resultante está para cima (veja a seção “Forçando uma carga em movimento” para saber mais sobre as regras da mão direita). A carga reage à força para cima subindo. E como a força, devido ao campo magnético, é sempre perpendicular à direção da viagem, a força muda a direção também. Eis a grandeza da força:

$$F = qvB \sin \theta$$

Como v é perpendicular a B neste caso, $\theta = 90^\circ$, portanto, $\sin \theta = 1,0$, que significa que você obtém

$$F = qvB$$

Como a força é sempre perpendicular ao movimento, você obtém um movimento circular. Em outras palavras, a força fornece a força centrípeta necessária para o movimento circular (ver Capítulo 7):

$$F = mv^2 / r$$

onde m é a massa e r é o raio da órbita. Portanto, você obtém

$$qvB = mv^2 / r$$

Determinar o raio da órbita é bem fácil:

$$r = mv / qB$$



Agora, você pode determinar o raio do movimento circular para uma carga q de massa m sob a ação de um campo magnético de grandeza B na velocidade v . Quanto mais forte for o campo magnético, menor será o raio. E quanto mais rápida for a carga e mais massa tiver, maior será o raio.

Empurrando e Puxando Correntes

Todas as informações sobre as cargas, até este ponto do capítulo, são ótimas, mas com que frequência você lida com as cargas em movimento? Pode ter passado muito tempo desde a última vez que trabalhou com elétrons movendo-se em um vácuo, mas, na verdade, você trabalha com cargas em movimento todos os dias como correntes elétricas.

Forças nas correntes

Veja a equação para a força da carga em movimento:

$$F = qvB \sin \theta$$

onde q é a carga, v é a velocidade e B é o campo magnético. Como você é um mestre inteligente em Física, pode mexer na equação, dividindo pelo tempo, t , e multiplicando por ele para que não mude realmente a equação:

$$F = q / t (vt)B \sin \theta$$

Note que q / t é a carga passando em um determinado ponto em certa quantidade de tempo, uma característica que você conhece com outro nome – corrente elétrica. E vt é a apenas o comprimento que as cargas viajam nesse tempo, portanto, você reescreve a equação como

$$F = ILB \sin \theta$$

Essa é a força em um fio com comprimento L carregando uma corrente I em um campo magnético com comprimento B , onde L está no ângulo θ em relação a B . Por exemplo, veja a Figura 18-6, onde um fio carregando corrente I está em um campo magnético B .

Como você pensa em correntes como fluxos de cargas positivas em Física, é fácil encontrar a força no fio. Digamos que $I = 2,0$ A e $B = 10$ T. Quanta força por metro teria o fio? Como o fio está perpendicular ao campo magnético, você tem

$$F = ILB$$

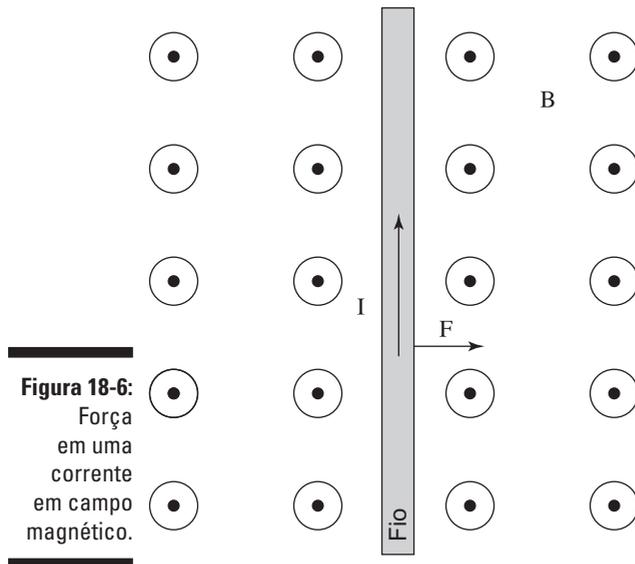


Figura 18-6:
Força
em uma
corrente
em campo
magnético.

Você sabe que a força por metro é

$$F/L = IB$$

portanto, relacionar os números fornecerá

$$F/L = IB = (2,0)(10) = 20,0 \text{ N/m}$$

Vinte Newtons por metro convertem-se em cerca de 4.5 libras de força por metro – extremamente forte.

Torques nas correntes

Os motores elétricos geralmente têm ímãs permanentes predefinidos e os campos que eles criam passam por bobinas elétricas que giram. As bobinas ligam um motor elétrico, funcionando porque a força na bobina elétrica gera um torque (ver Capítulo 11). Você pode ver essa rotação em ação na Figura 18-7.

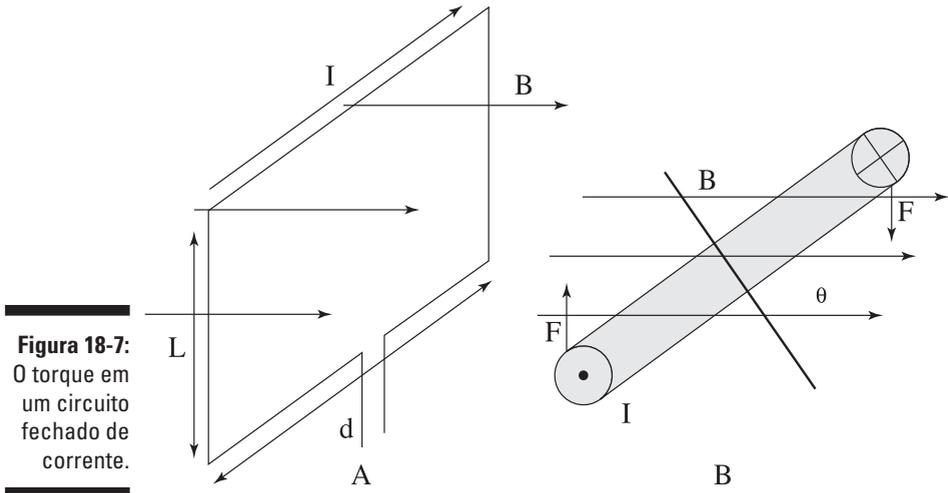


Figura 18-7: O torque em um circuito fechado de corrente.

Veja o diagrama A na Figura 18-7. Um circuito fechado de corrente está incorporado em um campo magnético e esse campo cria forças no circuito fechado, como você pode ver no diagrama B. Essas forças criam dois torques em volta do pivô central. Como você pode ver no diagrama B, o braço do momento (ver Capítulo 11) de cada torque é

$$\text{braço do momento} = \frac{1}{2} d \sin \theta$$

onde d é o diâmetro do circuito fechado. Cada torque é a força $-F =$ corrente elétrica, I , vezes a força no comprimento da bobina, L , vezes um campo magnético com intensidade B – multiplicada pelo braço do momento e como existem dois torques, correspondendo aos dois lados do circuito fechado, você obtém o torque total, τ :

$$\tau = ILB \left(\frac{1}{2} d \sin \theta + \frac{1}{2} d \sin \theta \right) = ILBd \sin \theta$$

Você consegue um resultado interessante, pois o produto dL é igual à área da bobina. Assim, para uma bobina com área transversal A e ângulo θ , como mostrado no diagrama B, o torque total é igual a

$$\tau = IAB \sin \theta$$

Porém, geralmente, as bobinas são feitas de diversos fios, não apenas um único circuito fechado carregando corrente. Por exemplo, se uma bobina for composta de N circuitos fechados de fio, você terá que multiplicar a corrente, em um único circuito fechado, por N para obter o torque total, que fornecerá

$$\tau = NIAB \sin \theta$$

Agora, você pode encontrar o torque total em uma bobina de N circuitos fechados, cada um carregando uma corrente I de área transversal A , em um campo magnético B , no ângulo θ . Puxa.

Um problema da Física pode pedir para você encontrar o torque máximo que uma bobina de N circuitos fechados terá em um campo magnético. Para encontrar o torque máximo possível, considere o caso onde $\theta = 90^\circ$, que cria $\sin \theta = 1,0$. Neste caso, você obtém o seguinte torque máximo

$$\tau = NIAB$$

Se você tiver uma bobina com 2.000 giros, uma corrente de 5,0 A, uma área transversal de $1,0 \text{ m}^2$ e um campo magnético de 10,0 T, por exemplo, qual será o torque máximo possível? Bem fácil:

$$\tau = NIAB = (2.000)(5,0)(1,0)(10,0) = 1,0 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Você consegue um torque máximo de $1,0 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$, que é muito grande – resultado de tantos circuitos fechados. Se você tivesse apenas um único circuito fechado de fio, o torque máximo teria apenas 50 N·m, que é a razão de existir tantas voltas de fio nas partes giratórias dos motores elétricos.

Identificando o Campo Magnético a Partir de um Fio

As cargas em movimento sentem os efeitos dos campos magnéticos (como, por exemplo, mudando a direção; veja a seção “Movendo-se em órbitas: Partículas carregadas nos campos magnéticos”), mas elas também *criam* campos magnéticos. As correntes são compostas de cargas em movimento, portanto, são úteis para criar campos magnéticos.

Estudo da transformação de um acidente em um campo magnético

Como aluno, fiz alguns estudos no Laboratório Nacional de Magnetismo no Massachusetts Institute of Technology, trabalhando com alguns cabos muito grossos carregando com correntes bastante alta — 1.000 A ou mais. Um dia, tropecei em um desses fios e deixei cair uma chave inglesa perto dele. Quando peguei a chave,

pude sentir o poderoso campo magnético gerado pelo cabo. Movendo a chave inglesa em distâncias diferentes do cabo, pude verificar que o campo magnético era, na verdade, circular. “Isso é ótimo!”, pensei comigo mesmo. O professor com o qual eu estava trabalhando, porém, disse-me para parar e voltar ao trabalho.

Você pode examinar a criação de campos magnéticos analisando o campo magnético gerado por um único fio, como mostrado na Figura 18-8. Quando você identifica o campo que vem de um único fio, está no caminho, pois pode dividir correntes complexas em fios simples e, então, adicionar campos magnéticos entre elas.

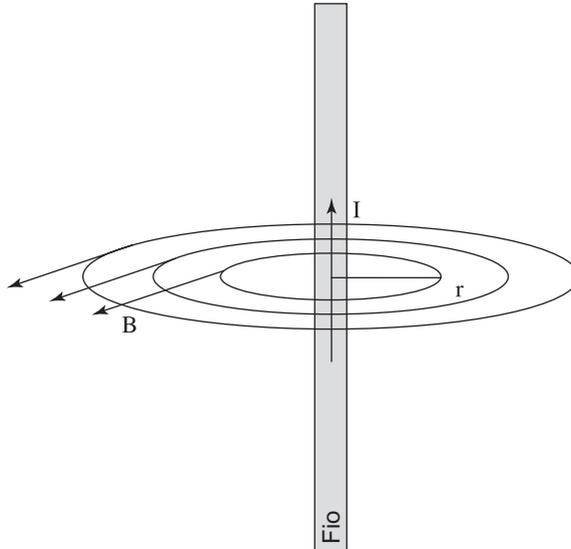


Figura 18-8:
Um único fio gera um campo magnético, como mostrado.

O campo magnético diminui quanto mais distante você está do fio. Ele diminui linearmente, na proporção inversa à distância r que você está do centro do fio, portanto, você tem

$$B \propto 1 / r$$

A corrente é proporcional à corrente I – duas vezes a corrente, duas vezes o campo magnético. Assim, agora, você tem

$$B \propto I / r$$

A constante da proporcionalidade, por questões históricas, é escrita como $\mu_0 / 2\pi$, significando que você finalmente obtém o seguinte resultado para o campo magnético:

$$B = \mu_0 I / (2\pi r)$$

Aqui, I é a corrente no fio e r é a distância radial do centro do fio. A constante μ_0 , parte da constante da proporcionalidade, é $4\pi r \times 10^{-7}$ T-m/A. Essa constante é chamada de *permeabilidade do espaço livre*.



Qual a trajetória do campo magnético? Você tem que usar outra regra da mão direita. Se você colocar o polegar de sua mão direita na direção da corrente, seus dedos ficarão na direção do campo magnético. Em qualquer ponto, a direção na qual seus dedos apontam é a direção do campo magnético, como mostrado na Figura 18-8.

Digamos, por exemplo, que você tenha uma corrente de 1.000 A e esteja a 2,0 cm do centro de um fio. Qual será o tamanho do campo magnético? Você sabe que

$$B = \mu_0 I / (2\pi r)$$

Portanto, relacionar os números fornecerá

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1000)}{2\pi(0,02)} = 0,01 \text{ T} = 100 \text{ gauss}$$

O campo teria cerca de 100 gauss.

Como outro exemplo, digamos que você tenha dois fios paralelos entre si, cada um carregando a mesma corrente, I , em uma distância r separada. Qual é a força no fio 1 a partir do fio 2? Você sabe que a força no fio 1, que está carregando a corrente I no campo magnético B , é

$$F = ILB$$

O que é B ? Bem, o campo magnético no fio 1 a partir do fio 2 é

$$B = \mu_0 I / (2\pi r)$$

portanto,

$$F = \mu_0 I^2 L / (2\pi r)$$



Você pode averiguar com a regra da mão direita que os fios, com corrente na mesma direção, terão uma força entre si e os fios, com corrente na direção oposta, terão uma força diretamente distante entre si.

Determinando o Centro nos Circuitos Fechados da Corrente

“Tudo bem”, diz a equipe de engenharia, “precisamos de sua ajuda. Veja que coisa estranha na Figura 18-9. Já viu algo assim antes?”

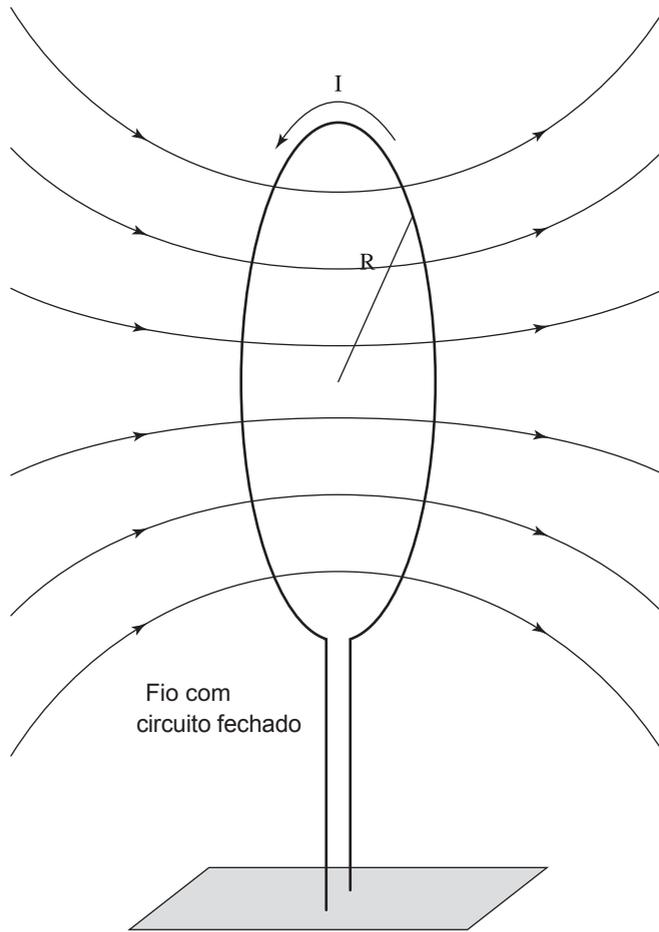


Figura 18-9:
O campo magnético de um fio com circuito fechado.

“Certamente”, você diz, “Isso é uma corrente de circuito fechado”.

“Sabemos isso”, diz a equipe de engenharia, “mas o que queremos fazer é descobrir o campo magnético no centro desse circuito fechado”.

“O centro?”, você pergunta.

“O centro”, eles dizem.

“E eu serei pago?”, você pergunta.

“Com certeza”, eles dizem.

“Tudo bem”, você diz para eles – é assim que fica o campo magnético bem no centro de uma corrente com circuito fechado; N é o número de voltas no circuito, I é a corrente no circuito e R é o raio do circuito:

$$B = N (\mu_0 I) / (2R)$$



Quando você coloca os dedos de sua mão direita na direção da corrente, seu polegar aponta na direção do campo B gerado.

Digamos, por exemplo, que você tenha 2,000 voltas de fio em um circuito fechado, a corrente tenha 10,0 A e o raio do circuito tenha 10,0 cm. Qual é a grandeza do campo magnético no centro do circuito fechado? Simplesmente ligue os números:

$$B = \frac{N\mu_0 I}{2R} = \frac{(2000)(4\pi \times 10^{-7})(10,0)}{2(0,10)} = 0,126 \text{ T}$$

O campo magnético seria de 0,126 T.

Conseguindo um Campo Magnético Uniforme com Solenoides

E se você quiser um campo magnético uniforme, exatamente como o dos capacitores de placas paralelas campo elétrico uniforme (ver Capítulo 17)? Você reuniria muitos circuitos fechados de corrente, como vê na Figura 18-10.

Quando você coloca diversos circuitos fechados próximos uns dos outros, como vê no diagrama A, obtém um campo magnético uniforme dentro do túnel de circuitos fechados (como visto no diagrama B).

Esta nova organização é chamada de *solenóide* e fornece um campo magnético uniforme. Um solenóide é apenas um conjunto de circuitos fechados próximos uns dos outros, que fornecem um campo magnético uniforme.

Qual é a força do campo magnético gerado? Se a força do solenóide for grande em comparação com seu raio, você obterá esta equação para o campo magnético:

$$B = \mu_0 nI$$

Use a regra da mão direita para os circuitos fechados da corrente (veja a seção anterior) para determinar a direção do campo magnético. Aqui, n é o número de circuitos fechados no solenóide por metro – ou o número de voltas do fio por metro – e I é a corrente em cada volta.

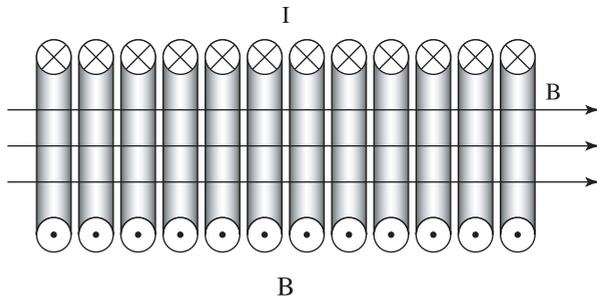
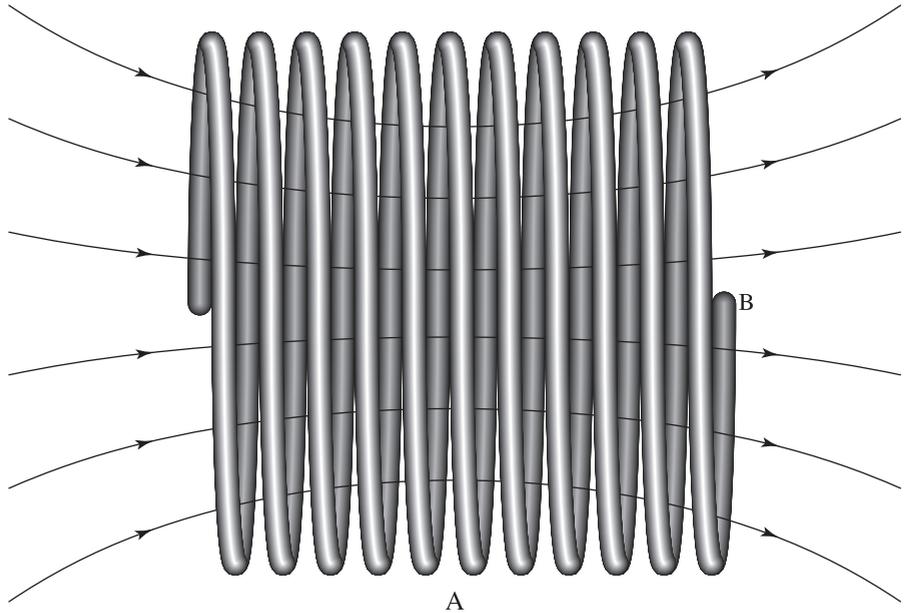


Figura 18-10:
O campo magnético em um solenoide.

Por exemplo, se você quisesse obter um campo magnético uniforme com 1,0 T e tivesse um solenoide de 1.000 voltas por centímetro, de qual corrente precisaria? Simplesmente relacione os números:

$$I = \frac{B}{\mu_0 n} = \frac{1,0}{(4\pi \times 10^{-7})(1,0 \times 10^5)} = 7,96 \text{ A}$$

Você precisa de cerca de 8 A para ter o campo magnético uniforme desejado.

Capítulo 19

Mantendo a Corrente com a Voltagem

Neste Capítulo

- ▶ Movendo os condutores para induzir a voltagem FEM
- ▶ Examinando o fluxo magnético em um campo magnético
- ▶ Sendo negativo com a Lei de Lenz
- ▶ Induzindo e capacitando com correntes alternadas
- ▶ Acompanhando os circuitos RCL

Neste capítulo, as correntes começam a ficar onduladas quando você começa a estudar a corrente alternada. A corrente alternada produz a impedância, um tipo de resistência baseada na frequência. Mas a impedância é apenas um dos assuntos interessantes que aparecem neste capítulo. Também analiso a indutância, capacitores e indutores, todos os assuntos que são centrais para a Física — tudo relacionado.

Induzindo a FEM (Frequência Eletromagnética)

A FEM, ou *frequência eletromagnética*, é a taxa com a qual a energia é puxada de uma fonte, que fornece o fluxo de eletricidade em um circuito. O fluxo da eletricidade é expresso em volts. Se o fluxo magnético (ver Capítulo 18) em um circuito mudar por alguma razão, então, um campo elétrico será gerado no circuito. Esse campo gerado é uma *FEM induzida*.



O fluxo magnético mede o número de linhas do campo magnético que passa perpendicularmente por uma superfície.

Você pode encontrar a FEM induzida de uma barra condutora movendo-se através de um campo magnético. Essa voltagem é induzida por seu movimento através do campo magnético. Se um circuito estiver presente de modo que as cargas possam fluir através dele, como na

Figura 19-1, as cargas realmente fluirão, produzindo uma corrente. Por exemplo, digamos que você tenha uma barra de metal com 1,0 metro de comprimento, movendo-se a 60 mph – cerca de 27,0 metros por segundo – através de um campo magnético de 1,0 T. Quanta voltagem apareceria nessa barra se fizesse ângulos retos com o campo magnético? Simplesmente relacione os valores:

$$V = vBL = (27,0)(1,0)(1,0) = 27,0 \text{ V}$$

Em ângulos retos, 27.0 volts apareceriam na barra. Confuso? Os exemplos nas duas seções seguintes deverão ajudar a clarear as coisas.

Movendo um condutor em um campo magnético para causar a voltagem

Olhe a situação vista na Figura 19-1. Uma barra de metal condutora está movendo-se para a direita nos trilhos de metal e a barra inteira está imersa em um campo magnético, entrando no papel. Qual tipo de Física temos aqui?

As cargas na barra de metal estão movendo-se em um campo elétrico com uma velocidade v , portanto, têm uma força desta grandeza:

$$F = qvB$$

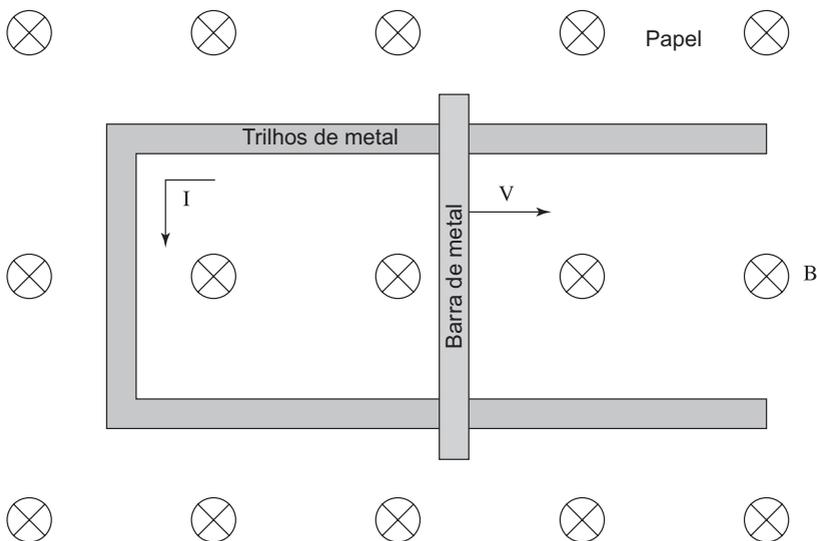


Figura 19-1:
Induzindo a FEM.

onde q é a carga elétrica e B é o campo magnético. A força é suficiente para fazer as cargas moverem-se, significando que uma *voltagem* é gerada ou uma FEM (força eletromagnética). Em outras palavras, um campo elétrico estará atuando na barra. A força gerada em cada carga na barra, devido ao campo magnético, será

$$F = Eq$$

onde E é o campo elétrico. Se a barra tiver L metros de comprimento, o campo elétrico será igual a V / L , onde V é a diferença de voltagem entre as duas extremidades da barra. Portanto, você também pode escrever a equação como

$$F = Eq = Vq / L$$

A força encontrada nesta equação é a força nas cargas devido ao seu movimento em um campo magnético, portanto, as duas equações calculadas para a força são iguais:

$$qvB = Vq / L$$

Assim, se você determinar a voltagem gerada de cima para baixo na barra, obterá

$$V = vBL$$

Induzindo a voltagem em certa área

A mudança na área é outro fator a considerar ao ver a FEM induzida. Se uma barra de metal percorrer uma distância x em um tempo t através de um campo magnético, por exemplo, você poderá dizer que $v = x / t$, dando esta equação:

$$V = vBL = (x / t)BL$$

Agora, considere o produto de xL – a distância que a barra percorre em certo tempo multiplicada pelo comprimento da barra. Se você observar a Figura 19-2, verá que xL é igual a *área* que a barra percorre quando está movendo-se (a área aparece sombreada).

Portanto, se a área for A e a distância que a barra percorre no tempo t for x , a mudança na área fechada, ΔA , no tempo t será x / t , portanto, você pode escrever a equação para a FEM assim:

$$V = B(\Delta A / \Delta t)$$

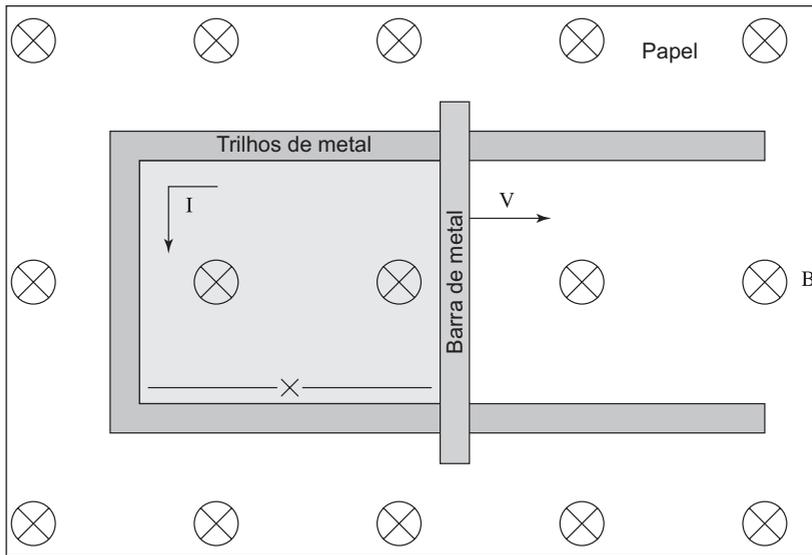


Figura 19-2: Percorrendo uma área com uma barra em um campo magnético.

Decompondo o fluxo com a Lei de Faraday

A quantidade BA na equação para encontrar a FEM – $V = B(\Delta A / \Delta t)$ – é chamada de *fluxo magnético*. O fluxo é uma medida de quanto um campo magnético percorre certa área – dobre o campo magnético, por exemplo, e você dobrará o fluxo. O fluxo magnético, que tem unidades de $T \cdot m^2$ no sistema MKS, recebe o símbolo Φ . Portanto, a equação para a FEM:

$$V = B(\Delta A / \Delta t)$$

torna-se

$$V = \Delta \Phi / \Delta t$$

A equação informa que a FEM gerada é igual a variação no fluxo por segundo. Mas essa não é a equação final. Geralmente, você a vê escrita com um sinal negativo (veja a próxima seção para obter mais informações sobre esse sinal negativo, que aparece devido à Lei de Lenz):

$$V = -(\Delta \Phi / \Delta t)$$



O sinal negativo informa que a FEM gerada cria uma corrente que será oposta à mudança no fluxo magnético. Essa equação é chamada de *Lei de Faraday*. Em geral, você vê a lei em termos de fluxo magnético, passando por uma bobina de N circuitos fechados, como vê na Figura 19-3, onde o campo magnético, B , está aumentando através da bobina.

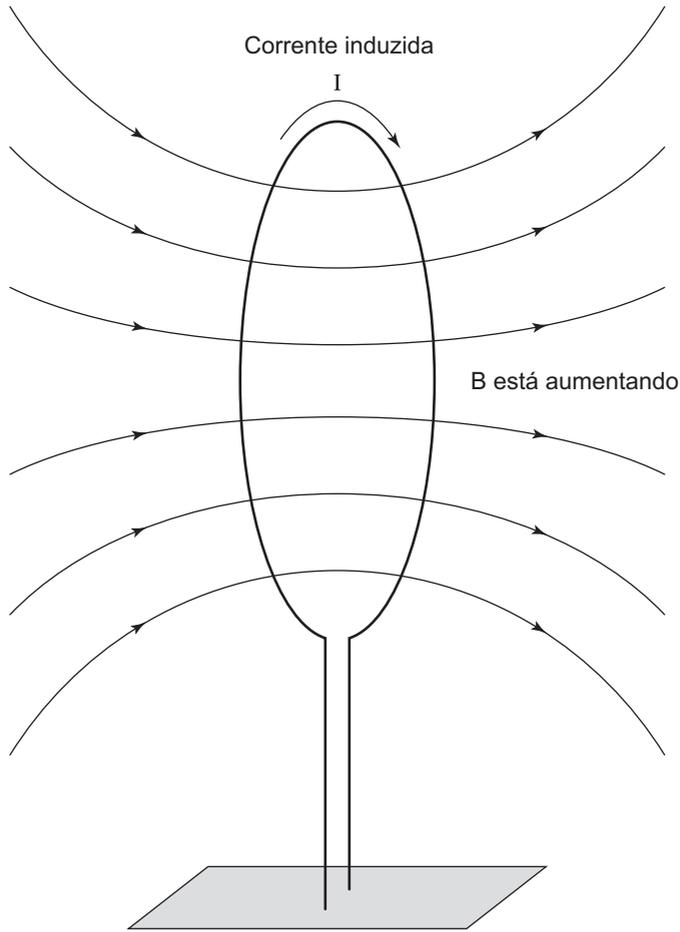


Figura 19-3:
Uma bobina
em um
campo
magnético
que muda.

Se você tiver uma bobina de N circuitos fechados e uma quantidade de fluxo que muda através dessa bobina, a Lei de Faraday dirá que a FEM induzida, medida em volts, nessa bobina será

$$V = -N(\Delta\Phi / \Delta t)$$

Como o fluxo magnético muda em uma bobina, se ela não muda de tamanho? A força do campo magnético pode mudar – como na Figura 19-3, onde B está aumentando – ou a área que a bobina apresenta para o campo magnético pode mudar – como você vê na Figura 19-4, que mostra a bobina de cima.

Como o ângulo θ muda, a quantidade de fluxo através da bobina torna-se

$$\Phi = \Phi_{\text{máx}} \cos \theta$$

Outros exemplos, com esta equação, ocorrem neste capítulo.

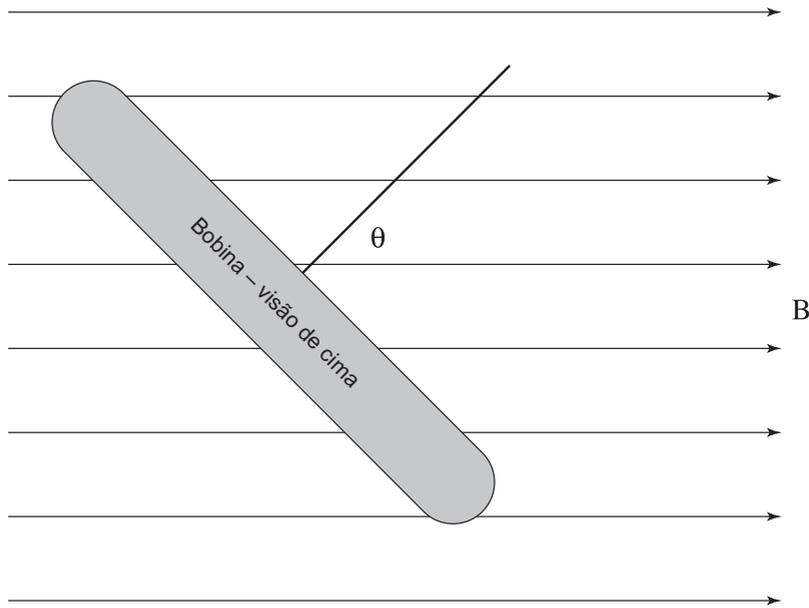


Figura 19-4:
Uma bobina,
vista de
cima, em
um campo
magnético.



Uma bobina tem dois modos de gerar a FEM: se o campo magnético mudar ou se o ângulo da bobina, em relação ao campo magnético mudar.

Obtendo os Sinais Certos com a Lei de Lenz

Quando um campo magnético começa a passar por uma bobina de fio, uma FEM aparece em torno da bobina e requer alguma energia para estabelecer esse campo magnético. E quando esse campo magnético é estabelecido com força total, o sistema inteiro resiste a qualquer mudança.

Trabalhando em seu laboratório um dia, digamos, que você tenha um campo magnético enorme passando por uma bobina de fio e você esteja tirando medidas quando as luzes acabam. Porém, você nota que o campo magnético através da bobina não desaparece imediatamente – ele diminui lentamente. Por que isso acontece? Porque a FEM induzida mantém o fluxo da corrente de tal modo que ela mantém o *status quo* funcionando – ou seja, mantém o campo magnético inalterado.

Quando as luzes acabaram, você parou de fornecer o campo magnético que passa pela bobina. Contudo, a FEM existe de tal modo que tende a manter o campo magnético inalterado, embora termine com o passar do tempo. Essa é a essência da *Lei de Lenz*: uma FEM induzida atua de tal modo que a corrente resultante cria

um campo magnético induzido, que se opõe à mudança no fluxo. Por exemplo, veja a Figura 19-3. O campo magnético aplicado na bobina está aumentando com o tempo. A FEM induzida atuará de tal modo a manter a situação como está, portanto, criará um *campo magnético induzido* que se opõe ao campo magnético crescente, como você pode ver na Figura 19-5.

Note a direção da corrente induzida na bobina. Se você colocar os dedos de sua mão direita em torno da bobina na direção da corrente, seu polegar direito apontará na direção do campo magnético induzido (veja o Capítulo 18 para saber mais sobre a regra da mão direita). E esse campo magnético induzido vai se opor ao campo magnético crescente.

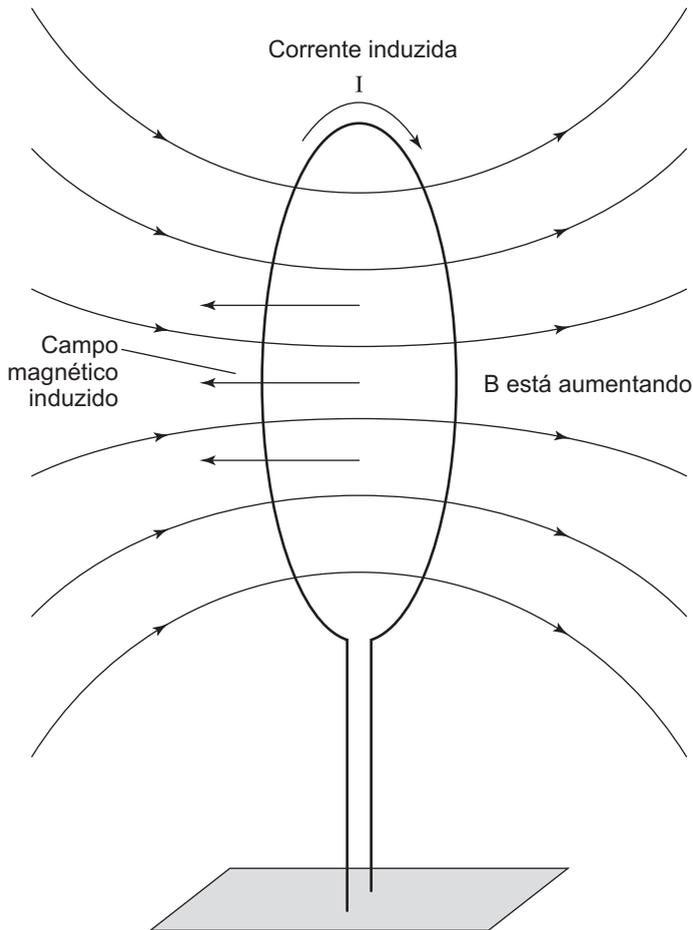


Figura 19-5:
Um campo magnético induzido que se opõe a um campo magnético crescente.



Se você mantiver a Lei de Lenz em mente, sempre poderá descobrir em qual direção a corrente induzida vai – ela atua de modo a manter o *status quo*. Se o fluxo magnético estiver aumentando, a corrente induzida criará um campo magnético induzido que tenta impedir o aumento do fluxo. Se o fluxo magnético estiver diminuindo, a corrente induzida fluirá de tal modo a aumentar o fluxo.

Teste seu conhecimento, recém-adquirido, com a Figura 19-5. Você pode prever corretamente a direção na qual a corrente fluirá, dado que o fluxo através da bobina, a partir de fontes externas, está aumentando com o tempo? Lembre-se de que a corrente induzida acabará gradualmente, portanto, não será capaz de se opor permanentemente à mudança no fluxo. Você pode ver na figura como a corrente flui.

Descobrindo a Indutância

Que capacidade uma bobina tem que ter para se opor à mudança no fluxo magnético? Essa é uma medida da *indutância* da bobina. A indutância é completamente diferente do conceito da corrente induzida, analisada anteriormente neste capítulo. De acordo com a Física, a análise das bobinas e da indutância requer números. Mas como você consegue números com uma bobina que cria uma corrente induzida? Tudo que você tem que fazer é reescrever a Lei de Faraday (veja a seção “Decompondo o fluxo com a Lei de Faraday”) onde a força eletromagnética induzida é proporcional à mudança na corrente que flui através da bobina. A Lei de Faraday diz

$$V = -N(\Delta\Phi / \Delta t)$$

Você poderá mudar essa equação se introduzir o conceito de indutância, que tem um símbolo L e é medida em Henries (símbolo H) no sistema MKS.



O fluxo total induzido através de N circuitos fechados da bobina, $N\Delta\Phi$, é proporcional à corrente que flui através da bobina. A constante de proporcionalidade é L . Em outras palavras,

$$N\Delta\Phi = LI$$

Portanto, a Lei de Faraday torna-se

$$V = -L(\Delta I / \Delta t)$$

L tornou-se a *autoindutância*, pois é uma medida da força com a qual uma bobina reagirá às mudanças no fluxo. Se você tiver uma corrente fluindo através de uma bobina e mudar essa corrente, o fluxo na bobina mudará – quanto maior for L , mais bem equipada estará a bobina para resistir à mudança na corrente gerando sua própria corrente. Isso significa que uma bobina resiste às mudanças repentinas na corrente, porque sua autoindutância age para resistir a qualquer mudança no fluxo. Por isso, as bobinas são chamadas de *indutores* nos circuitos elétricos.

Como você descobriu, no Capítulo 16, o elemento do circuito que funciona com os campos elétricos é o capacitor. Agora, você sabe que o elemento do circuito para os campos magnéticos é o indutor. Cada indutor tem uma qualidade especial que o torna útil nos circuitos. A carga em um capacitor não pode mudar instantaneamente, significando que a voltagem não pode mudar instantaneamente. E a corrente através de um indutor não pode mudar instantaneamente também, o que significa que você tem que examinar as correntes alternadas.

Examinando Circuitos de Corrente Alternada

O único comportamento dos capacitores e resistores, nos circuitos, realmente entra em cena quando as correntes e as voltagens estão mudando com o tempo – em outras palavras, quando você tem uma corrente alternada ou A/C. Na A/C, a direção da corrente e da voltagem inverte-se periodicamente. Você pode ver um exemplo na Figura 19-6, que mostra um circuito A/C.

O círculo na parte inferior, com uma pequena curva, é o símbolo para uma fonte de voltagem A/C; você pode ver a voltagem alternada criada no topo da Figura 19-6.

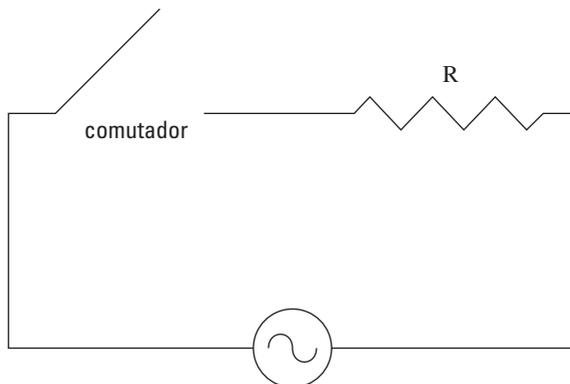
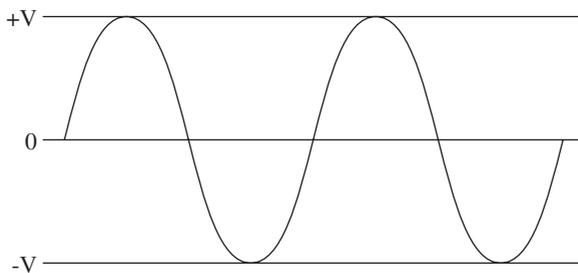


Figura 19-6: Um circuito A/C, onde a direção da corrente e a voltagem invertem-se.

Desenhando a voltagem alternada

Como é a voltagem alternada? Os circuitos fornecem muitas maneiras diferentes para a voltagem alternada, porém a mais comum parece uma onda senoidal, encontrada na Figura 19-6, que mostra a voltagem obtida em uma tomada padrão de parede.

Pegando emprestado alguns conceitos do movimento circular (ver Capítulo 7), eis como você expressa a voltagem matematicamente:

$$V = V_0 \text{sen}2\pi ft$$

onde V_0 é a voltagem máxima, f é a frequência com a qual a voltagem faz ciclos (nos EUA a corrente utilizada é 60 Hz) e t é o tempo. Qual é a corrente que flui como resultado dessa voltagem, quando o comutador é fechado? O único elemento do circuito (além do comutador, que não conta) é o resistor (ver Capítulo 17) e o resistor não reage à voltagem, que muda como os capacitores e os resistores (tentando manter a voltagem ou a corrente constante). Para um resistor, $V = IR$ (onde I é a corrente e R é a resistência), não importa como a voltagem está mudando, portanto, a corrente no circuito é

$$I = (V_0 / R) \text{sen}2\pi ft$$

E a força dissipada em um circuito (a força dissipada pelo resistor como calor)? O Capítulo 17 informa que a Força (P) = IV , mas como a corrente e a voltagem mudam com o tempo, você não pode dizer que $P = I_0 V_0$. Em média, na verdade, você obtém

$$P = \frac{1}{2} I_0 V_0$$

Geralmente, você vê a equação escrita assim:

$$P = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \frac{V_0}{\sqrt{2}} = I_{\text{rqm}} V_{\text{rqm}}$$

As grandezas I_{rqm} e V_{rqm} são chamadas de *corrente com raiz quadrada média* e *voltagem com raiz quadrada média* – a corrente máxima dividida pela raiz quadrada das duas e a voltagem máxima dividida pela raiz quadrada das duas.

Revelando a corrente e a voltagem com raiz quadrada média

Usando os valores da raiz quadrada média para a corrente e a voltagem, você poderá fornecer a força dissipada no resistor de um circuito, usando qualquer uma das seguintes expressões (forma para encontrar a força dissipada para as correntes e as voltagens constantes):

$$P = I_{\text{rqm}} V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}}^2 R = (V_{\text{rqm}}^2) / R$$

Um resistor trabalha com a corrente alternada e com a equação $V = IR$, significando que sempre é verdade quando V é a voltagem no resistor e I é a corrente através dele. Portanto, se a voltagem no resistor for

$$V = V_0 \text{sen}2\pi ft$$

isso significa que é a corrente através desse resistor:

$$I = (V_0 / R) \text{sen}2\pi ft$$

Portanto, se a voltagem no resistor aparecer no topo da Figura 19-7, a corrente através do resistor aparecerá na parte inferior na figura.

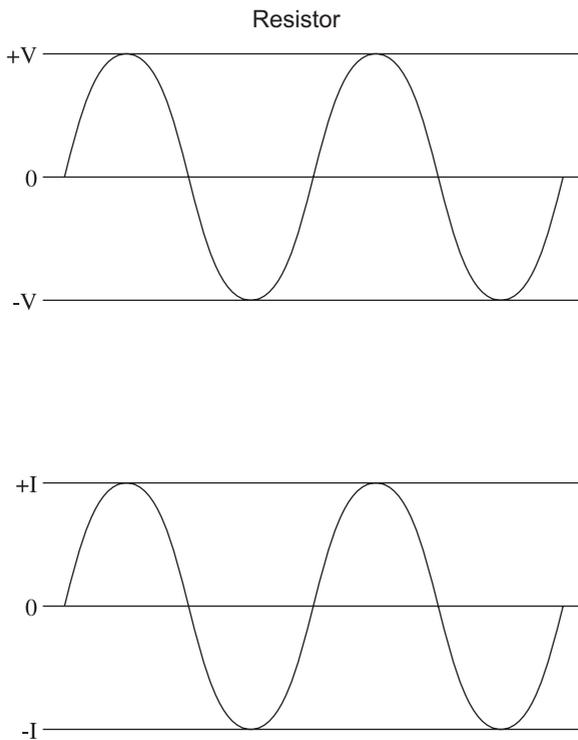


Figura 19-7:
A voltagem
e a corrente
em um
resistor.

Isso é bem simples, mas como os capacitores e os indutores reagem à mudança das voltagens e das correntes?

Conduzindo com capacitores

Veja o capacitor de um circuito A/C na Figura 19-8.

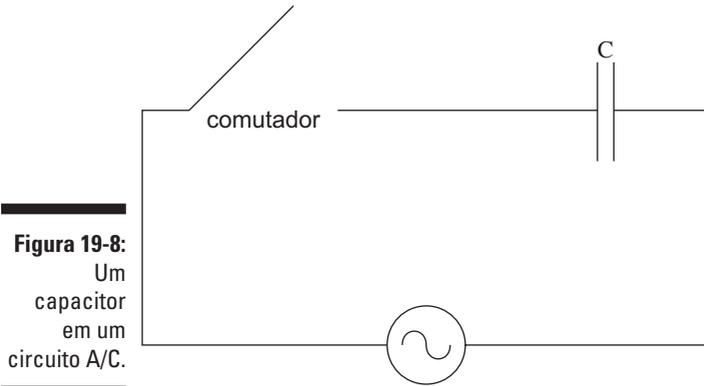


Figura 19-8:
Um capacitor em um circuito A/C.

Você viu nas seções anteriores que $V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} R$ para os resistores em um circuito A/C. Como você pode relacionar a voltagem de um capacitor à corrente que flui através dele? Com a seguinte equação:

$$V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} X_C$$

A equação tem a mesma forma que $V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} R$, mas o que é X_C ? É a *reatância capacitiva* de um capacitor, que fornece uma medida do quanto um capacitor realmente pode atuar como um resistor quando a frequência muda. Você mede em ohms, exatamente como a resistência para um resistor e é medido experimentalmente como sendo igual a

$$X_C = 1 / (2\pi f C)$$

onde f é a frequência e C é a capacitância.

Medindo as correntes através dos capacitores

Você pode descobrir a grandeza das correntes através dos capacitores, dada a voltagem aplicada. Por exemplo, digamos que o capacitor na Figura 19-8 tenha $1,0 \mu\text{F}$ ($1,00 \times 10^{-6}\text{F}$ – você mede a capacitância em Faradays; ver Capítulo 16) e a voltagem com raiz quadrada média da fonte de voltagem tem 12 V. Qual é a corrente que flui quando a frequência tem 1,0 Hz e quando tem 10.000 Hz? Reunindo as equações já vistas, você sabe que

$$I_{\text{rqm}} = 2\pi f C V_{\text{rqm}}$$

Portanto, para 10 Hz, você obtém

$$I_{\text{rqm}} = 2\pi f C V_{\text{rqm}} = 2\pi (10,0)(1,00 \times 10^{-6}) (12) = 7,54 \times 10^{-4} \text{ A}$$

E para 10.000 Hz, tem

$$I_{\text{rqm}} = 2\pi f C V_{\text{rqm}} = 2\pi (10^4)(1,00 \times 10^{-6}) (12) = 0,754 \text{ A}$$

Bem diferente e tudo porque a frequência muda. Como pode ver, você realmente tem que controlar a frequência para os capacitores (diferente dos resistores).

Revisando os valores reais

A corrente e a voltagem com raiz quadrada média permitem lidar com quantidades que variam com o tempo. Um capacitor absorve e descarrega alternadamente a força – nada é perdido para o calor – portanto, um capacitor não usa energia resultante em um circuito A/C (porém, um resistor usa). Como a corrente e a voltagem variam com o tempo, o valor médio do tempo (que é o valor da raiz quadrada média) é uma boa indicação do que está acontecendo, sendo, por isso, que 110 volts, a voltagem das tomadas na parede, são um padrão. Mas e se você não quiser um valor médio do tempo? E se quiser um valor real, dependente do tempo e tudo mais? Digamos, por exemplo, que a voltagem gerada pela fonte na Figura 19-8 seja como a mostrada na Figura 19-9. O que acontece na corrente?

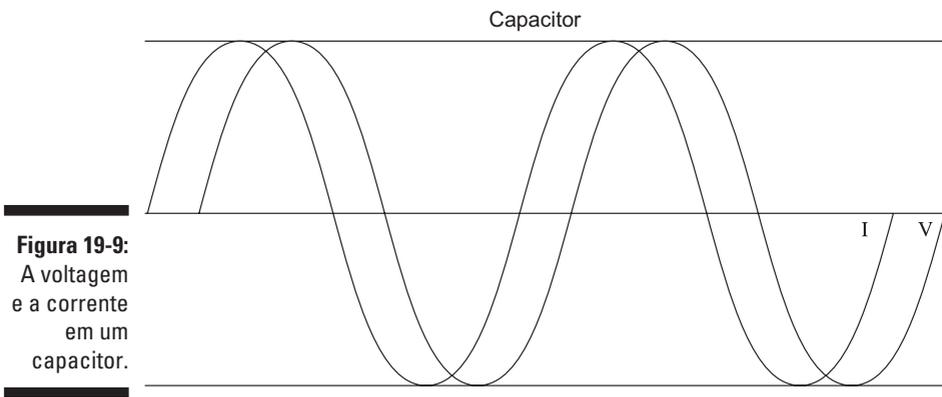


Figura 19-9:
A voltagem e a corrente em um capacitor.

Como você pode ver na figura, a corrente segue a mesma forma da voltagem, mas é deslocada um pouco para a esquerda. Como o eixo X representa o tempo, você pode ver que a corrente atinge um pico antes da voltagem – na Física, você diz que a corrente *conduz* a voltagem. Na verdade, a corrente tem um pico um quarto de ciclo na frente da voltagem, significando que a corrente chega a uma altura em particular, como, por exemplo, seu valor de pico, *antes* da voltagem. Portanto, se (note que estou substituindo ω para ter $2\pi f$ aqui, como você viu ao analisar o movimento angular no Capítulo 7)

$$V = V_0 \text{sen} (\omega t)$$

você pode dizer que

$$I = I_0 \text{sen} (\omega t + \pi/2)$$



Eis como você considera esta relação. Digamos, por exemplo, que a corrente tenha um pico e comece a descer. Mesmo depois da corrente ter o pico e diminuir em grandeza, ainda é positiva, significando que está despejando mais carga no capacitor. E como a voltagem no capacitor é $V = Q / C$, onde Q é a carga e C é a capacitância, a voltagem continua subindo, enquanto a corrente é positiva. Apenas quando a corrente fica negativa (cruzando o eixo X) e a carga está saindo do capacitor, a voltagem começa a diminuir.



Em termos físicos, o fato de a corrente conduzir a voltagem significa que a corrente e a voltagem estão fora de *fase*. Em um resistor, $V = IR$ e não há dependência no tempo – a voltagem e a corrente estão sempre em fase. Em um capacitor, a corrente conduz a voltagem em um quarto de ciclo – que é $\pi/2$ ou 90° – portanto, a corrente e a voltagem estão fora de fase em 90° . Você pode expressar isso para um capacitor dizendo que a corrente conduz a voltagem em 90° ou que a voltagem *retarda* a corrente em 90° .



A amplitude da voltagem e da corrente geralmente é diferente em um capacitor – simplesmente as desenhei com a mesma amplitude na Figura 19-8, para tornar a diferença de fase bastante clara.

Numericamente, se a voltagem fornecida para o capacitor for de:

$$V = V_0 \text{sen}(\omega t)$$

você saberá que

$$I = I_0 \text{sen}(\omega t + \pi/2)$$

Na trigonometria, $\text{sen}(\omega t + \pi/2) = \text{cos}(\omega t)$, portanto, você obtém

$$I = I_0 \text{cos}(\omega t)$$

Esta equação torna muito clara a diferença de fase entre a voltagem e a corrente em um capacitor: uma varia como o seno de ωt , a outra varia como o cosseno de ωt , e o seno e o cosseno estão fora de fase em 90° .



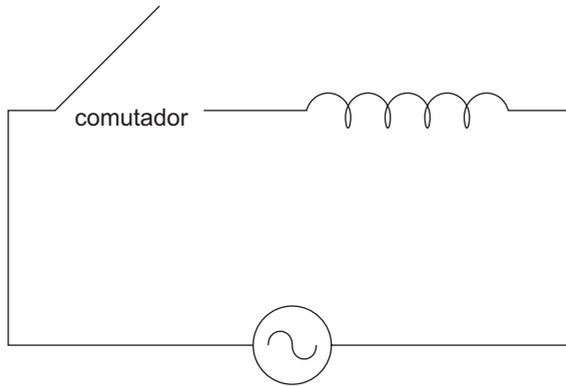
Você pode reescrever esta equação para a corrente em termos de V_0 assim:

$$I = (V_0 / X_C) \text{cos}(\omega t)$$

Retardando com indutores

Veja a Figura 19-10, que mostra algo curvo que parece uma mola. O objeto curvo é um indutor, que, como os capacitores, reage à voltagem alternada e o símbolo da curva deve parecer com uma bobina.

Figura 19-10:
A voltagem
e a corrente
em um
indutor.



Como um indutor reage a uma voltagem alternada colocada nele?
Exatamente como a capacitância, que fornece

$$V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} X_C$$

Você tem uma equação com raiz quadrada média para os indutores,
que é assim

$$V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} X_L$$

O que é X_L ? É a *reatância indutiva* de um indutor, que é uma medida do quanto o indutor resistirá à voltagem nele, muito parecido com o modo como a resistência funciona para um resistor. É medida em ohms e foi medida como sendo igual a

$$X_L = 2\pi fL$$

onde L é a indutância do indutor, medida em Henries, H. A reatância indutiva é diretamente proporcional à indutância e a reatância capacitiva é inversamente proporcional à capacitância:

$$X_L \propto L$$

$$X_C \propto 1/C$$

Como um capacitor, um indutor absorve e descarrega alternadamente a força, portanto, não usa nenhuma energia resultante em um circuito A/C. Se a fonte de voltagem fornecer uma voltagem com a seguinte dependência do tempo:

$$V = V_0 \text{sen}(\omega t)$$

como será a corrente no indutor? Você pode ver a resposta na Figura 19-11 – desta vez, a corrente *retarda* a voltagem e a voltagem *conduz* a corrente, a situação inversa que você tem com um capacitor.

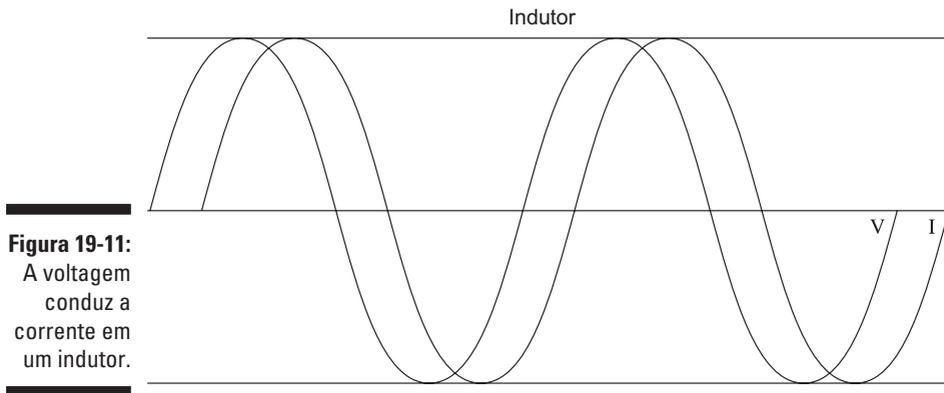


Figura 19-11:
A tensão conduz a corrente em um indutor.

Por que a corrente e a tensão estão fora de fase – na direção oposta a partir dos capacitores? Veja o gráfico na Figura 19-11. Quando a corrente está em seus valores máximo e mínimo, ela não está mudando muito rapidamente. Como consequência, a tensão induzida, que se opõe a qualquer mudança no fluxo no indutor, é zero nesse ponto, sendo por isso que a corrente e a tensão estão fora de fase. Se a tensão aplicada for

$$V = V_0 \sin(\omega t)$$

porque a corrente retarda a tensão, você terá o seguinte para a corrente:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \pi/2)$$



A corrente em um indutor *retarda* a tensão em um quarto de ciclo, significando que a corrente chega a uma altura em particular, como, por exemplo, seu valor de pico, *após* a tensão.

Você também pode escrever a equação como

$$I = -I_0 \cos(\omega t)$$

A equação torna muito clara a diferença de fase entre a tensão e a corrente em um capacitor: uma varia como o seno de ωt , a outra varia como o cosseno de ωt , e o seno e o cosseno estão fora de fase em 90° .



Você pode reescrever esta equação para a corrente em termos de V_0 assim:

$$I = (V_0 / X_L) \cos(\omega t)$$

Lidando com Uma Tripla Ameaça: Circuitos RCL

A Figura 19-12 mostra uma tripla ameaça: um resistor, capacitor e indutor, todos no mesmo circuito.

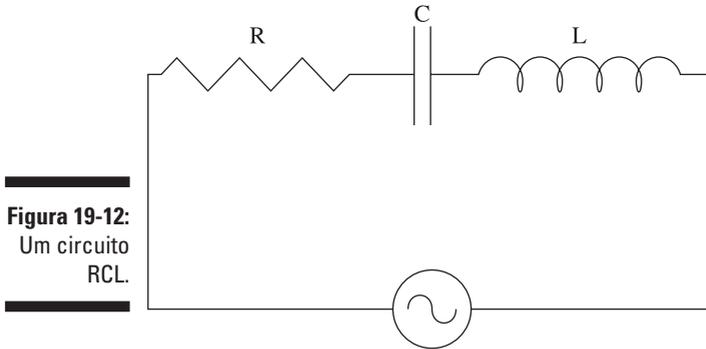


Figura 19-12:
Um circuito RCL.

Como você lida com um circuito como este? Agora, você tem uma resistência (ver Capítulo 17), reatância capacitiva (veja “Conduzindo com capacitores” neste capítulo) e reatância indutiva (veja “Retardando com indutores” neste capítulo), tudo em um mesmo circuito. Você pode dizer apenas o seguinte?

$$V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}}(R + X_C + X_L)$$

Não, infelizmente, você não pode porque o capacitor e o indutor não variam igualmente com o tempo, portanto, não pode somar suas voltagens. Ao contrário, tem que introduzir uma nova quantidade – *impedância* – que tem o símbolo Z :

$$V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} Z$$

O que é Z ? Eis como você exprime em termos de R , X_C e X_L :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Por exemplo, digamos que em uma determinada frequência $X_L = 16,0 \Omega$, X_C seja $12,0 \Omega$, R seja $3,0 \Omega$ e $V_{\text{rqm}} = 10 \text{ V}$. Qual seria a corrente com raiz quadrada média? Você sabe que

$$Z = \sqrt{3,0^2 + (16,0 - 12,0)^2} = 5,0 \Omega$$

portanto, usando a equação $V_{\text{rqm}} = I_{\text{rqm}} Z$, você obtém

$$V_{\text{rqm}} / Z = I = 10,0 / 5,0 = 2,0 \text{ A}$$

Você obtém 2,0 A.

Você também pode determinar se a corrente conduz ou retarda, determinando o ângulo entre a corrente e a voltagem, Φ . Eis como você determina a tangente desse ângulo:

$$\tan \Phi = (X_L - X_C) / R$$

Capítulo 20

Colocando Alguma Luz Sobre Espelhos e Lentes

Neste Capítulo

- ▶ Revendo o básico sobre espelhos
- ▶ Observando a luz quando ela se inclina
- ▶ Examinando o comportamento de espelhos planos, côncavos e convexos
- ▶ Olhando através de lentes convergentes e divergentes

Este capítulo esclarece a luz e o que acontece com ela sob várias condições. Analiso o comportamento da luz quando ela passa pela água (a luz fica inclinada, como você poderá dizer quando terminar), passa por uma lente (a luz fica concentrada, como quando você começa a queima de papel com a luz do Sol focada, ou diverge, como nos óculos das pessoas míopes) e reflete no espelho.

Tudo sobre Espelhos (sohleypse erbos oduT)

A luz é refletida nos espelhos e a Física tem muito a dizer sobre isso. Olhe uma situação incomum na Figura 20-1. A luz está entrando a partir da esquerda e retornando de um espelho. Como você pode ver, a luz entra em certo ângulo em relação à normal (*normal* é a linha desenhada perpendicular ao espelho), chamado de *ângulo de incidência*, θ_i . E retorna em um *ângulo de reflexão* θ_r .

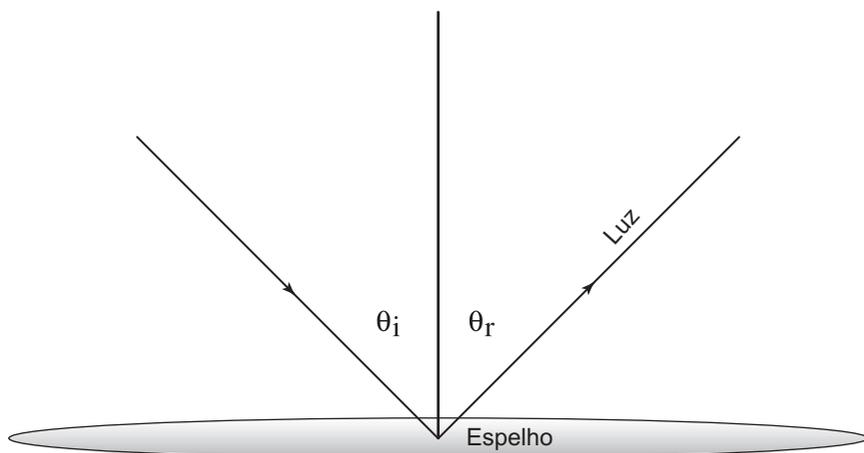


A *Lei da Reflexão* diz que o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais:

$$\theta_i = \theta_r$$

Em outras palavras, se a luz entrar em um ângulo de 30 graus, ela retornará em um ângulo de 30 graus.

Figura 20-1:
A luz atinge
e retorna de
um espelho
com deter-
minados
ângulos.



Quando a Luz Fica Inclínada

Veja a situação na Figura 20-2. A luz está atingindo um bloco de vidro com certo ângulo, θ_1 , em relação à normal (veja a seção anterior) e entra no vidro, terminando em um ângulo θ_2 , em relação à normal.

Refratando a luz com a Lei de Snell

Como você lida, em Física, com a luz que se inclina depois de entrar em um bloco de vidro? Você pode relacionar os ângulos antes e depois, θ_1 e θ_2 , assim:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

O que são n_1 e n_2 ? São chamados de *índices de refração*. Quando a luz se inclina quando passa pelo limite entre diferentes substâncias, a *refração* ocorre e você pode medir o índice da refração para vários materiais.

A lei que descreve como a luz se inclina é chamada de Lei de Snell. A *Lei de Snell* diz que quando um raio de luz viaja de um material que tem o índice de refração n_1 no ângulo θ_1 em relação à normal, para um material que tem o índice de refração n_2 , o raio refratado estará viajando no ângulo θ_2 . Por exemplo, o índice da refração para o ar é praticamente igual ao vácuo: 1,0. O índice de refração para o vidro é de aproximadamente 1,5 na maioria dos casos, portanto, você pode dizer que se $\theta_1 = 45^\circ$ para a situação na Figura 20-2, você terá

$$1,0 \text{ sen } 45^\circ = 1,5 \text{ sen } \theta_2$$

ou

$$\text{sen } \theta_2 = (1,0 \text{ sen } 45^\circ) / 1,5$$

A última equação permite determinar θ_2 :

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(1,0 \text{ sen } 45^\circ / 1,5) = 28,1^\circ$$

Você encontra que θ_2 é igual a $28,1^\circ$. Em outras palavras, a luz é refratada em direção à normal, como você vê na Figura 20-2.

Examinando a água em profundezas aparentes

Veja a Figura 20-3 que mostra um pescador com arpão mirando um peixe na água. A luz que reflete do peixe atinge o limite da água/ar e é refratada. O pescador supõe que a luz está vindo diretamente do peixe, portanto, acredita que o peixe está realmente na profundidade aparente mostrada na figura, não em sua profundidade real.

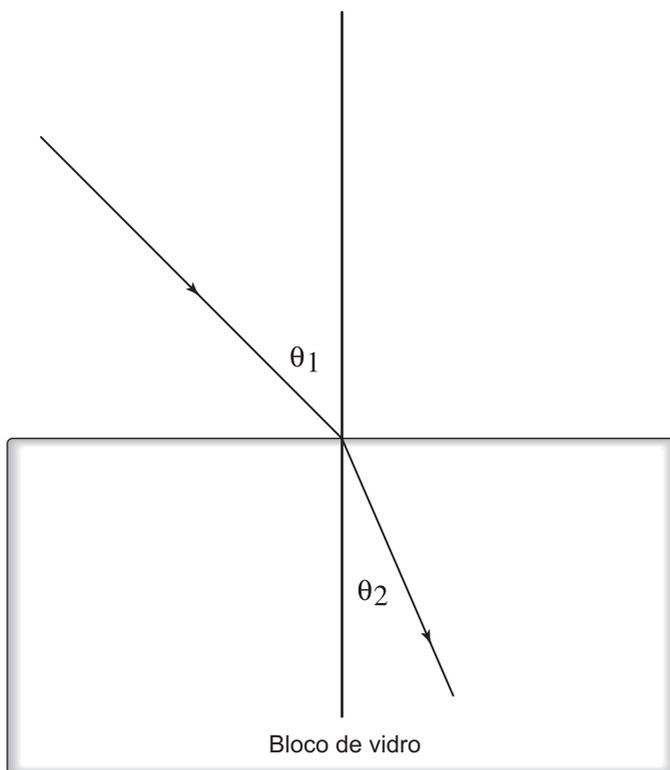


Figura 20-2:
A luz entrando em um bloco de vidro inclina-se, como mostrado.

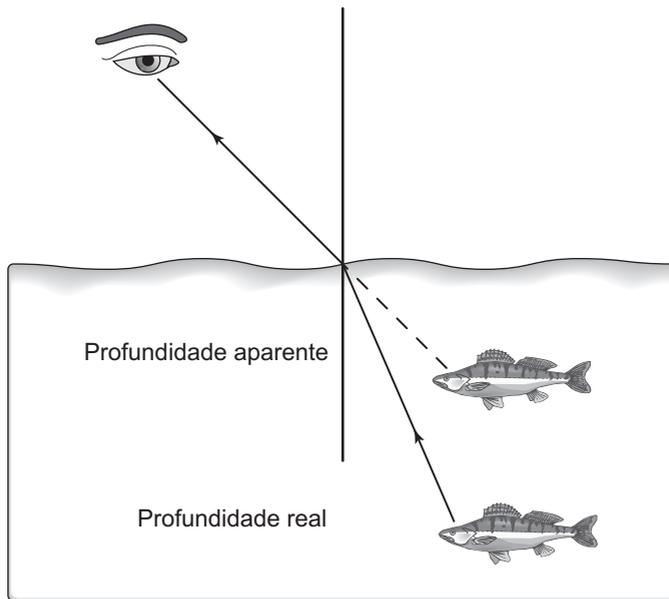


Figura 20-3:
Uma profundidade aparente é uma visão refratada da profundidade real de um objeto.

Se os ângulos envolvidos forem pequenos – como quando o pescador está praticamente sobre o peixe – você poderá relacionar a profundidade aparente e a profundidade real com a seguinte equação (lembre-se que n_1 é o índice de refração do material de onde a luz está vindo – a água neste caso – e n_2 é o índice de refração do material onde a luz termina – o ar neste caso):

$$\text{Profundidade aparente} = (\text{Profundidade real}) (n_2 / n_1)$$

Por exemplo, se o pescador acreditar que o peixe parece estar a 2,0 metros sob a água, os ângulos envolvidos serão pequenos e como o índice de refração para a água é cerca de 1,33 (o ar é 1,00), você obterá

$$\text{Profundidade real} = (\text{Profundidade aparente})(1,33 / 1,00)$$



A refração e a profundidade da luz

O índice de refração de um material é, de fato, a proporção da velocidade da luz em no vácuo, dividida pela velocidade da luz no material:

$$n = \text{Velocidade da luz no vácuo} / \text{Velocidade da luz no material}$$

Portanto, dizer que o índice de refração do vidro é 1,5 é dizer que a luz viaja mais lentamente através do vidro com um fator 1,5.

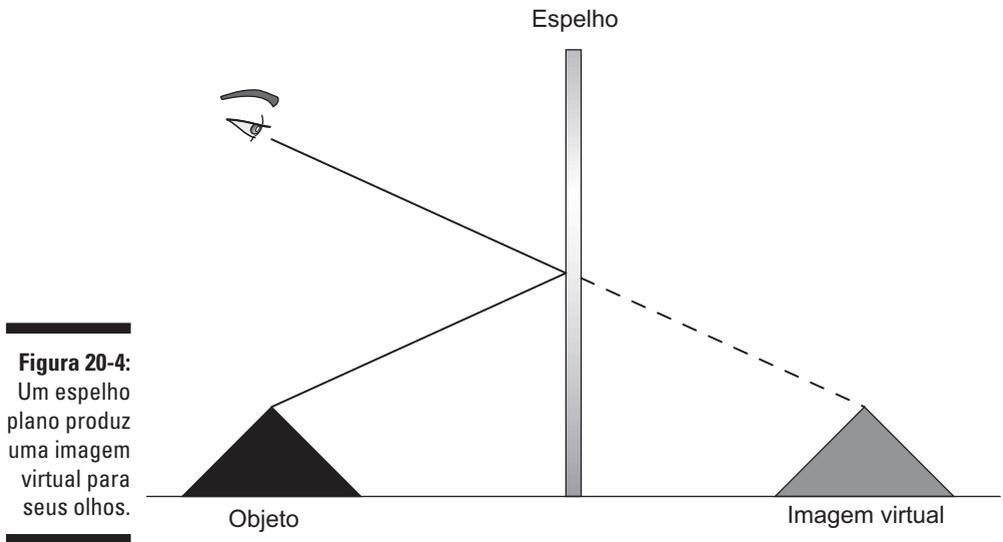
Portanto, relacionar os números fornecerá:

$$\text{Profundidade real} = (2,00)(1,33 / 1,00) = (2,0)(1,33) = 2,66 \text{ m}$$

A profundidade real do peixe é 2,66 metros.

Todos os Espelhos e Nenhuma Fumaça

Você viu vários espelhos em funcionamento no mundo real. O que acontece quando você os vê (ou se vê neles)? Você pode ver um espelho plano na Figura 20-4. Um objeto está na frente do espelho e a luz do objeto retorna do espelho para seus olhos. Do ponto de vista de seus olhos, porém, parece que a luz está vindo de um objeto *atrás* do espelho – uma distância atrás do espelho é igual à distância que o objeto real está na frente do espelho. Contudo, você não encontrará um objeto real atrás do espelho, portanto, diz que a imagem é uma *imagem virtual* do objeto real.



Até então, tudo bem. Mas, o que acontece quando os espelhos começam a ficar curvos?

Expandindo com espelhos côncavos

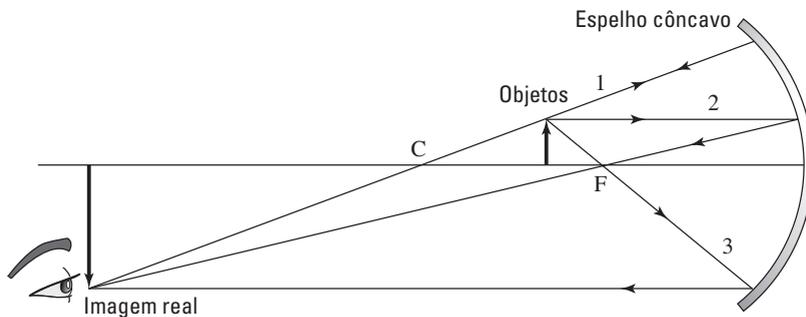
Quando os espelhos ficam curvos, os físicos têm muito sobre o que pensar. Examine o espelho na Figura 20-5. O espelho é *côncavo*, significando que parece a parte interna de uma esfera.



Um modo fácil de identificar um espelho côncavo é lembrar que é parecido com uma xícara, formando uma “caverna”.

Portanto, o que acontece quando você coloca um objeto perto de um espelho côncavo?

Figura 20-5: Um espelho côncavo com um objeto entre o centro da curvatura e o ponto focal.



Dois pontos são importantes para os espelhos côncavos: o centro da curvatura, C, e o ponto focal, F. C é a distância igual ao raio da curvatura da esfera a partir da qual o espelho é feito. F é onde a luz que entra no espelho, paralela (e não distante) ao eixo horizontal, é focada. Para um espelho côncavo, $F = C / 2$. Na Figura 20-5, você vê um objeto no centro da curvatura do espelho. Portanto, como você lida com isso? Onde a imagem desse objeto aparecerá? Você precisa de mais algumas equações, sua munição da Física.

Números brilhantes nos diagramas de raio

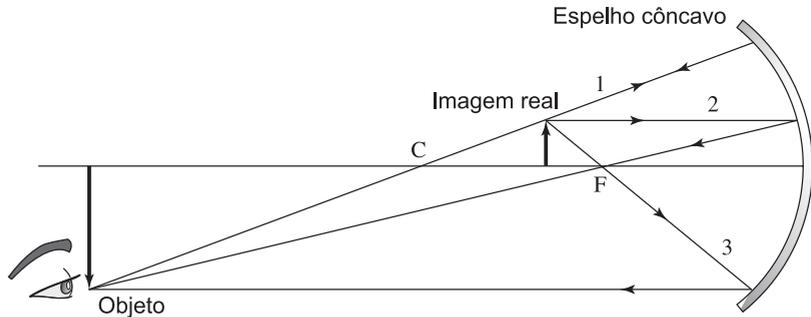
Você pode usar os três raios de luz – identificados como 1, 2 e 3 – vistos na Figura 20-5 para descobrir onde um objeto colocado entre o centro da curvatura e o ponto focal aparecerá. Esses três raios de luz vêm do objeto, retornam do espelho e reúnem-se na imagem do objeto. Eis como você constrói esses raios para um espelho:

- ✓ **O raio 1** deixa o objeto, retorna do espelho e passa pelo centro da curvatura.
- ✓ **O raio 2** sai na horizontal do objeto até o espelho, retorna e passa pelo ponto focal.
- ✓ **O raio 3** viaja do objeto através do ponto focal, retorna do espelho e termina indo paralelamente no eixo horizontal.

O ponto onde os três raios encontram-se é o local da imagem. Na Figura 20-5, você pode ver que o local da imagem é depois do centro da curvatura; é uma imagem invertida (de cabeça para baixo) aumentada. Como a imagem está no mesmo lado do espelho que o objeto, é chamada de *imagem real*. Uma imagem real permite ser colocada em uma tela, portanto, a luz física do objeto será focada na tela, criando a imagem.

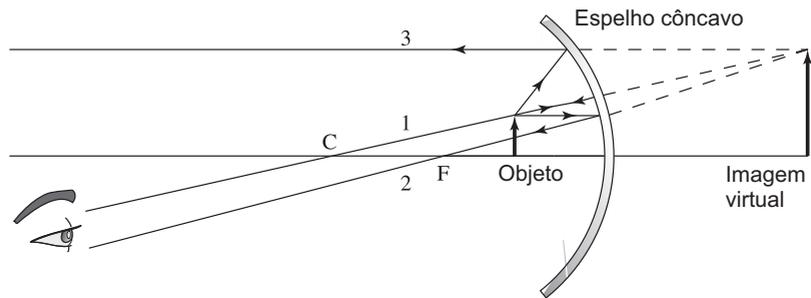
Agora, veja uma situação onde as informações são invertidas – o objeto fica depois do centro da curvatura, como mostrado na Figura 20-6. Onde a imagem acabará desta vez? Você pode usar os mesmos três raios, como mostrado na Figura 20-6. Neste caso, a imagem termina entre o centro da curvatura e o ponto focal; é uma imagem invertida comparada com o objeto, reduzida em tamanho e também é uma imagem real.

Figura 20-6: Um espelho côncavo com um objeto depois do centro da curvatura.



Você tem que ficar atento com qualquer outra possibilidade? Sim, o objeto pode aparecer mais próximo do espelho, entre o ponto focal e o espelho (como visto na Figura 20-7). Você pode aplicar os mesmos três raios aqui, mas quando faz isso, eles não se reúnem na frente do espelho; eles se reúnem atrás dele, como visto na figura, pois a imagem é *virtual* – nenhuma luz real reúne-se para formar essa imagem. Ao contrário, quando você vê o espelho de frente, os raios que retornam dela parecem estar vindo de uma imagem virtual atrás do espelho.

Figura 20-7: Um espelho côncavo com um objeto entre o espelho e o ponto focal.



Mexendo nos números nos diagramas de raio

Você poderá calcular onde uma imagem se formará em relação a um espelho côncavo se tiver a equação certa. Observe a Figura 20-8, onde você vê duas possibilidades de um objeto sendo refletido em um espelho.

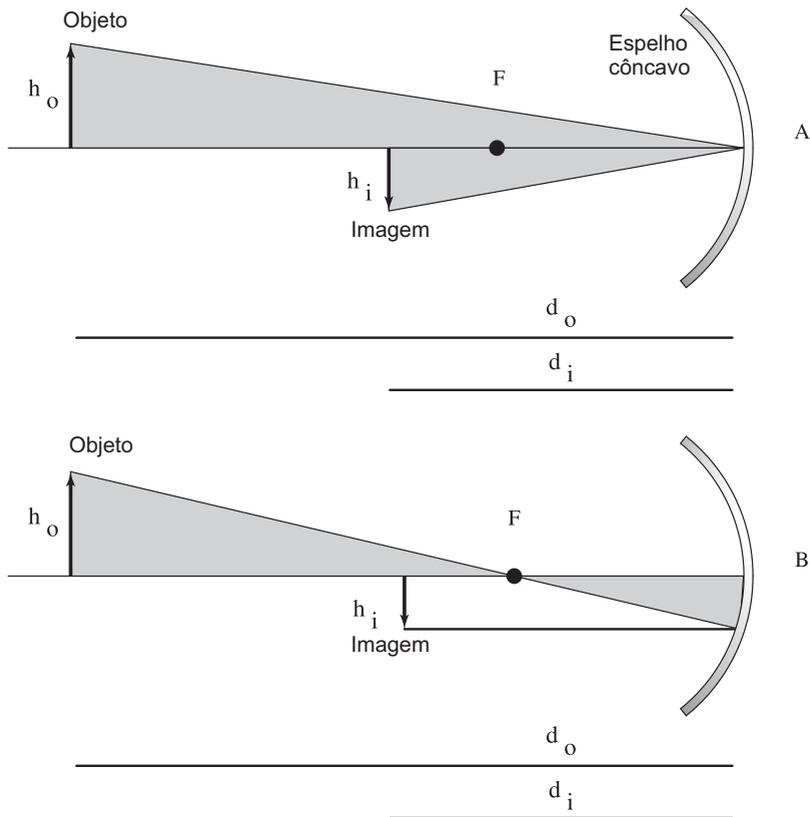


Figura 20-8: Os triângulos necessários para derivar a equação do espelho.

Aqui, as distâncias vitais são

- ✓ h_o : A altura do objeto
- ✓ h_i : A altura da imagem
- ✓ d_o : A distância até o objeto
- ✓ d_i : A distância até a imagem.

Você pode criar uma equação que liga todas essas quantidades notando que cada um dos triângulos nos diagramas A e B na Figura 20-8, são triângulos parecidos, significando que têm os mesmos ângulos e, portanto, proporções iguais dos lados.

O diagrama A é uma aplicação da lei de reflexão – que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão – e fornece esta relação:

$$h_o / h_i = d_o / d_i$$

E a partir do diagrama B, você obtém

$$h_o / h_i = (d_o - f) / f$$

Definir essas duas equações como sendo iguais entre si fornecerá

$$d_o / d_i = (d_o - f) / f$$

Em outras palavras,

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f$$



Esta equação é conhecida como a *equação do espelho*; ela relaciona a distância que o objeto está do espelho e o comprimento focal até a distância que a imagem formará a partir do espelho. Se a imagem for virtual (formando-se atrás do espelho), d_i será negativa.

Digamos, por exemplo, que uma empresa de cosméticos o procure e deseja que você desenvolva um espelho de banheiro que permita que as pessoas vejam suas imagens, só que aumentadas. E a empresa não deseja que a imagem seja invertida.

Você começa a trabalhar, decidindo que a Figura 20-7 fará o serviço. Se você colocar seu rosto mais próximo que o comprimento focal do espelho, verá uma imagem virtual aumentada e para cima. Calculando rapidamente, decide que se as pessoas colocarem seus rostos a 12,0 cm do espelho, você deverá fornecer um espelho com um comprimento focal de 20,0 cm, significando que o raio da curvatura será de 40,0 cm. Onde a imagem se formará? Você sabe que

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f$$

Relacionar os números fornecerá

$$1 / 12,0 + 1 / d_i = 1 / 20,0$$

Determinar d_i fornecerá -30,0 cm.

Você diz para a empresa que usar um espelho com um raio de curvatura de 40 centímetros produzirá uma imagem a -30,0 centímetros.

Os executivos da empresa de cosméticos olham entre si e dizem: “Mas qual é o *aumento*?”. “Hum”, você pensa, “Boa pergunta”.

Calculando o aumento

O *aumento* de um espelho é a proporção da altura da imagem dividida pela altura do objeto, h_o/h_i ; tal aumento pode ser interessante para as pessoas que desejam usar o espelho para aplicar cosméticos, por exemplo. Você encontrou que

$$h_o / h_i = d_o / d_i$$

que diz que

$$m = -d_i / d_o$$

O sinal negativo é usado porque o aumento será positivo se a imagem estiver virada para cima e negativo se a imagem estiver invertida. Portanto, qual é o aumento para o espelho de beleza no qual trabalhou na seção anterior? Bem, a imagem forma-se a $-30,0$ cm quando o objeto está a $12,0$ cm, portanto, o aumento é

$$m = 30,0 / 12,0 = 2,5$$

O aumento é de $2,5$ quando o rosto de alguém está a $12,0$ cm do espelho.

Contraindo com espelhos convexos

Um espelho *convexo* é parecido com uma parte espelhada de uma esfera vista de fora. Você pode ver um espelho convexo na Figura 20-9. Como você lida com isto na Física?

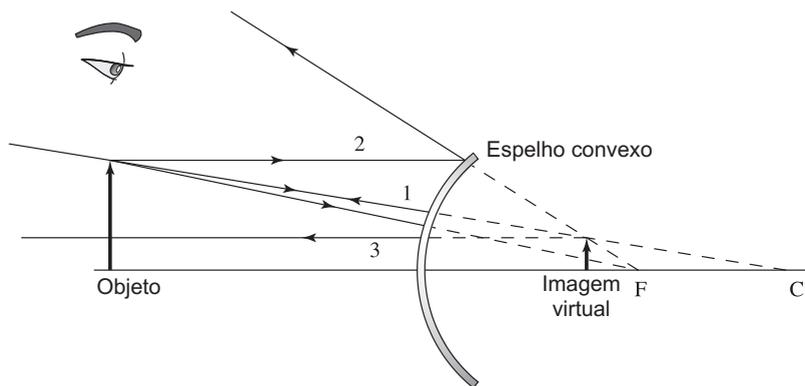


Figura 20-9: Derivando a equação do espelho convexo.

Tudo bem. Você pode usar os três raios utilizados para um espelho côncavo da seção anterior – a única diferença é que a imagem em um espelho convexo sempre será virtual e você sempre colocará o ponto focal e o centro da curvatura no outro lado do espelho a partir da imagem.

Veja os raios na Figura 20-9; como pode observar, a imagem criada é virtual (atrás do espelho), virada para cima e reduzida. Você pode verificar essas características com uma tigela de metal para saladas. Se você olhar a tigela pelo lado de fora, terá uma imagem menor (e um pouco distorcida) de si mesmo.

Você também pode usar a equação do espelho para os espelhos convexos (veja a seção “Mexendo nos números nos diagramas de raio” anteriormente neste capítulo) – se você lembrar que como o ponto focal fica atrás do espelho, f será negativo. Por exemplo, digamos que você tenha um espelho convexo de comprimento focal -20 cm e coloque um objeto a 35 cm na frente dele. Onde a imagem se formará? Simplesmente relacione os números na equação de espelho:

$$1/d_o + 1/d_i = 1/f = 1/35,0 + 1/d_i = 1/-20$$

Determinar d_i fornecerá

$$d_i = -12,7 \text{ cm}$$

A imagem parecerá estar a 12,7 cm no outro lado do espelho. Você também pode encontrar o aumento? Certamente. A partir da seção anterior, você sabe que

$$m = -d_i / d_o = 12,7 / 35,0$$

portanto,

$$m = 0,36$$

A imagem virtual estará virada para cima e reduzida em um fator de 0,36 e parecerá estar a 12,7 cm no outro lado do espelho. Agora, você conquistou os espelhos, como qualquer bom mestre em Física.

Vendo Claramente com Lentes

Além dos espelhos, os outros elementos óticos que você encontra todos os dias são as lentes. As *lentes* são especialmente construídas para inclinar a luz que passa por elas, focando-a e criando imagens. E como os espelhos, as lentes podem produzir imagens reais ou virtuais.

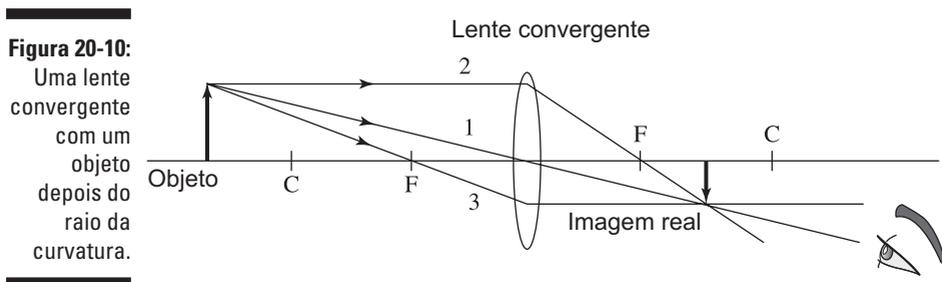
Você pode ampliar imagens com dois tipos de lentes: lentes convergentes e divergentes. Coloco as duas em foco nas seguintes seções.

Expandindo com lentes convergentes

Uma *lente convergente* inclina a luz em direção ao eixo horizontal. Esse tipo de lente pode focar a luz de um objeto, em um lado da lente, formando uma imagem real do outro lado. Deseja ver um inseto mais claramente usando uma lente de aumento? É uma lente convergente que você está usando.

Relacionando lentes e diagramas de raio

Você pode aplicar os diagramas de raio nas lentes de modo muito parecido com espelhos. Veja a lente na Figura 20-10. A forma da lente informa-o que é uma lente convergente.



Você pode criar um diagrama de raio usando os três raios vistos na Figura 20-10:

- ✓ **O raio 1** deixa o objeto e passa pelo centro da lente.
- ✓ **O raio 2** sai na horizontal a partir do objeto até a lente e, então, passa pelo ponto focal.
- ✓ **O raio 3** vai do objeto através do ponto focal, passa pela lente e termina paralelamente com o eixo horizontal.

Agora, você pode construir o diagrama de raio para o caso da Figura 20-10, onde o objeto está depois de c , o raio da curvatura. O raio da curvatura deve ser $2f$, onde f é o comprimento focal (o raio da curvatura não é exatamente $2f$, pois as lentes são realmente parabólicas, não esféricas, mas é bem próximo das pequenas lentes). Neste caso, você obtém uma imagem real reduzida, que é invertida.

Mas e se o objeto estiver entre o ponto focal e o raio da curvatura, como você vê na Figura 20-11? Você pode ver o que os três raios dizem aqui; você obtém uma imagem real aumentada, que também é invertida.

Você tem uma última possibilidade a considerar: E se a imagem for colocada mais próxima da lente do que o ponto focal? Você pode ver isso mostrado na Figura 20-12. Neste caso, poderá usar os raios 1 e 2, como mostrado na Figura 20-12, para determinar que o que obtém é uma imagem virtual, virada para cima e aumentada (que é como

funcionam as lentes de aumento). Como em todos os diagramas de raio, você vê onde os raios se reúnem para formar uma imagem.

Figura 20-11:

Uma lente convergente com um objeto entre o raio da curvatura e o ponto focal.

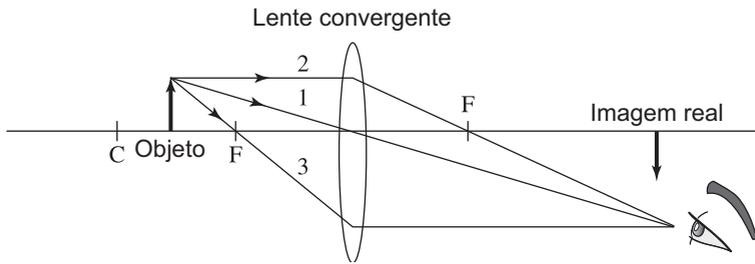
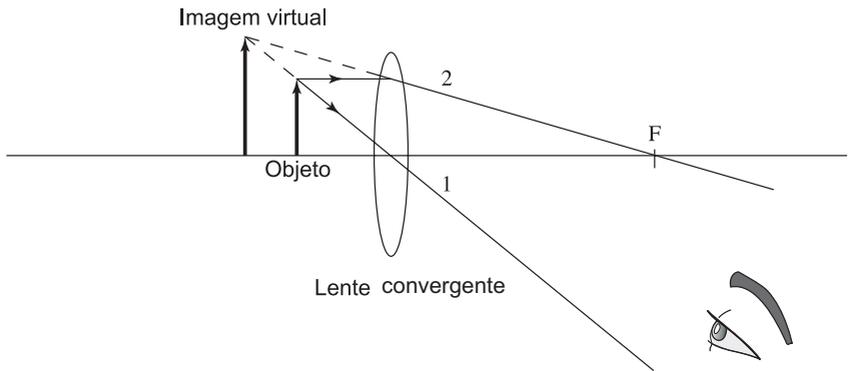


Figura 20-12:

Uma lente convergente com um objeto colocado mais próximo que o ponto focal.



Como é comum com as imagens virtuais, nenhum raio de luz real converge onde está a imagem virtual. Se você colocar uma tela aqui, não verá uma imagem. A imagem é virtual, significando que você tem que olhar através da lente para vê-la – você vê a imagem aparente através da lente.

Colocando em foco a equação da lente

Como você calcula o local real de uma imagem através de uma lente? Você pode usar a *equação da lente fina*, que é igual à equação do espelho e pode ser derivada do mesmo modo:

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f$$

onde d_i é a distância da imagem a partir da lente, d_o é a distância do objeto e f é o comprimento focal.



Esta equação mantém-se para as lentes *finas* (do contrário, a forma da lente, que deve ser uma esfera para essa equação, fornecerá o que é chamado de *aberração esférica*; na prática, as lentes são ligeiramente parabólicas). Note que se a imagem for virtual, d_i será negativa.

Por exemplo, se alguém lhe der uma lente convergente com um comprimento focal de 5,0 centímetros, para usar como uma lente de aumento, em um selo postal, a 3,0 cm distante da lente, onde a imagem virtual aparecerá? Tudo que você tem a fazer é relacionar os números:

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f = 1 / 3,0 + 1 / d_i = 1 / 5,0$$

Determinar d_i fornecerá $d_i = -7,5$ cm. Uma distância de imagem negativa significa uma imagem virtual e como você pode ver na Figura 20-12, a imagem estará para cima e aumentada.

Como você está trabalhando com uma lente de aumento, também terá que encontrar o aumento real.

Calculando o aumento

Encontrar o aumento das lentes convergentes é a parte mais fácil. Como nos espelhos, você pode calcular o aumento assim:

$$m = -d_i / d_o$$



Se o aumento for negativo, a imagem será invertida em relação ao objeto. Se o aumento for positivo, a imagem estará virada para cima em comparação com o objeto.

Qual é o aumento da lente no exemplo da seção anterior? Você sabe que $d_o = 3,0$ cm e $d_i = -7,5$ cm, portanto,

$$m = -d_i / d_o = 7,5 / 3,0 = 2,5$$

O aumento obtido para o selo, sob a lente de aumento a 3,0 cm distante da lente, é de 2,5.

Eis outro exemplo. Digamos que você queira uma imagem real e aumentada, uma que você pode colocar em uma tela. Por exemplo, você pode ter um projetor de slides com um slide iluminado que deseja projetar em uma tela a 1,0 metro de distância. Neste caso, deverá usar a configuração vista na Figura 20-11, onde o objeto é colocado em um local entre o raio da curvatura (que é igual a $2f$) e o ponto focal (f).

Suponha que o slide esteja a 10 cm da lente – qual comprimento focal a lente deve ter? Você sabe que a equação da lente fina informa que

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f$$

Relacionar os valores fornecerá

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / 0,10 + 1 / 1,00 = 1 / f$$

Em outras palavras,

$$10,0 + 1,00 = 11,0 = 1 / f$$

Portanto, o comprimento focal da lente que você precisa é de $1 / 11,0$ metros ou cerca de 9,09 centímetros.

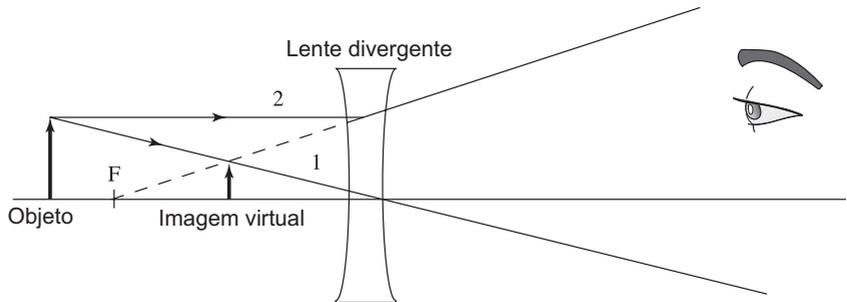
Contraindo com lentes divergentes

As lentes convergentes focam a luz no eixo horizontal; as *lentes divergentes* focam a luz longe do eixo horizontal. Você pode ver como é uma lente divergente na Figura 20-13. Neste caso, você pode ver que o diagrama de raio está fornecendo uma imagem virtual, virada para cima e reduzida.



Uma lente divergente sempre produz uma imagem virtual, virada para cima e reduzida no tamanho, em comparação com o objeto.

Figura 20-13:
Usando uma lente divergente para criar uma imagem virtual.



Você pode aplicar a equação da lente fina aqui, como fez com as lentes convergentes? Certamente que sim, exceto que tem que perceber que para uma lente divergente, o comprimento focal é negativo – exatamente como um espelho convexo.

Por exemplo, digamos que você tenha uma lente divergente com um comprimento focal de $-10,0$ cm e coloque um objeto a $4,0$ cm distante. Onde a imagem se formará? Use sua companheira, a equação da lente fina, para isto:

$$1 / d_o + 1 / d_i = 1 / f$$

Substituir seus dados fornecerá

$$1 / 4,0 + 1 / d_i = -1 / 10,0$$

Depois de um pouco de reorganização para colocar d_i em um lado, você obterá

$$d_i = -2,85 \text{ cm}$$

Note que esta imagem forma-se mais próxima da lente do que o comprimento focal, como mostrado na Figura 20-13 e essa distância até a imagem é negativa, significando que a imagem é virtual. Qual é o aumento desta lente? Usando a mesma equação de aumento utilizada para as lentes convergentes (veja a seção anterior),

$$m = -d_i / d_o$$

Relacionar os números fornecerá

$$m = 2,85 / 4,0 = 0,713$$



O aumento positivo informa que a imagem está virada para cima em comparação com o objeto e como o aumento é inferior a 1,0, você sabe que a imagem será reduzida em tamanho, comparada com o objeto.

Parte VI

A Parte dos Dez

A 5ª Onda

Por Rich Tennant



Nesta parte...

Solto a Física na Parte VI e ela dispara. Você descobre 10 tópicos de Einstein, como, por exemplo, a dilatação do tempo, contração do comprimento e $E = mc^2$. Também vejo os 10 fatos incomuns da Física estendendo-se desde a Terra até os confins do espaço – tudo, desde buracos negros e Big Bang até os buracos de minhoca.

Capítulo 21

Dez Critérios Surpreendentes sobre a Relatividade

Neste Capítulo

- ▶ Observando o comportamento da luz em altas velocidades
- ▶ Examinando o tempo e o comprimento no espaço
- ▶ Revisando as visões de Einstein sobre a matéria e a energia
- ▶ Brilhando a luz no Sol e na velocidade da luz
- ▶ Relacionando Einstein e Newton

Este capítulo contém 10 fatos surpreendentes da Física sobre a Teoria da Relatividade de Einstein. Bem, mais ou menos. As partes de informações que demonstro não são realmente “fatos”, pois como em tudo na Física, as informações podem ainda ser desaprovadas algum dia. Mas, a Teoria da Relatividade já foi testada de mil maneiras e, até então, tem sido como o desejado. A teoria fornece muitos critérios espetaculares, como, por exemplo, aquele que determina que a matéria e a energia podem ser convertidas uma na outra, como pode ser visto na mais famosa das equações da Física:

$$E = mc^2$$

Você também descobre que o tempo dilata-se e que o comprimento diminui perto da velocidade da luz. Tudo isto está neste capítulo. Depois de você ler o que Albert Einstein tem a dizer, o tempo e o espaço nunca mais serão os mesmos.

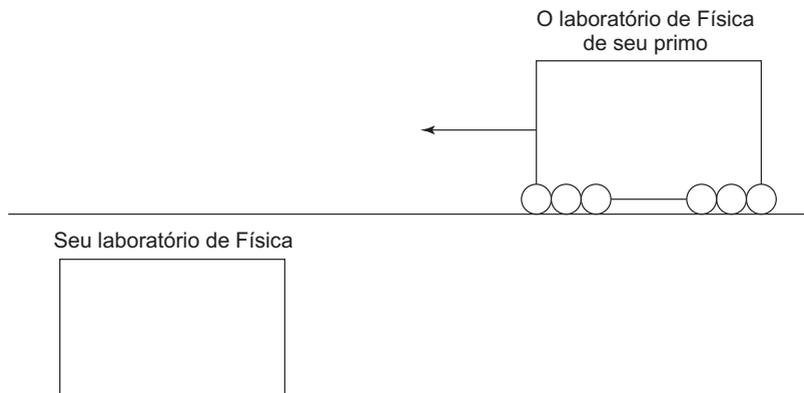
A Natureza Não tem Favoritos

Einstein determinou há muito tempo que as leis da Física são iguais em cada quadro de referência da inércia. Em um quadro de referência da inércia, se a força resultante em um objeto for zero, o objeto permanecerá em repouso ou se moverá com uma velocidade constante. Em outras palavras, um *quadro de referência da inércia* é um quadro de referência com aceleração zero. A lei da inércia de Newton (um corpo em repouso fica em repouso e um corpo em movimento constante fica em movimento constante) aplica-se.

Dois exemplos de quadros de referência sem inércia são quadros que giram tendo uma aceleração centrípeta resultante ou, de outra maneira, são quadros de aceleração.

O que Einstein basicamente disse é que qualquer quadro de referência da inércia é tão bom quanto qualquer outro em relação às leis da Física – a natureza não tem favoritos entre os quadros de referência. Por exemplo, você pode estar fazendo um conjunto de experimentos de Física quando seu primo aparece com um vagão de trem, fazendo também um conjunto de experimentos, como visto na Figura 21-1.

Figura 21-1:
Os laboratórios de Física móveis são tão precisos para as leis da Física quanto os laboratórios imóveis.



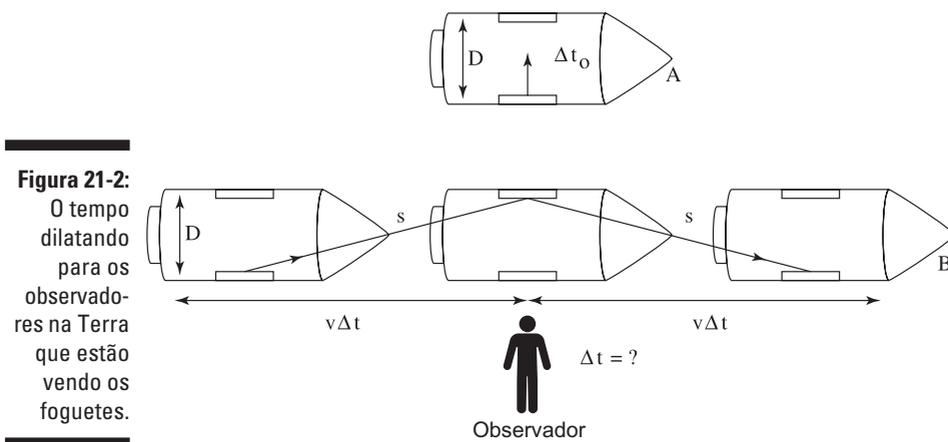
Nenhum de vocês verá diferença nas leis da Física. Nenhum experimento permite-o distinguir entre um quadro de referência da inércia que está em repouso e um que está em movimento.

A Velocidade da Luz é Constante, não Importa a Velocidade

Comparar as velocidades enquanto você está em movimento é bem difícil com carros na rodovia, o que dirá comparar as velocidades que incluem a velocidade da luz. Para a maioria das pessoas, descobrir que a velocidade da luz é constante, não importa a velocidade, é inesperado. Digamos, por exemplo, que seu primo, que está viajando em um vagão ferroviário, termine uma bebida e jogue, sem pensar, a lata vazia em sua direção. Ela pode não estar viajando tão rapidamente em relação ao seu primo – digamos, 5 mph – mas se o quadro de referência da inércia de seu primo (veja a seção anterior) estiver movendo-se em relação a você com uma velocidade de 60 mph, a lata poderá atingi-lo com essa velocidade aumentada – 65 mph. Ai. Mas a luz sempre atingirá você com cerca de 670.616.629 mph.

O Tempo se Dilata em Altas Velocidades

Imagine que você esteja pesquisando em uma noite estrelada quando um astronauta passa rapidamente em um foguete, como visto na Figura 21-2. Você acha que pode ouvir, com voz fraca, as palavras: “Deixe-me descer, não me importo com a World Series!”, vindas do foguete, mas não está certo. A Teoria Especial da Relatividade de Einstein diz que o tempo medido para os eventos que ocorrem no foguete ocorre mais lentamente do que os eventos medidos pelo astronauta. Em outras palavras, o tempo se dilata ou “expande” a partir do seu ponto de vista na Terra.



Para ver como isso ocorre, veja a Figura 21-2, diagrama A. Nesse diagrama, um relógio especial lança luz para a frente e para trás entre dois espelhos montados nas paredes internas do foguete, em uma distância D de separação. O astronauta pode medir os intervalos de tempo com base em quanto tempo leva para a luz ir e voltar. Porém, de sua perspectiva, o tempo parece diferente. Você vê o foguete movendo-se rapidamente, portanto, a luz não tem que viajar apenas a distância s – ela também tem que levar em conta a distância que o foguete viaja na horizontal.

A Viagem Espacial Envelhece Menos Você

Não diga isso para sua tia rica e obcecada por beleza, mas se você estiver viajando no espaço, poderá envelhecer menos do que alguém na Terra. Por exemplo, digamos que você observe um astronauta que esteja movendo-se com uma velocidade de $0.99c$, onde c é igual a velocidade da luz. Para o astronauta, os tiques no relógio duram, digamos, 1,0 segundo. Para cada segundo que passa no foguete quando medido pelo astronauta, você mede 7,09 segundos.



Este efeito ocorre em velocidades ainda menores, tais como quando um amigo viaja em um jato, com cerca de 520 mph. Contudo, a velocidade do avião é tão lenta em comparação com a velocidade da luz que os efeitos relativísticos realmente não são notados – seriam necessários 100.000 anos para a viagem a jato criar uma diferença de tempo de 1 segundo entre você e o relógio de seu amigo. Porém, os físicos conduziram esse experimento em jatos e relógios atômicos, de césio, supersensíveis e capazes de medir as diferenças de tempo em $1,0 \times 10^{-9}$ segundos. E os resultados concordaram com a Teoria da Relatividade Especial.

O Comprimento se Contraí em Altas Velocidades

Não só você pode medir o tempo para os eventos em naves espaciais como sendo mais longo (veja a seção anterior), como também o comprimento dos foguetes. O comprimento do foguete no qual um astronauta está é diferente, de acordo com suas medidas tiradas na Terra. Veja a situação na Figura 21-3 para ver como isto funciona:

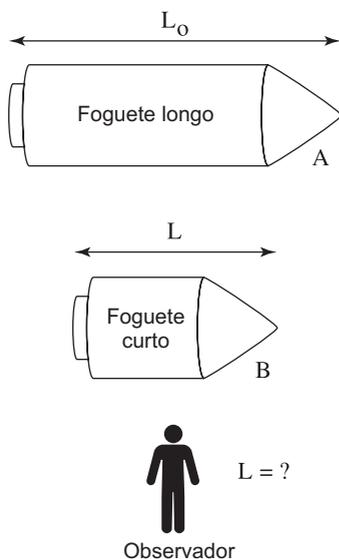


Figura 21-3:
O comprimento se contraí para os foguetes no espaço.

O comprimento, L_0 , de um objeto medido por uma pessoa em repouso em relação a esse objeto será medido como L , um comprimento mais curto, medido por uma pessoa que se move com velocidade v em relação a esse objeto. Em outras palavras, o objeto *encolhe*.



Note que o encolhimento ocorre apenas na direção do movimento. Como você pode ver na Figura 21-3, o foguete parece se contrair na direção do movimento quando você o mede (diagrama B), mas não do ponto de vista do astronauta.

E = mc²: A Equivalência da Matéria e da Energia

A contribuição mais famosa de Einstein é sobre a equivalência da matéria e da energia – uma perda ou ganho na massa que também pode ser considerada perda ou ganho em energia. (Estou resistindo a contar a velha piada de Física para uma pessoa em dieta, com uma perda de massa resultando em um aumento em energia.) Qual foi o resultado de Einstein? $E = mc^2$? Na verdade, não. Foi

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como um caso especial, o objeto que você está convertendo em energia pode estar em repouso, significando que $v = 0$. Em tal caso e apenas nesse caso, você, de fato, encontra $E = mc^2$.



Você viu a famosa equação de Einstein antes, mas o que ela realmente significa? De certo modo, você sempre pode pensar em massa como energia “condensada” e essa fórmula fornece o fator de conversão entre quilogramas e Joules, que é c^2 , a velocidade da luz ao quadrado.

Matéria mais Antimatéria é Igual a Boom

Você pode obter uma conversão completa de massa em energia quando tem matéria e antimatéria. A *antimatéria* é apenas a matéria padrão, com algumas diferenças. Ao invés dos elétrons nos átomos da antimatéria, você tem *pósitrons* carregados positivamente. E no lugar dos prótons carregados positivamente, você tem *antiprótons* carregados negativamente. Os apaixonados pela ficção científica podem reconhecer a antimatéria como a força motriz nos motores da Nave Enterprise do *Star Trek*.

Mas o estranho é que a antimatéria realmente *existe*. Os cientistas podem localizá-la no Universo e, na verdade, o Sol está fazendo isso o tempo inteiro. Quando um átomo de hidrogênio padrão (elétron e próton) e um átomo de hidrogênio da antimatéria (pósitron e antipróton) reúnem-se, eles são inteiramente convertidos, 100%, em energia. O que acontece com essa energia? Ela se move como fótons de alta energia (que, pode transferir calor como energia radiante).

Não faça planos para o final do sol

O Sol irradia força em $3,92 \times 10^{26}$ Watts. Portanto, em um segundo, ele irradia $3,92 \times 10^{26}$ Joules de energia. Isso se traduz no Sol perdendo cerca de *4,36 bilhões de quilogramas de massa por segundo* — puxa! É cerca de 4,79 milhões de toneladas de matéria perdida a cada segundo. Você quase pode ouvir os cientistas ficando malucos. Com certeza, neste caso, não haverá mais Sol em algumas semanas. Eles gritam: “Nossas hipotecas! Teremos que conseguir novos trabalhos

quando o Sol acabar!”. O que eles não devem esquecer é que o Sol tem uma massa de $1,99 \times 10^{30}$ kg. Mesmo com $4,36 \times 10^9$ kg de massa perdida por segundo, ele ainda existirá por um tempo. Quanto? Se irradiar massa fosse o único mecanismo físico em andamento, o Sol duraria $1,99 \times 10^{30} / 4,36 \times 10^9 = 4,56 \times 10^{20}$ segundos. São praticamente $1,44 \times 10^{13}$ anos ou 144 bilhões de séculos.

O Sol está Irradiando Massa

Grande parte da energia que obtemos do Sol vem da *fusão*, a combinação do núcleo atômico em outro núcleo. O Sol está irradiando muita luz a cada segundo e, por isso, realmente está perdendo massa. Embora o Sol esteja perdendo massa quando é convertido em energia radiante, você não tem nada para se preocupar; há muito mais de onde veio.

A Velocidade da Luz é a Velocidade Máxima

Sem contar com as grandes produções, os livros *Star Trek* e outros de ficção científica, você não pode ser mais rápido que a velocidade da luz, sendo por isso que c é igual em todos os quadros de referência da inércia (veja a primeira seção deste capítulo), mesmo que a luz vista esteja vindo de um quadro de referência da inércia para você. Eis o que diz a Teoria da Relatividade sobre a energia total de um objeto:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Para um objeto em repouso, $E_{\text{repouso}} = mc^2$. Portanto, a energia cinética relativista de um objeto de massa m deve ser

$$E_c = 0 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Observe que como a velocidade do objeto fica cada vez maior, o termo acima entre parênteses fica cada vez maior, movendo-se em direção ao infinito. Assim, quando a velocidade do objeto se aproxima de c , a energia cinética do objeto se aproxima do infinito. É onde, infelizmente, a ficção científica falha. Quando a velocidade fica mais próxima de c , você fica mais perto de uma energia cinética infinita. Embora pareça impressionante para os foguetes, realmente significa que você não pode ter isso – pelo menos não de acordo com a Teoria da Relatividade.

Newton Ainda está Certo

Depois de toda a análise sobre Einstein, onde ficaram os físicos de Newton? E as boas e velhas equações para a quantidade de movimento e a energia cinética? Essas equações ainda estão certas, mas apenas em velocidades menores. Por exemplo, veja a equação relativista para a cinética (veja o Capítulo 9 para saber mais sobre a cinética):

$$p = \left(\frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

onde p é a quantidade de movimento, m é a massa e v é a velocidade. Note esta parte:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

Você vê apenas uma diferença quando começa a ficar perto da velocidade da luz – este fator muda em cerca de 1% quando você aumenta para velocidades de $4,2 \times 10^7$ metros por segundo, que teria sido bem grande para a época de Newton. Em velocidades menores, você pode negligenciar o fator relativo para obter

$$p = mv$$

Newton ficaria contente com este resultado.

E a equação para a energia cinética (ver Capítulo 8)? Eis como ela fica em termos da relatividade:

$$E_c = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

onde E_c é a energia cinética. Veja este termo:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Você pode expandir a equação usando o teorema binomial (da aula de Álgebra) assim:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1 = 1 + \frac{1v^2}{2c^2} + \frac{3}{8}\left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 + \dots$$

Quando o termo $v^2 \div c^2$ é muito menor que 1, isso se divide em

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1 + \frac{1v^2}{2c^2}$$

Colocar isso na equação para a energia cinética relativista fornecerá – adivinha? Sua antiga versão não relativista favorita (ver Capítulo 8):

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Como você pode ver, Newton não ficou atrás ao analisar a relatividade. Os mecanismos newtonianos ainda se aplicam, desde que as velocidades envolvidas sejam muito menores que a velocidade da luz, c (você começa a ver os efeitos da relatividade em cerca de 14 por cento da velocidade da luz, sendo provavelmente por isso que Isaac Newton, na época da carroça, nunca os notou).

Capítulo 22

Dez Teorias Extraordinárias da Física

.....

Neste capítulo

- ▶ Indicando a menor distância e o menor tempo
 - ▶ Sentindo-se confortável com a incerteza
 - ▶ Explorando o espaço para os fatos da Física
 - ▶ Descobrimdo a verdade sobre os fornos de micro-ondas
 - ▶ Desentendendo-se com seus comportamentos no mundo físico
-

Este capítulo fornece os dez fatos diretos da Física que você pode não ter ouvido falar em uma sala de aula. Porém, como em qualquer coisa na Física, você não deve realmente considerar esses “fatos” como reais – são apenas o estado atual de muitas teorias. E neste capítulo, algumas teorias são bem extraordinárias, portanto, não fique surpreso ao vê-las nos próximos anos.

Você Pode Medir a Menor Distância

Agora, a Física tem uma teoria de que há uma menor distância, o comprimento Planck, nomeado segundo o físico Max Planck. O comprimento é o menor no qual, teoricamente, você pode dividir o espaço. Contudo, o comprimento Planck – cerca de $1,6 \times 10^{-35}$ m ou mais ou menos 10^{20} vezes o tamanho aproximado do próton – é realmente a menor quantidade de comprimento com qualquer significância física, dada nossa compreensão atual do Universo. Quando você mede menos que esse comprimento, precisa da Física Quântica e isso significa que qualquer medida precisa é impossível. Portanto, o comprimento Planck é o menor comprimento que faz sentido físico com nossa visão atual da Física.



O comprimento Planck é realmente a menor distância possível?

Muitos estudiosos têm afirmado que o comprimento Planck é onde o espaço divide-se e que você não pode conseguir nenhuma distância menor. Isso é verdade? Basicamente, o comprimento Planck estabelece que, quando você consegue distâncias menores, assumem efeitos quânticos. Tais efeitos não são suscetíveis à medida, apenas previsões com base na probabilidade. Portanto, o comprimento Planck é

realmente o menor comprimento possível? Ou os físicos estão tentando impor regras no Universo só porque não sabem como as forças funcionam nessas pequenas distâncias? Em outras palavras — o comprimento Planck é a menor distância possível que podemos *explicar* ou é a menor distância possível que pode *existir*? Talvez, você possa encontrar a resposta em suas explorações da Física.

Pode Haver um Tempo Menor

No mesmo sentido que o comprimento Planck é a menor distância (veja a seção anterior), o tempo Planck é a menor quantidade de tempo. O *tempo Planck* é o tempo que leva para a luz viajar 1 Planck de comprimento ou $1,6 \times 10^{-35}$ m. Se a velocidade da luz for a velocidade mais rápida possível, você poderá facilmente justificar que o menor tempo que você pode medir é o comprimento Planck dividido pela velocidade da luz. O comprimento Planck é muito pequeno e a velocidade da luz é muito rápida, fornecendo um tempo muito, muito curto para o tempo Planck:

$$\text{Tempo Planck} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m} / (3,0 \times 10^8 \text{ m/s}) = 5,3 \times 10^{-44} \text{ segundos}$$

O tempo Planck tem cerca de $5,3 \times 10^{-44}$ segundos e os tempos menores que isso não têm um significado real como os físicos compreendem as leis da Física no momento.



Algumas pessoas dizem que o tempo é dividido em quantidade de tempo, chamados *chronons*, e que cada chronon tem um tempo Planck de duração.

Heisenberg diz que você pode não estar certo

Você pode ter ouvido falar do princípio da incerteza, mas pode não saber que um físico chamado Heisenberg o sugeriu pela primeira vez. Naturalmente, isso explica por que é chamado de *Princípio*

da *Incerteza de Heisenberg*, acho. O princípio vem da natureza ondulatória da matéria, como sugerido por Louis de Broglie. A matéria é composta de partículas, como, por exemplo, elétrons. Mas as pequenas partículas também agem como ondas quando viajam em velocidades rápidas, muito parecido com as ondas de luz. (Puxa, você está aprofundando-se aqui.)

Como as partículas em movimento agem como se fossem compostas de ondas, quanto mais precisamente você mede sua cinética, menos precisamente sabe onde elas estão. Você também pode dizer que quanto mais precisamente mede seus locais, menos precisamente sabe seus locais.

Os Buracos Negros Não Deixam a Luz Sair

Os buracos negros são criados quando estrelas particularmente grandes usam seu próprio combustível e destroem para formar objetos superdensos, muito menores que as estrelas originais. Apenas estrelas muito grandes acabam como buracos negros. As estrelas menores não se destroem tanto; elas geralmente acabam como estrelas de nêutron. Uma *estrela de nêutron* ocorre quando todos os elétrons, prótons e nêutrons foram espremidos pela gravidade, criando, de fato, uma única massa de nêutrons na densidade de um núcleo atômico.

Os buracos negros vão além disso. Eles se destroem a ponto de nem mesmo a *luz* poder escapar de sua atração gravitacional intensa. Como assim? Os fótons que compõem a luz não devem ter nenhuma massa. Como eles podem ficar presos, possivelmente, em um buraco negro?

Os fótons são, afetados pela gravidade, previsto pela Teoria Geral da Relatividade de Einstein (muito mais trabalhosa do que a Teoria da Relatividade [ver Capítulo 21] e que levou oito anos para Einstein completar). Testes confirmaram experimentalmente que a luz, que passa próximo de objetos pesados no Universo, é inclinada por seus campos gravitacionais. A gravidade afeta os fótons e a atração gravitacional de um buraco negro é tão forte que eles não conseguem escapar.

A Gravidade Curva o Espaço

Isaac Newton deu aos físicos uma ótima teoria da gravitação e dela vem a famosa equação

$$F = Gm_1m_2 / r^2$$

onde F representa a força, G representa a constante gravitacional universal, m_1 representa uma massa, m_2 representa a outra massa e r representa a distância entre as massas. Newton foi capaz de mostrar que o que fez uma maçã cair também fez os planetas orbitarem. Mas, Newton teve um problema que ele nunca poderia descobrir: como a gravidade pode operar instantaneamente em uma distância.

Entra Einstein, que criou a receita moderna para este problema. Ao invés de pensar em termos de gravidade sendo uma força simples, Einstein sugeriu em sua Teoria Geral da Relatividade que a gravidade realmente *curva* o espaço. Em outras palavras, a gravidade é uma das influências que realmente definem o que consideramos como “espaço”.



A ideia de Einstein é que a gravidade curva o espaço (e basicamente, é de onde vêm a ideia dos buracos no espaço). Na verdade, para ser mais verdadeiro com a Teoria Geral da Relatividade, deve-se dizer que a gravidade curva o espaço e o tempo. Matematicamente, você trata o tempo como a quarta dimensão ao trabalhar com a relatividade – não como uma quarta dimensão espacial. Os vetores (ver Capítulo 4) que você usa têm quatro componentes: três para os eixos X, Y e Z e um para o tempo, t .

O que realmente está acontecendo quando um planeta orbita o Sol é que ele simplesmente está seguindo o caminho mais curto através do espaço-tempo percorrido. O Sol curva o espaço-tempo à sua volta e os planetas seguem essa curvatura.

A Matéria e a Antimatéria Destroem-se

Uma das coisas mais legais sobre a Física de alta energia, também chamada de Física da Partícula, é a descoberta da antimatéria. A *antimatéria* (ver Capítulo 21) é um tipo de inverso da matéria. Os correspondentes dos elétrons são chamados de pósitrons (carregados positivamente) e os correspondentes dos prótons são os antiprótons (carregados negativamente). Até os nêutrons têm uma antipartícula: antinêutrons.

Em termos físicos, a matéria está, mais ou menos, no lado positivo e a antimatéria está, mais ou menos, no lado negativo. Quando as duas se juntam, destroem-se, deixando energia pura – ondas de luz de grande energia, chamadas de *ondas gama*. E como qualquer outra energia radiante, as ondas gama têm energia térmica, portanto, se uma libra de matéria e uma libra de antimatéria se juntarem, você terá um estrondo.

Como analisei no Capítulo 21, esse estrondo, libra por libra, é muito mais forte que uma bomba atômica padrão, onde apenas 0,7% do material físsil é transformado em energia. Quando a matéria atinge a antimatéria, 100% são transformados em energia.



Se a antimatéria é o oposto da matéria, o Universo não deveria ter tanta antimatéria quanto matéria? Este assunto é um enigma. Onde está toda a antimatéria? O júri ainda não chegou a um acordo. Alguns cientistas dizem que poderia haver quantidades vastas de antimatéria por aí, que as pessoas simplesmente não sabem. Nuvens imensas de antimatéria podem estar espalhadas pela galáxia, por exemplo. Outros dizem que o Universo trata a matéria e a antimatéria de formas diferentes – mas diferente o suficiente para a matéria, que conhecemos no Universo, sobreviver.

As Supernovas são as Explosões mais Poderosas

Qual é a ação mais energética que pode ocorrer em qualquer lugar, no Universo inteiro? Qual evento libera a maior energia? Qual é o campeão de todos os tempos em relação às explosões? Sua vizinha supernova não tão amistosa. Uma *supernova* ocorre quando uma estrela explode. O combustível da estrela esgota-se e sua estrutura não é mais suportada por uma liberação interna de energia. Nesse ponto, ela entra em colapso. Mas não é qualquer estrela que pode ser uma supernova. Normalmente, se uma estrela explode, ela cria uma nova. Mas nesse ínterim, uma estrela é uma supernova, criando uma explosão de estrelas praticamente inimaginável. Entre as 100 bilhões de estrelas em nossa galáxia, por exemplo, a última supernova conhecida ocorreu praticamente há 400 anos. (Digo conhecida porque a luz leva um tempo para alcançar a Terra; uma estrela poderia ter sido uma supernova há 100 anos, mas se estiver muito distante da Terra, não saberemos ainda.)

A maioria das estrelas, que são uma supernova, explode em velocidades com cerca de 10.000.000 metros por segundo ou mais ou menos 22.300.000 mph. Em comparação, até o maior dos explosivos na Terra detona com velocidades de 1.000 a 10.000 metros por segundo.

O Universo Começa com o Big Bang e Termina com o Ghab Gib

Muitos físicos acreditam que o Universo iniciou, fisicamente falando, com o Big Bang. A ideia é que o mundo físico começou em um local com uma explosão inimaginavelmente enorme, cerca de 13,7 bilhões de anos atrás. Os físicos têm teorizado sobre o que ocorreu depois do Big Bang, mas não é tão fácil teorizar sobre o que aconteceu antes. Na verdade, você pode apenas voltar a um tempo Planck depois do Big Bang (veja a seção “Pode haver um tempo menor” anteriormente neste capítulo para saber mais sobre o tempo Planck), pois, em tempos menores que isso, as teorias padrões da Física, inclusive a Teoria Geral da Relatividade de Einstein, falham.

Os Fornos de Micro-ondas são Física Quente

Você pode encontrar muita Física acontecendo nos micro-ondas – itens diários que certamente existiram em sua vida anterior à Física. O que realmente acontece em um forno de microondas? Um dispositivo chamado *magnétron* gera ondas de luz na parte do

espectro de luz, chamado micro-ondas, e o comprimento de sua onda está próximo do tamanho das moléculas de água.

Quando as micro-ondas atingem as moléculas de água na comida, elas as *polarizam*. Em outras palavras, o campo elétrico na luz alterna para a frente e para trás e as micro-ondas têm, praticamente, o comprimento da onda e a frequência certos para carregar a molécula de água e fazê-la oscilar como louca. Quando a oscilação cria calor através do atrito, as oscilações das moléculas de água estão aquecendo sua comida. (Para ter mais informações sobre os campos elétricos, veja o Capítulo 16.)



Os fornos de micro-ondas foram inventados por acaso, nos primeiros dias do radar. Um homem chamado Percy Spencer colocou sua barra de chocolate no lugar errado – perto de um magnétron usado para criar ondas de radar – e ele derreteu. “Aha”, pensou Percy. “Isto pode ser útil”. E antes que ele soubesse, tinha inventado não só os fornos de micro-ondas, como também a pipoca de micro-ondas (sem brincadeiras).

Os Físicos podem Não ter Medidas Absolutas Físicas

Talvez, a “descoberta” mais profunda da Física seja que ela não encontrou nenhuma medida absoluta física verdadeira.

Há muito tempo, as pessoas viam tudo em termos absolutos. O espaço era fixo. O Sol e as estrelas giravam em torno da Terra. A luz viajava através do éter aluminífero, estático. Porém, o estudo da Física pôs fim a todas essas crenças, depois de muitos anos de observação. Nenhum quadro fixo de referência foi encontrado. Nenhum éter aluminífero também. Nem mesmo um quadro de tempo fixo. Todas as medidas feitas são em relação a alguma medida ou quadro de referência da inércia que você mesmo define.

Embora a ausência de prova não seja uma prova de ausência, o fato é que os físicos não encontraram nenhum valor absoluto físico que pudesse ser a contribuição mais importante que a Física fez para nossa compreensão do Universo. Talvez, basicamente, a lição da Física seja que fazemos parte do Universo, que não precisa de valores absolutos físicos externos e medidas físicas absolutas para se orientar. Você decide suas próprias medidas. E neste sentido, você está em casa, fazendo parte do nosso Universo.

Glossário

Este é um glossário dos termos físicos comuns encontrados neste livro:

aceleração angular: A taxa de mudança da velocidade angular por segundo, expressada como um vetor.

aceleração centrípeta: A aceleração de um objeto, direcionada ao centro do círculo, necessária para manter esse objeto em movimento circular.

aceleração: A taxa da mudança de velocidade por segundo, expressada como um vetor.

adiabático: Sem liberar calor para, absorver calor do, ambiente.

ampère: A unidade MKS de medida da corrente – em Coulomb por segundo.

atrito cinético: O atrito que resiste ao movimento de um objeto que já está em movimento.

atrito estático: O atrito em um objeto que resiste ao seu movimento.

calor latente: O calor necessário para fazer uma mudança de fase por quilograma.

campo elétrico: A força em uma carga de teste positiva por Coulomb devido a outras cargas elétricas.

campo magnético: A força de uma carga de teste positiva em movimento, por Coulomb, a partir de ímãs ou cargas em movimento.

capacidade térmica específica: A capacidade térmica de um material por quilograma.

capacidade térmica: A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um objeto em um grau.

capacitância: Quanta carga um capacitor pode armazenar por volt.

capacitor: Um componente elétrico que armazena carga.

cinemática: O ramo da mecânica preocupado com o movimento, sem referência à força ou à massa.

circuito RC: Um circuito elétrico que contém um resistor (ou resistores) e um capacitor (ou capacitores).

colisão elástica: Uma colisão onde a energia cinética é conservada.

colisão inelástica: Uma colisão na qual a energia cinética não é conservada.

condução: A transmissão do calor ou da eletricidade através de um material.

condutividade térmica: Propriedade de uma substância que mostra como o calor passa por ela.

conservação de energia: A lei da Física que diz que a energia de um sistema fechado não muda, a menos que as influências externas atuem no sistema.

constante de Boltzmann: Uma constante termodinâmica com o valor de $1,38 \times 10^{-23}$ Joules por Kelvin.

convecção: Um mecanismo para transportar calor através do movimento de um gás ou líquido aquecido.

corpo negro: Um corpo que absorve toda a radiação e a irradia.

corrente alternada: Corrente elétrica que muda a direção do fluxo periodicamente, com o tempo.

corrente direta: O tipo de corrente elétrica que se move em uma direção, como, por exemplo, uma corrente induzida por uma bateria.

corrente: A medida da carga elétrica fluindo por segundo.

Coulomb: A unidade MKS da carga.

densidade: Uma quantidade dividida por um comprimento, área ou volume, como, por exemplo, massa por comprimento, massa por volume, carga por área ou carga por volume.

deslocamento angular: O ângulo entre as posições angulares inicial e final depois de um tempo especificado.

deslocamento: A mudança na posição de um objeto.

diagrama do raio: Um desenho que mostra como os raios de luz viajam através de lentes ou espelhos.

emissividade: Propriedade de uma substância que mostra como ela é bem irradiada.

energia cinética: A energia de um objeto devido ao seu movimento.

energia potencial: A energia de um objeto por causa de sua posição quando uma força está atuando nele ou em sua configuração interna.

energia: A capacidade de um sistema de fazer trabalho.

escalar: Um número simples (sem a direção que tem o vetor).

espelho côncavo: Um espelho que tem uma superfície curva para dentro.

espelho convexo: Um espelho que tem uma superfície curva para fora.

expansão térmica: A expansão de um material quando ele fica mais quente.

faraday: A unidade MKS de capacitância.

força centrípeta: A força, direcionada para o centro do círculo, que mantém um objeto em movimento circular.

força eletromotriz: Em um circuito, a diferença potencial que faz as cargas fluírem.

força normal: A força que uma superfície aplica em um objeto, na direção perpendicular a essa superfície.

força: A taxa de mudança na energia de um sistema.

fóton: Um quantum da radiação eletromagnética. Uma partícula elementar que é sua própria antipartícula.

frequência: O número de ciclos de uma ocorrência periódica por segundo.

grandeza: O tamanho ou o comprimento associado a um vetor (os vetores são compostos de uma direção e uma grandeza).

henry: A unidade MKS de medida da indutância.

hertz: A unidade MKS de medida da frequência – um ciclo por segundo.

imagem real: Uma imagem que você pode ver em uma tela física.

imagem virtual: Uma imagem aparente que não é real – não pode aparecer em uma tela física.

impulso: O produto da quantidade de força em um objeto e o tempo durante o qual a força é aplicada.

índice da refração: Medida da velocidade da luz em um vácuo dividida pela velocidade da luz na substância.

inércia rotacional: O momento de inércia de um objeto.

isobárico: Com pressão constante.

isocórico: Com volume constante.

isotérmico: Com temperatura constante.

Joule: A unidade MKS da energia – um Newton-metro.

Kelvin: A unidade MKS da temperatura, começando no zero absoluto.

lei de conservação da quantidade de movimento: Uma lei que estabelece que a cinética de um sistema não muda, a menos que externamente influenciada.

lente convergente: Uma lente que reúne os raios de luz.

lente divergente: Uma lente que faz os raios de luz se separarem.

massa: A propriedade que faz a matéria resistir à aceleração.

momento da inércia: A propriedade da matéria que a faz resistir à aceleração rotacional.

movimento harmônico simples: O movimento repetitivo onde a força de restauração é proporcional ao deslocamento.

Newton: A unidade MKS da força - um quilograma-metro por segundo².

Número de Avogadro: O número de itens em um mol, $6,022 \times 10^{23}$.

ohm: A unidade MKS da resistência elétrica.

oscilar: Mover ou mudar lado a lado regularmente.

pascal: A unidade MKS da pressão – 1 Newton por metro².

período: O tempo que leva para um ciclo completo de um evento que se repete.

peso: A força exercida em uma massa por um campo gravitacional.

polarizar: Causar vibração com padrão definido.

potencial eletrostático: A energia por carga positiva necessária para mover uma carga de um ponto para outro.

pressão padrão: Uma atmosfera – $1,0 \times 10^5$ Pascals.

pressão: A força aplicada em um objeto dividida pela área sobre a qual a força atua.

princípio da incerteza: Um princípio que diz que é impossível saber a quantidade de movimento e a posição de um objeto, simultaneamente.

quadro de inércia: Um quadro de referência que não está sofrendo uma aceleração.

quantidade de movimento linear: O produto da massa vezes a velocidade, um vetor.

quantidade de movimento: É o produto da distância que o objeto está em determinado ponto e sua quantidade de movimento, medida em relação ao ponto.

quilograma: A unidade MKS de massa.

radiação: Um mecanismo físico que transporta calor e energia como ondas eletromagnéticas.

radianos: A unidade MKS do ângulo – 2π radianos em um círculo.

refração: O processo que ocorre quando a luz cruza o limite entre duas substâncias e inclina-se.

relatividade especial: A teoria de Albert Einstein que dá explicações para o comportamento dos objetos próximos da velocidade da luz, como, por exemplo, a dilatação do tempo e a contração do comprimento.

resistência: A proporção da voltagem para a corrente de um elemento em um circuito elétrico.

resistor: Um elemento em um circuito elétrico que resiste à passagem da corrente.

resultante: Uma soma vetorial.

série: Os elementos organizados de modo que a corrente que flui através de um, também flui através do outro.

sistema CGS: O sistema de medida que usa centímetros, gramas e segundos.

sistema FPS: O sistema de medida que usa pés, libras e segundos.

sistema MKS: O sistema de medida que usa metros, quilogramas e segundos.

solenóide: Uma bobina com fios.

termodinâmica: A seção da Física que trata do calor e da matéria.

torque: Uma força, em volta de um ponto crítico, multiplicada pela distância até esse ponto crítico.

trabalho: A força multiplicada pela distância sobre a qual essa força atua.

velocidade angular: A taxa de mudança do deslocamento angular por segundo.

velocidade: A taxa de mudança da posição de um objeto, expressada como vetor cuja grandeza é a velocidade.

vetor: Uma construção matemática que tem uma grandeza e uma direção.

volt: A unidade MKS do potencial eletrostático – um Joule por Coulomb.

voltagem alternada: Potencial elétrico que muda a polaridade periodicamente, com o tempo.

volume padrão: Definido como 22,4 litros.

Índice Remissivo

• A •

- Absorvendo a energia à sua volta 9
- Aceleração 33
 - Aceleração média e instantânea 36
 - Aceleração positiva e negativa 35
 - Aceleração uniforme e não uniforme 37
 - Definindo aceleração 33
 - Determinando as unidades da aceleração 33
- aceleração média 36, 140
- acelerações média e instantânea 36
- Acertando as contas: Energia cinética 123
- ampères 272
- análogos 153
- ângulo 49
- ângulo de incidência 323
- ângulo de reflexão 323
- antimatéria 345, 352
- Aplicando vetores na rotação 158
 - Calculando a velocidade angular 158
 - Descobrimo a aceleração angular 159
- atividade impulsiva 142
- Atração 287–361
- atrito cinético 88
- Aumentando a potência 135
- Aumentando a velocidade 33
- Aumentando o Calor com a Termodinâmica 207

• B •

- Balançando com os pêndulos 203
- Batendo em uma massa mais leve 150
- bateria 271
- baterias 272
- Big Bang 353
- buracos negros 4
- buracos negros não deixam a luz sair 351

• C •

- Calculando a energia cinética em um gás ideal 233
- Calculando a energia cinética utilizando a força resultante 127
- Calculando o atrito e a força normal 86
- Cálculos alternativos da potência 136
- campo gravitacional 9
- Campos elétricos 258
 - Campos elétricos em capacitores de placa paralela 261
- centripetamente 103
- Cinética Angular 153–361, 185
- circuito elétrico com as Regras de Kirchoff 278
- Implementando a regra do circuito fechado 279

- Usando circuitos com diversos circuitos fechados 280
 - Circuitos em série 275
 - Circuitos paralelos 276
 - Circuitos RCL 321
 - Colidindo em duas dimensões 151
 - Colidindo em uma linha 149
 - Colisões elásticas e inelásticas 148
 - Colisões inelásticas 149
 - Colocando a equação da energia cinética em uso 126
 - Colocando Alguma Luz Sobre Espelhos e Lentes 323–361
 - Quando a luz fica inclinada 324
 - Colocando números nos vetores 47
 - Compreendendo os atritos estático e cinético 87
 - Compreendendo os braços da alavanca 163
 - Conquistando o coeficiente do atrito 86
 - Conquistando vetores 43
 - Pedindo direções: Fundamentos do vetor 44
 - Reunindo as direções: Adicionando vetores 45
 - Separando a distância: Subtraindo vetores 46
 - Conseguindo um campo magnético uniforme com solenóides 302
 - conservação da energia mecânica 132
 - Conservando a quantidade de movimento 143
 - Considerando o trabalho negativo 122
 - constante Stefan-Boltzmann 227
 - Contraindo com lentes divergentes 337
 - Controlando a energia cinética rotacional 182
 - Controlando moléculas do gás ideal 232
 - Convertendo energia potencial em energia cinética 130
 - convertendo entre as unidades 17
- D •
- Decompondo a energia no movimento harmônico simples 202
 - Descobrimo a Carga da Eletricidade e do Magnetismo 251–361
 - Descobrimo a indutância 312
 - Descobrimo ângulos do modo fácil 83
 - componente de Fg 83
 - Encontrando a velocidade em uma rampa 84
 - Descobrimo as capacidades do calor específico 245
 - Descobrimo o torque gerado 164
 - Deslizando no arco-íris da gravidade 57
 - Deslocamento, velocidade e aceleração 106
 - Determinando a altura final com a energia mecânica 134
 - Determinando a velocidade final com a energia mecânica 134
 - Determinando como a gravidade 94
 - Atirando um objeto em ângulo 96
 - Descendo: Decompondo o tempo total 95
 - Flutuando no ar: Hora da suspensão 95
 - Subindo: Altura máxima 94

- Determinando o centro nos circuitos fechados da corrente 300
- Dez Critérios Surpreendentes sobre a Relatividade 341
- A natureza não tem favoritos 341
- comprimento se contrai em altas velocidades 344
- equivalência da matéria e da energia 345
- Matéria mais antimatéria é igual a boom 345
- Newton ainda está certo 347
- Sol está irradiando massa 346
- tempo se dilata em altas velocidades 343
- velocidade da luz é a velocidade máxima 346
- velocidade da luz é constante, não importa a velocidade 342
- viagem espacial envelhece menos você 343
- Dinâmica Rotacional 173–361
- Dissecando o deslocamento 26
- Dividindo a equação da energia cinética 125
- Dividindo vetores em componentes 49
- Encontrando grandezas e ângulos dados os componentes do vetor 51
- Encontrando os componentes do vetor dados as grandezas e os ângulos 49
- Dominando os capacitores em circuitos paralelos e em série 283
- Capacitores nos circuitos em série 284
- Capacitores nos circuitos paralelos 283
- **E** •
- Elétrons com Circuitos 271–361
- Corrente 271
- Calculando a corrente nas baterias 272
- Definindo a corrente 272
- Empurrando e puxando correntes 295
- Forças nas correntes 295
- Torques nas correntes 296
- Encontrando a aceleração centrípeta 156
- Encontrando a aceleração tangencial 156
- Encontrando a velocidade tangencial 154
- Encontrando o impulso e a quantidade de movimento 141
- energia cinética 233
- Energia no declive: Energia potencial 128
- energia potencial 9
- Entrando na água quente 208
- Quando o termômetro informa Celsius 208
- Quando o termômetro informa Fahrenheit 208
- Quando o termômetro informa Kelvin 209
- Equilíbrio rotacional 166
- Escolha seu caminho: Forças conservativas *versus* não conservativas 131
- Estimando a precisão 22
- éter alumínio 354
- Examinando a água em profundezas aparentes 325
- Examinando circuitos de corrente alternada 313
- Examinando eixos 27

Examinando os momentos de inércia 176
exercício de velocidade 57
Expansão linear 210
 Desconstruindo a expansão linear 212
 Expansão do volume 213
 Trabalhando nos trilhos 212
Explorando a Necessidade de Velocidade 25–361

• F •

Fahrenheit 207–361
Faraday 260
Fazendo conversões Kelvin 210
Força centrípeta através de rotações 104
Forjando a Lei do Gás Ideal 229
frequência 295, 305
Frequência Eletromagnética 305
Fundamentos da Física 13

• G •

Ganhando um Equilíbrio Térmico 235
gás 216
gravidade curva o espaço 351

• H •

hardware 200
Heisenberg 350
Henries 312
Hertz 197
Hora da suspensão 95

• I •

Identificando o campo magnético a partir de um fio 298

imagem virtual 327, 331
Inclinação vertical 82
Induzindo a FEM (Frequência Eletromagnética) 305
Induzindo a voltagem em certa área 307
Introduzindo o atrito no equilíbrio rotacional 168

• J •

Joules 227, 233

• L •

Lei da Gravitação de Newton 108
 Calculando a velocidade de um satélite 110
 Calculando o período de tempo de um satélite 112
 Derivando a força da gravidade na superfície da Terra 109
 Usando a lei da gravitação para examinar as órbitas circulares 110
Lei da Reflexão 323
Lei de Boyle 231
Lei de Charles 231
Lei de Faraday 308
Lei de Hooke 189
 Deduzindo que a lei de Hooke é uma força de restauração 191
 Encontrando a frequência angular de uma massa em uma mola 200
 Examinando os movimentos harmônicos simples horizontal e vertical 192
 Incluindo a aceleração 199
 Mantendo as molas esticadas 190

- Mergulhando mais no movimento harmônico simples 193
- Movendo-se com o movimento harmônico simples 191
- Lei de Newton no movimento angular 173
- Lei de Ohm 273
- Determinando o fluxo da corrente 273
- Examinando a resistividade 274
- lei de radiação Stefan-Boltzmann: 227
- Lei do Movimento de Newton 64
- Continuando: Inércia e massa 65
- Medindo a massa 65
- Leis da Termodinâmica 205–361, 235–361
- adiabático 238
- Calculando a conservação 237
- Conservando Calor e Energia 236
- Equilíbrio Térmico 235
- isocórico 238
- isotérmico 238
- processos isobárico 238
- Lendo o velocímetro 30
- Lidando com a gravidade 81–361
- Lidando com cargas e ímãs 10
- M •**
- Magnetismo 287
- afetam as partículas carregadas em movimento 293
- campos magnéticos não trabalham 292
- Descobrimo o tamanho quantitativo das forças magnéticas 290
- Encontrando a origem da atração 288
- Forçando uma carga em movimento 289
- Partículas carregadas nos campos magnéticos 292
- magnétron 354
- Mantendo a Corrente com a Voltagem 305–361
- mantenha as unidades físicas corretas 16
- massa atômica 228
- massa molecular 229
- matéria e a antimatéria destroem-se 352
- Medindo a velocidade 28
- Medindo a velocidade com a conservação da quantidade de movimento 145
- Medindo a velocidade de fogo com a conservação da quantidade de movimento 146
- Medindo o mundo à sua volta e fazendo previsões 15
- medir uma distância 349
- Molas 189
- Monte Newton 131
- Movendo com a Eletricidade Estática 253
- Cargas de elétron e próton 253
- Forças elétricas 254
- Reunindo objetos 255
- Movendo um condutor em um campo magnético para causar a voltagem 306
- Movimento circular uniforme 100
- Movimento circular vertical 113
- Movimento Harmônico Simples 189
- movimento linear ao rotacional 153
- movimento não uniforme 30

Movimentos Circulares e Órbitas 99
Controlando a velocidade com a aceleração centrípeta 101
Encontrando a grandeza da aceleração centrípeta 102
Ficando no curso: Movimento circular uniforme 100
Mudando a direção: Aceleração centrípeta 101
Puxando em direção ao centro: Força centrípeta 102
Mudanças de fases 216

• O •

Observando objetos em movimento 8
Obtendo os sinais certos com a Lei de Lenz 310
ondas gama 352
Opondo velocidade média versus movimento uniforme 31
oscilação permitida 166

• P •

Particularidades da velocidade 29
physika 7
plano inclinado 82
Potencial elétrico 262
Calculando a energia potencial elétrica 263
Descobrimo que o potencial elétrico é conservado 265
Encontrando o potencial elétrico das cargas pontuais 266
Ficando totalmente carregado com a capacitância 269
Percebendo o potencial na voltagem 264
Preparando-se para o extraordinário, Física extraordinária chegando 11

Prevendo a velocidade da molécula de ar 232
Princípio da Incerteza de Heisenberg 350

• Q •

Quebrando o gelo com as mudanças de fase 217
Quebrando o número de Avogadro 228

• R •

radiação 224, 225, 226
Refratando a luz com a Lei de Snell 324
Relacionando aceleração, tempo e deslocamento 37
Relacionando impulso e cinética 140
Relacionando velocidade, aceleração e deslocamento 40
Reunindo a Quantidade de Movimento 139
Reunindo resistores e capacitores 285
Circuitos RC 285
Revelando as identidades dos vetores 53
Revisando a conservação da cinética angular 186

• S •

Sabendo quais dígitos são significantes 21
Segunda Lei da Termodinâmica 246
Carnot diz que não se pode ter tudo 248
eficiência das máquinas térmicas 247

Máquinas térmicas 246
 Segunda Lei do Movimento de
 Newton 66
 Nomeando as unidades da força 67
 Reunindo as forças resultantes 67
 Sentindo-se quente, mas
 não incomodado 10
 separação Fahrenheit 208
 supernovas são as explosões
 mais poderosas 353

• T •

Teorema do impulso-quantidade
 de movimento 140
 Terceira (e a Última Absoluta)
 Lei da termodinâmica 250
 Terceira Lei do Movimento 72
 Analisando os ângulos e a força
 na terceira lei de Newton 75
 A tensão não deve causar torci-
 colos 73
 Encontrando o equilíbrio 77
 termodinâmica 229
 Todos os espelhos e nenhuma
 fumaça 327
 Torcendo e gritando 160
 Trabalhando com a aceleração 84
 Trabalhando contra a gravidade
 129
 Trabalhando nos sistemas de
 medida 120
 Trabalhado com o atrito para
 cima 89
 Descobrimo a distância percor-
 rida 92
 Descobrimo o peso do compo-
 nente 90
 Determinando a força do atrito 90
 Objeto solto: Calculando a que
 distância ele deslizará 91

Transferência de Calor em Sólidos e Gases 219
 Aplicando a equação do calor
 transferido pela condução
 223
 Condução 220
 Convecção 219
 Emitindo e absorvendo luz: Ra-
 diação 224
 Examinando as propriedades
 que afetam a condução 221
 trigonometria 23

• U •

unidade atômica 228
 Unidades de medida no sistema
 CGS 15
 bária 15
 biot 15
 centímetro 15
 dina 15
 erg 15
 franklin 15
 gauss 15
 grama 15
 segundo 15
 Unidades de medida no sistema
 MKS 16
 ampère 16
 Coulomb 16
 Joule 16
 metro 16
 Newton 16
 Pascal 16
 quilograma 16
 segundo 16
 Tesla 16
 Universo começa com o Big
 Bang e termina com o
 Gnab Gib 353
 usando a notação científica 20

• *V* •

velocidade instantânea 30
velocidade média 31
velocidade uniforme 30
Vendo claramente com lentes 333
Verificando a precisão das medi-
das 21
vetores 2, 43, 43–361, 44, 45, 46
virtual 329, 332, 333
Voltagem 275

• *W* •

watts 227