HALLIDAY • RESNICK

Volume 1

Mecânica

Fundamentos de Física

8ª Edição

LTC

Jearl Walker

Fórmulas Matemáticas*

Equação do Segundo Grau

$$\text{Se } ax^2 + bx + c = 0,\ x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Teorema Binomial

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \cdots \qquad (x^2 < 1)$$

Produtos de Vetores

Seja θ o menor dos dois ângulos entre $\vec{a}$ e $\vec{b}$. Nesse caso,

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = ab\cos\theta$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = -\vec{b} \times \vec{a} = \begin{vmatrix} \hat{\mathrm{i}} & \hat{\mathrm{j}} & \hat{\mathrm{k}} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

$$= \hat{\mathrm{i}}\begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} - \hat{\mathrm{j}}\begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} + \hat{\mathrm{k}}\begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix}$$

$$= (a_y b_z - b_y a_z)\hat{\mathrm{i}} + (a_z b_x - b_z a_x)\hat{\mathrm{j}} + (a_x b_y - b_x a_y)\hat{\mathrm{k}}$$

$$|\vec{a} \times \vec{b}| = ab \operatorname{sen}\theta$$

Identidades Trigonométricas

$$\operatorname{sen}\alpha \pm \operatorname{sen}\beta = 2\operatorname{sen}\tfrac{1}{2}(\alpha \pm \beta)\cos\tfrac{1}{2}(\alpha \mp \beta)$$

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\tfrac{1}{2}(\alpha + \beta)\cos\tfrac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

Derivadas e Integrais

$$\frac{d}{dx}\operatorname{sen} x = \cos x \qquad \int \operatorname{sen} x\,dx = -\cos x$$

$$\frac{d}{dx}\cos x = -\operatorname{sen} x \qquad \int \cos x\,dx = \operatorname{sen} x$$

$$\frac{d}{dx}e^x = e^x \qquad \int e^x\,dx = e^x$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln(x + \sqrt{x^2 + a^2})$$

$$\int \frac{x\,dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = -\frac{1}{(x^2 + a^2)^{1/2}}$$

$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{x}{a^2(x^2 + a^2)^{1/2}}$$

Regra de Cramer

Um sistema de duas equações com duas incógnitas x e y,

$$a_1 x + b_1 y = c_1 \quad \text{e} \quad a_2 x + b_2 y = c_2,$$

tem como soluções

$$x = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}$$

e

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}.$$

*Uma lista mais completa está no Apêndice E.

Prefixos do SI

Fator	Prefixo	Símbolo	Fator	Prefixo	Símbolo
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	mili	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^{9}	giga	G	10^{-12}	pico	P
10^{6}	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^{3}	quilo	k	10^{-18}	atto	a
10^{2}	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^{1}	deca	da	10^{-24}	yocto	y

Fundamentos de Física

8E

VOLUME 1

MECÂNICA

abdr
Respeite o direito autoral

Duzentos anos de tradição produzindo, publicando e comercializando livros. Este é o valor da marca Wiley que, desde sua fundação, em 1807, acompanha as mudanças políticas, sociais e econômicas ocorridas em todo o mundo.

Renomada pela divulgação das mais recentes teorias e técnicas acadêmicas nas áreas científica, tecnológica e de engenharia, a editora norte-americana promove, assim, o intercâmbio e o debate globais.

A tradicional parceria da LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional, com a John Wiley & Sons, Inc., responde, em parte, por esse sucesso no Brasil, uma vez que traz para o mercado conceitos técnico-científicos de ponta essenciais para a formação das futuras gerações de profissionais e pesquisadores.

HALLIDAY/RESNICK

Fundamentos de Física

8E

VOLUME 1

Jearl Walker

Cleveland State University

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
BIBLIOTECA
CAMPUS DE SOROCABA

90008385

Tradução e Revisão Técnica

Ronaldo Sérgio de Biasi, Ph.D.
Professor Titular do Instituto Militar de Engenharia — IME

Contra capa arrancada

gen | LTC

Data 22/06/2009
Proc. CP-002/09
Emp.
Liv. Edite
R$ 400,30 (6 ex.)
N F 3880
Solic. BSa

Clas. 3540
Cutt. H188f 8
e. 4
Tombo 90008385

Os autores e a editora empenharam-se para citar adequadamente e dar o devido crédito a todos os detentores dos direitos autorais de qualquer material utilizado neste livro, dispondo-se a possíveis acertos caso, inadvertidamente, a identificação de algum deles tenha sido omitida.

Não é responsabilidade da editora nem dos autores eventuais danos ou perdas a pessoas ou bens que tenham origem no uso desta publicação.

FUNDAMENTALS OF PHYSICS Eighth Edition Volume 1
Copyright © 2008 John Wiley & Sons, Inc.
All Rights Reserved. This translation published under license.

Direitos exclusivos para a língua portuguesa
Copyright © 2009 by
LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
Uma editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional

Reservados todos os direitos. É proibida a duplicação ou reprodução deste volume, no todo ou em parte, sob quaisquer formas ou por quaisquer meios (eletrônico, mecânico, gravação, fotocópia, distribuição na internet ou outros), sem permissão expressa da Editora.

Travessa do Ouvidor, 11
Rio de Janeiro, RJ — CEP 20040-040
Tel.: 21-3970-9480
Fax: 21-2221-3202
ltc@grupogen.com.br
www.ltceditora.com.br

Cover Designer: Norm Christiansen
Cover Image: ©Eric Heller/Photo Researchers
Usada com permissão de John Wiley & Sons, Inc.

Editoração Eletrônica: REDBSTYLE

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO-NA-FONTE
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ.

H691f
8.ed.

Halliday, David, 1916-
Fundamentos de física, volume 1 : mecânica / David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker ; tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. - 8.ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2008.

Tradução de: Fundamentals of physics, 8th ed.
Inclui índice
ISBN 978-85-216-1605-4

1. Mecânica. 2. Física. I. Resnick, Robert, 1923-. II. Walker, Jearl, 1945-. III. Título.

08-3551.   CDD: 531
                        CDU: 531

Sumário Geral

Volume 1

Capítulo 1 Medição
Capítulo 2 Movimento Retilíneo
Capítulo 3 Vetores
Capítulo 4 Movimento em Duas e Três Dimensões
Capítulo 5 Força e Movimento — I
Capítulo 6 Força e Movimento — II
Capítulo 7 Energia Cinética e Trabalho
Capítulo 8 Energia Potencial e Conservação da Energia
Capítulo 9 Centro de Massa e Momento Linear
Capítulo 10 Rotação
Capítulo 11 Rolamento, Torque e Momento Angular

Volume 2

Capítulo 12 Equilíbrio e Elasticidade
Capítulo 13 Gravitação
Capítulo 14 Fluidos
Capítulo 15 Oscilações
Capítulo 16 Ondas — I
Capítulo 17 Ondas — II
Capítulo 18 Temperatura, Calor e Primeira Lei da Termodinâmica
Capítulo 19 A Teoria Cinética dos Gases
Capítulo 20 Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica

Volume 3

Capítulo 21 Cargas Elétricas
Capítulo 22 Campos Elétricos
Capítulo 23 Lei de Gauss
Capítulo 24 Potencial Elétrico
Capítulo 25 Capacitância
Capítulo 26 Corrente e Resistência
Capítulo 27 Circuitos
Capítulo 28 Campos Magnéticos
Capítulo 29 Campos Magnéticos Produzidos por Correntes
Capítulo 30 Indução e Indutância
Capítulo 31 Oscilações Eletromagnéticas e Corrente Alternada
Capítulo 32 Equações de Maxwell; Magnetismo da Matéria

Volume 4

Capítulo 33 Ondas Eletromagnéticas
Capítulo 34 Imagens
Capítulo 35 Interferência
Capítulo 36 Difração
Capítulo 37 Relatividade
Capítulo 38 Fótons e Ondas de Matéria
Capítulo 39 Mais Ondas de Matéria
Capítulo 40 Tudo sobre os Átomos
Capítulo 41 Condução de Eletricidade nos Sólidos
Capítulo 42 Física Nuclear
Capítulo 43 Energia Nuclear
Capítulo 44 Quarks, Léptons e o Big Bang

Apêndices/Respostas dos Testes e das Perguntas e Problemas Ímpares/Índice

Sumário

VOLUME 1

1 Medição 1

Como pode um edifício afundar no chão?

1-1 O que É Física? 2
1-2 Medindo Grandezas 2
1-3 O Sistema Internacional de Unidades 2
1-4 Mudança de Unidades 3
1-5 Comprimento 5
1-6 Tempo 6
1-7 Massa 7
Revisão e Resumo 9
Problemas 9

2 Movimento Retilíneo 14

Como um pica-pau pode sobreviver aos violentos impactos de seu bico em uma árvore?

2-1 O que É Física? 15
2-2 Movimento 15
2-3 Posição e Deslocamento 15
2-4 Velocidade Média e Velocidade Escalar Média 16
2-5 Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar Instantânea 19
2-6 Aceleração 21
2-7 Aceleração Constante: Um Caso Especial 23
2-8 Mais sobre Aceleração Constante 26
2-9 Aceleração em Queda Livre 27
2-10 Integração de Gráficos em Análise de Movimento 29
Revisão e Resumo 31
Perguntas 32 / Problemas 33

3 Vetores 42

Como uma formiga consegue encontrar o caminho de casa se não há pontos de referência no deserto?

3-1 O que É Física? 43
3-2 Vetores e Escalares 43
3-3 Soma Geométrica de Vetores 43
3-4 Componentes de Vetores 45
3-5 Vetores Unitários 49
3-6 Adição de Vetores através de Suas Componentes 49
3-7 Vetores e as Leis da Física 52
3-8 Multiplicação de Vetores 53
Revisão e Resumo 56
Perguntas 57/ Problemas 58

4 Movimento em Duas e Três Dimensões 63

O que um jogador faz para saber onde deve estar para apanhar uma bola de beisebol?

4-1 O que É Física? 64
4-2 Posição e Deslocamento 64
4-3 Velocidade Média e Velocidade Instantânea 66
4-4 Aceleração Média e Aceleração Instantânea 68
4-5 Movimento de Projéteis 70
4-6 Análise do Movimento de um Projétil 72
4-7 Movimento Circular Uniforme 77
4-8 Movimento Relativo em Uma Dimensão 79
4-9 Movimento Relativo em Duas Dimensões 80
Revisão e Resumo 81
Perguntas 83 / Problemas 84

5 Força e Movimento — I 95

Qual é o fator responsável pela sensação de perigo para alguém que está no último carro de uma montanha-russa?

5-1 O que É Física? 96
5-2 Mecânica Newtoniana 96
5-3 A Primeira Lei de Newton 96
5-4 Força 97
5-5 Massa 98
5-6 A Segunda Lei de Newton 99
5-7 Algumas Forças Especiais 103
5-8 A Terceira Lei de Newton 107
5-9 Aplicando as Leis de Newton 108
Revisão e Resumo 114
Perguntas 115 / Problemas 117

6 Força e Movimento — II 126

Como os antigos egípcios levantaram os gigantescos blocos de pedra usados para construir a Grande Pirâmide?

6-1 O que É Física? 127
6-2 Atrito 127
6-3 Propriedades do Atrito 129
6-4 Força de Arrasto e Velocidade Terminal 132
6-5 Movimento Circular Uniforme 134
Revisão e Resumo 140
Perguntas 141 / Problemas 142

7 Energia Cinética e Trabalho 152

Que propriedade de um funny car determina se ele será o vencedor de uma drag race?

7-1 O que É Física? 153
7-2 O que É Energia? 153
7-3 Energia Cinética 154
7-4 Trabalho 154
7-5 Trabalho e Energia Cinética 155
7-6 Trabalho Realizado pela Força Gravitacional 158
7-7 Trabalho Realizado por uma Força Elástica 162
7-8 Trabalho Realizado por uma Força Variável Genérica 165
7-9 Potência 168
Revisão e Resumo 171
Perguntas 172 / Problemas 173

8 Energia Potencial e Conservação da Energia 180

Por que uma grande avalanche pode atingir uma distância quase 30 vezes maior que uma avalanche pequena?

8-1 O que É Física? 181
8-2 Trabalho e Energia Potencial 181
8-3 Independência da Trajetória para o Trabalho de Forças Conservativas 182
8-4 Determinação de Valores de Energia Potencial 184
8-5 Conservação da Energia Mecânica 187
8-6 Interpretação de uma Curva de Energia Potencial 190
8-7 Trabalho Realizado por uma Força Externa sobre um Sistema 194
8-8 Conservação da Energia 197
Revisão e Resumo 202
Perguntas 203 / Problemas 204

9 Centro de massa e Momento Linear 217

Como os carneiros monteses sobrevivem às cabeçadas violentas com as quais estabelecem sua supremacia?

9-1 O que É Física? 218
9-2 O Centro de Massa 218
9-3 A Segunda Lei de Newton para um Sistema de Partículas 222
9-4 Momento Linear 225
9-5 O Momento Linear de um Sistema de Partículas 226
9-6 Colisão e Impulso 227
9-7 Conservação do Momento Linear 231
9-8 Momento e Energia Cinética em Colisões 234
9-9 Colisões Inelásticas em Uma Dimensão 235
9-10 Colisões Elásticas em Uma Dimensão 238
9-11 Colisões em Duas Dimensões 241
9-12 Sistemas com Massa Variável: Um Foguete 242
Revisão e Resumo 244
Perguntas 245 / Problemas 247

10 Rotação 259

Como o pequeno camarão-de-estalo produz com a garra um som tão forte que atordoa a presa?

10-1 O que É Física? 260
10-2 As Variáveis da Rotação 260
10-3 As Grandezas Angulares São Vetores? 264
10-4 Rotação com Aceleração Angular Constante 265
10-5 Relacionando as Variáveis Lineares e Angulares 267
10-6 Energia Cinética de Rotação 270
10-7 Cálculo do Momento de Inércia 271
10-8 Torque 275
10-9 A Segunda Lei de Newton para a Rotação 276
10-10 Trabalho e Energia Cinética de Rotação 279
Revisão e Resumo 283
Perguntas 284 / Problemas 285

11 Rolamento, Torque e Momento Angular 295

Como se explica a mágica da rotação de um bailarino em pleno ar em um tour jeté?

11-1 O que É Física? 296
11-2 Rolamento como uma Combinação de Translação e Rotação 296
11-3 A Energia Cinética de Rolamento 298

11-4 As Forças do Rolamento 299
11-5 O Ioiô 301
11-6 Revisão do Torque 302
11-7 Momento Angular 304
11-8 Segunda Lei de Newton para Rotações 305
11-9 O Momento Angular de um Sistema de Partículas 307
11-10 O Momento Angular de um Corpo Rígido Girando em Torno de um Eixo Fixo 308
11-11 Conservação do Momento Angular 311
11-12 Precessão de um Giroscópio 315
Revisão e Resumo 316
Perguntas 317 / Problemas 318

Apêndices 327

A O Sistema Internacional de Unidades (SI) 327
B Algumas Constantes Fundamentais da Física 329
C Alguns Dados Astronômicos 330
D Fatores de Conversão 331
E Fórmulas Matemáticas 335
F Propriedades dos Elementos 338
G Tabela Periódica dos Elementos 341

Respostas dos Testes (T) e das Perguntas (P) e Problemas Ímpares (PR) 342

Índice 346

Prefácio

Diversão com um grande desafio. É assim que venho encarando a física desde o dia em que Sharon, uma das alunas do curso que eu estava ministrando como aluno de doutorado, me perguntou de repente:

— O que isso tem a ver com a minha vida?

Respondi prontamente:

— Sharon, isso é física! Tem tudo a ver com a sua vida!

A moça me pediu um exemplo. Dei tratos à bola, mas não consegui encontrar nenhum. Naquela noite criei *O Circo Voador da Física* para Sharon, mas também para mim, porque percebi que o problema de Sharon também era meu. Tinha passado seis anos estudando em dezenas de livros de física escritos com a melhor das intenções, mas alguma coisa estava faltando. A física é o assunto mais interessante do mundo porque descreve o modo como o mundo funciona, mas não havia nos livros qualquer ligação com o mundo real. A diversão estava faltando.

Procurei incluir muita física do mundo real neste livro, ligando-o à nova edição de *O Circo Voador da Física*. Boa parte dos assuntos vem das minhas aulas, onde posso julgar, pelas expressões e comentários dos alunos, quais são os assuntos e apresentações que funcionam. As notas que tomei a respeito de meus sucessos e fracassos ajudaram a estabelecer as bases para este livro. Minha mensagem aqui é a mesma que dei para todos os estudantes que encontrei desde o dia em que Sharon fez aquele comentário:

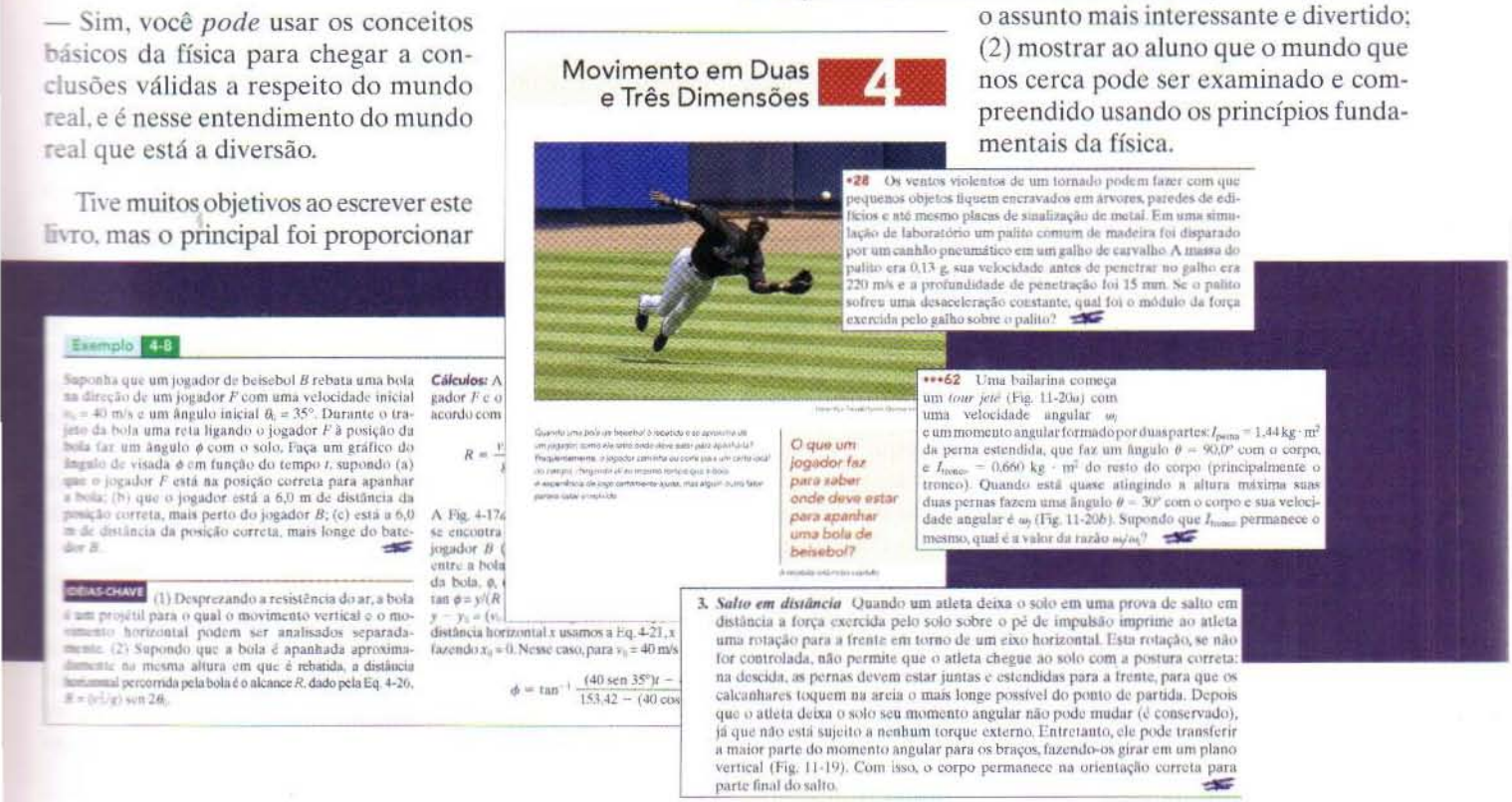
— Sim, você *pode* usar os conceitos básicos da física para chegar a conclusões válidas a respeito do mundo real, e é nesse entendimento do mundo real que está a diversão.

Tive muitos objetivos ao escrever este livro, mas o principal foi proporcionar aos professores um instrumento através do qual possam ensinar os alunos a estudar assuntos científicos, identificar conceitos fundamentais, pensar a respeito de questões científicas e resolver problemas quantitativos. Esse processo não é fácil, nem para os alunos nem para os professores. Na verdade, o curso associado a este livro pode ser um dos mais difíceis do currículo. Entretanto, pode ser também um dos mais interessantes, pois revela os mecanismos fundamentais do mundo, responsáveis por todas as aplicações científicas e de engenharia.

Muitos usuários da sétima edição (professores e alunos) enviaram comentários e sugestões para aperfeiçoar o livro. Esses melhoramentos foram incorporados à exposição e aos problemas desta edição. Nós (o autor Jearl Walker e a editora John Wiley & Sons) vemos este livro como um projeto permanente, e gostaríamos de contar com uma maior participação dos leitores. Sinta-se à vontade para enviar sugestões, correções e comentários positivos ou negativos para a LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., uma editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional, no endereço eletrônico www.ltceditora.com.br. Talvez não seja possível responder a todas as sugestões, mas lemos e consideramos cada uma delas.

Principais Mudanças de Conteúdo

- Tópicos do *Circo Voador* foram introduzidos de várias formas: em textos de abertura dos capítulos, em exemplos e em problemas. Isso foi feito com dois objetivos: (1) tornar o assunto mais interessante e divertido; (2) mostrar ao aluno que o mundo que nos cerca pode ser examinado e compreendido usando os princípios fundamentais da física.



• Os assuntos que também são discutidos em *O Circo Voador da Física* estão indicados pelo desenho de um biplano. A bibliografia do *Circo Voador* (mais de 10.000 referências a revistas científicas e de engenharia) pode ser encontrada no site http://www.flyingcircusofphysics.com.

• A lei da gravitação de Newton, a lei de Coulomb e a lei de Biot-Savart são agora apresentadas na notação de vetores unitários.

• A maior parte dos textos de abertura dos capítulos (exemplos de física aplicada que têm por objetivo despertar o interesse do leitor pelo assunto que será discutido no capítulo) é nova e foi extraída de artigos científicos em vários campos de pesquisa.

• Milhares de problemas no final dos capítulos foram reformulados para tornar mais claros tanto os enunciados como as respostas.

Características dos Capítulos

Textos de abertura. Uma situação curiosa é descrita no início de cada capítulo e explicada em algum ponto do texto para motivar o estudante a ler o capítulo. Esses textos, que constituem uma das características tradicionais de Fundamentos de Física, são baseados em pesquisas recentes publicadas em revistas de ciência, engenharia, medicina e direito.

O que É Física? O corpo de cada capítulo agora começa com essa pergunta e com uma resposta que diz respeito ao assunto do capítulo. (Um bombeiro hidráulico uma vez me perguntou: "Em que você trabalha?" Respondi: "Sou professor de física." O bombeiro pensou por alguns instantes e depois me perguntou: "O que é física?" A profissão do bombeiro dependia inteiramente da física, ainda que ele não soubesse o que é física. Muitos estudantes de física introdutória não sabem o que é física, mas supõem que ela é irrelevante para a carreira que escolheram.)

Os **Testes** são pontos intermediários em que se pergunta ao estudante: "Você é capaz de responder a essa pergunta usando um raciocínio baseado no texto ou no exemplo que acaba de ler?" Se a resposta é negativa, o estudante deve voltar e rever o que já leu antes de prosseguir no capítulo. Veja, por exemplo, o Teste 1 da Seção 4-3, do Capítulo 4, e o Teste 2 da Seção 11-4, do Capítulo 11. *As respostas de todos os testes estão no final do livro.*

Os **Exemplos** foram escolhidos para mostrar que os problemas de física devem ser resolvidos usando o raciocínio e não simplesmente introduzindo números em uma equação, sem nenhuma preocupação com o seu significado. Os exemplos com a indicação "Aumente sua capacidade" são, em geral, mais longos e apresentam mais comentários.

As **Idéias-chave** dos exemplos mostram ao estudante quais são os conceitos básicos necessários para resolver um problema. O que queremos dizer com essas idéias-chave é o seguinte: "Vamos começar a solução usando este conceito básico, um método que nos prepara para resolver muitos outros problemas. Não começamos sacando do bolso uma equação para uma simples substituição de números, um método que não nos prepara para nada."

As **Táticas para a solução de problemas** são instruções para ajudar os alunos principiantes a resolver problemas e evitar os erros mais comuns.

A **Revisão e Resumo** é um breve sumário do capítulo que contém os conceitos essenciais, mas não substitui a leitura do capítulo.

As **Perguntas** se parecem com os testes e requerem raciocínio e entendimento, em vez de cálculos. *As respostas das perguntas ímpares estão no final do livro.*

Os **Problemas** estão agrupados por seções e possuem uma indicação do grau de dificuldade. *As respostas dos problemas ímpares estão no final do livro.*

Símbolos. O quadro a seguir, que é repetido no início de cada lista de problemas, mostra os símbolos usados neste livro.

• – ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Problemas adicionais. Esses problemas não estão classificados, de modo que cabe ao estudante determinar a que parte do capítulo se refere cada problema.

Características Adicionais

Raciocínio *versus* aplicação de fórmulas. Um dos principais objetivos deste livro é ensinar os estudantes a usar o raciocínio para resolver problemas, desde os princípios básicos até a solução final. Embora tenham sido incluídos (de propósito) alguns problemas que envolvem a simples aplicação de fórmulas, a maioria dos problemas exige algum tipo de raciocínio.

Capítulos de tamanho razoável. Para não acabar escrevendo um livro suficientemente grosso para deter uma bala (e a maioria dos estudantes), procurei manter os capítulos com um tamanho razoável. Explico o suficiente para colocar o estudante no caminho certo, mas não tanto que o estudante não precise analisar e combinar idéias. Afinal de contas, o estudante ainda vai ter necessidade de analisar e combinar idéias muito depois de ler este livro e completar o curso.

Uso de calculadoras gráficas. Quando os cálculos vetoriais de um exemplo podem ser feitos diretamente da tela de uma calculadora gráfica esse fato é indicado na solução do exemplo, mas é apresentada a solução tradicional através de componentes. Quando os cálculos vetoriais não podem ser feitos diretamente na tela o motivo é explicado.

Gráficos como enigmas. Estes são problemas nos quais se fornece um gráfico e pede-se um resultado que exige muito mais do que simplesmente ler um dado em um gráfico. Na verdade, a solução exige uma compreensão do significado físico do problema e dos princípios que estão por trás das equações associadas. Esses problemas se parecem com enig-

mas de Sherlock Holmes, já que cabe ao estudante determinar quais são os dados importantes. Veja, por exemplo, o problema 50 do Capítulo 4, o problema 12 do Capítulo 5 e o problema 22 do Capítulo 9.

Problemas de física aplicada, baseados em pesquisas publicadas, aparecem em muitos lugares, como os textos de abertura dos capítulos, os exemplos e os problemas. Veja, por exemplo, o texto de abertura do Capítulo 4, o Exemplo 4-8, da Seção 4-6, e o problema 62 do Capítulo 11. Também existem séries de problemas encadeados, como os problemas 2, 39 e 61 do Capítulo 6.

Problemas com situações inusitadas. Aqui está um desses problemas, escolhido entre as centenas que existem no livro: o problema 69 do Capítulo 5 se baseia na história verdadeira de como o vôo 143 da Air Canada ficou sem combustível a 7,9 km de altitude porque a tripulação e o pessoal de terra não usaram as unidades corretas para a quantidade de combustível nos tanques (uma lição importante para os estudantes que costumam "misturar" unidades).

Para o Professor

Os professores que adotarem o livro podem solicitar à LTC materiais suplementares de apoio pedagógico, em inglês. O pedido deve ser encaminhado a:

LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
Uma editora integrante do
GEN | Grupo Editorial Nacional
A/C Editorial Técnico
Travessa do Ouvidor, 11
Rio de Janeiro, RJ — CEP 20040-040
Tel.: 21-3970-9480
Fax: 21-2221-3202
ltc@grupogen.com.br.
www.ltceditora.com.br

Agradecimentos

Muitas pessoas contribuíram para este livro. J. Richard Christman, da U.S. Coast Guard Academy, mais uma vez criou muitos suplementos valiosos; suas recomendações para este livro foram inestimáveis. Sen-Ben Liao, do Lawrence Livermore National Laboratory, James Whitenton, da Southern Polytechnic State University, e Jerry Shi, do Pasadena City College, foram responsáveis pela tarefa hercúlea de resolver todos os problemas do livro. Na John Wiley o livro foi apoiado por Stuart Johnson, o editor que supervisionou todo o projeto, Tom Kulesa, que coordenou o estado-da-arte do pacote de mídia, e Geraldine Osnato, que gerenciou uma superequipe para produzir um impressionante pacote de suplementos. Agradecemos a Elizabeth Swain, editora de produção, por ter juntado todas as partes durante o complexo processo de produção. Agradecemos também a Maddy Lesure, pelo seu projeto gráfico tanto do texto quanto da produção da capa; Lee Goldstein, que foi responsável pela diagramação; Helen Walden, pela edição dos originais; Anna Melhorn, que cuidou das ilustrações; e Lilian Brady, que se encarregou da revisão. Hilary Newman foi brilhante na busca de fotografias inusitadas e interessantes. Tanto a editora John Wiley & Sons, Inc. como Jearl Walker gostariam de agradecer às seguintes pessoas por comentários e idéias a respeito da 7.ª edição: Richard Woodard, University of Florida; David Wick, Clarkson University; Patrick Rapp, University of Puerto Rico em Mayagüez; Nora Thornber, Raritan Valley Community College; Laurence I. Gould, University of Hartford; Greg Childers, California State University em Fullerton; Asha Khakpour, California State University em Fullerton; Joe F. McCullough, Cabrillo College. Finalmente, nossos revisores externos realizaram um trabalho excepcional, e expressamos a cada um deles nossos agradecimentos.

Maris A. Abolins
Michigan State University

Edward Adelson
Ohio State University

Nural Akchurin
Texas Tech

Barbara Andereck
Ohio Wesleyan University

Mark Arnett
Kirkwood Community College

Arun Bansil
Northeastern University

Richard Barber
Santa Clara University

Neil Basecu
Westchester Community College

Anand Batra
Howard University

Richard Bone
Florida International University

Michael E. Browne
University of Idaho

Timothy J. Burns
Leeward Community College

Joseph Buschi
Manhattan College

Philip A. Casabella
Rensselaer Polytechnic Institute

Randall Caton
Christopher Newport College

Roger Clapp
University of South Florida

W. R. Conkie
Queen's University

Renate Crawford
University of Massachusetts-Dartmouth

Mike Crivello
San Diego State University

Robert N. Davie, Jr.
St. Petersburg Junior College

Cheryl K. Dellai
Glendale Community College

Eric R. Dietz
California State University em Chico

N. John DiNardo
Drexel University

Eugene Dunnam
University of Florida

Robert Endorf
University of Cincinnati

F. Paul Esposito
University of Cincinnati

Jerry Finkelstein
San Jose State University

Robert H. Good
California State University-Hayward

John B. Gruber
San Jose State University

Ann Hanks
American River College

Randy Harris
University of California-Davis

Samuel Harris
Purdue University

Harold B. Hart
Western Illinois University

Rebecca Hartzler
Seattle Central Community College

John Hubisz
North Carolina State University

Joey Huston
Michigan State University

David Ingram
Ohio University

Shawn Jackson
University of Tulsa

Hector Jimenez
University of Puerto Rico

Sudhakar B. Joshi
York University

Leonard M. Kahn
University of Rhode Island

Leonard Kleinman
University of Texas em Austin

Craig Kletzing
University of Iowa

Arthur Z. Kovacs
Rochester Institute of Technology

Kenneth Krane
Oregon State University

Priscilla Laws
Dickinson College

Edbertho Leal
Polytechnic University of Puerto Rico

Vern Lindberg
Rochester Institute of Technology

Peter Loly
University of Manitoba

Andreas Mandelis
University of Toronto

Robert R. Marchini
Memphis State University

Paul Marquard
Caspar College

David Marx
Illinois State University

James H. McGuire
Tulane University

David M. McKinstry
Eastern Washington University

Eugene Mosca
United States Naval Academy

James Napolitano
Rensselaer Polytechnic Institute

Michael O'Shea
Kansas State University

Patrick Papin
San Diego State University

Kiumars Parvin
San Jose State University

Robert Pelcovits
Brown University

Oren P. Quist
South Dakota State University

Joe Redish
University of Maryland

Timothy M. Ritter
University of North Carolina em Pembroke

Gerardo A. Rodriguez
Skidmore College

John Rosendahl
University of California em Irvine

Todd Ruskell
Colorado School of Mines

Michael Schatz
Georgia Institute of Technology

Darrell Seeley
Milwaukee School of Engineering

Bruce Arne Sherwood
North Carolina State University

Ross L. Spencer
Brigham Young University

Paul Stanley
Beloit College

Harold Stokes
Brigham Young University

Michael G. Strauss
University of Oklahoma

Jay D. Strieb
Villanova University

Dan Styer
Oberlin College

Michael Tammaro
University of Rhode Island

Marshall Thomsen
Eastern Michigan University

David Toot
Alfred University

Tung Tsang
Howard University

J. S. Turner
University of Texas em Austin

T. S. Venkataraman
Drexel University

Gianfranco Vidali
Syracuse University

Fred Wang
Prairie View A & M

Robert C. Webb
Texas A & M University

William M. Whelan
Ryerson Polytechnic University

George Williams
University of Utah

David Wolfe
University of New Mexico

Comentários e Sugestões

Apesar dos melhores esforços dos autores, do tradutor, do editor e dos revisores, é inevitável que surjam erros no texto. Assim, são bem-vindas as comunicações de usuários sobre correções ou sugestões referentes ao conteúdo ou ao nível pedagógico que auxiliem o aprimoramento de edições futuras. Encorajamos os comentários dos leitores que podem ser encaminhados à LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., uma editora integrante do GEN | Grupo Editorial Nacional, no endereço: Travessa do Ouvidor, 11 — Rio de Janeiro, RJ — CEP 20040-040 ou ao endereço eletrônico ltc@grupogen.com.br.

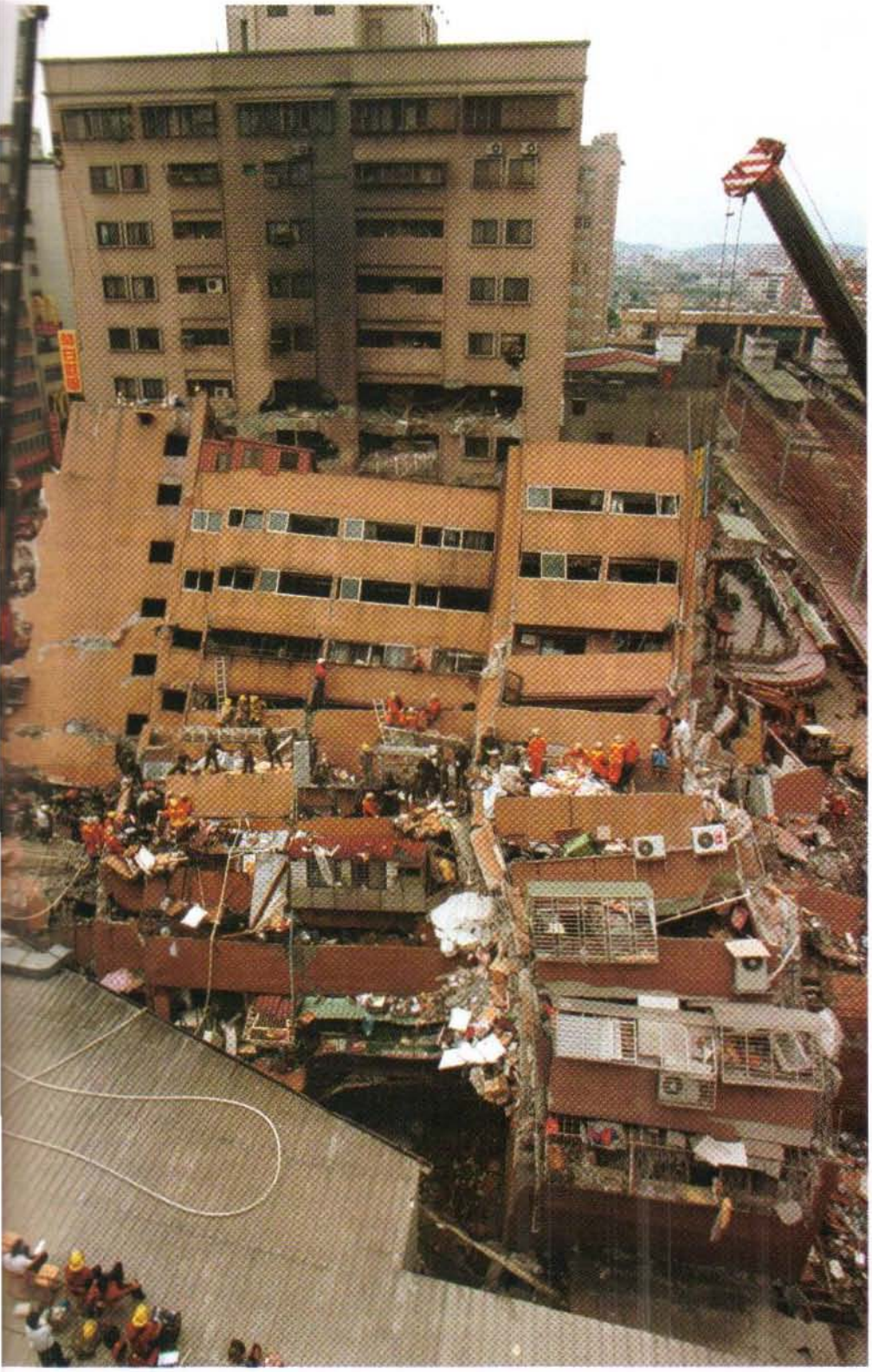
Fundamentos de Física

8E

VOLUME 1

MECÂNICA

Medição 1



©AP/Wide World Photos

Quando um terremoto atinge uma região habitada, pode fazer edifícios e outras construções racharem ou tombarem. Em algumas regiões, porém, um terremoto pode fazer as construções afundarem no solo até ficarem parcialmente enterradas, como se estivessem apoiadas em um fluido viscoso e não em terra firme.

Como pode um edifício afundar no chão?

A resposta está neste capítulo.

1-1 O QUE É FÍSICA?

A ciência e a engenharia se baseiam em medições e comparações. Assim, precisamos de regras para estabelecer de que forma as grandezas devem ser medidas e comparadas, e de experimentos para estabelecer as unidades para essas medições e comparações. Um dos propósitos da física (e também da engenharia) é projetar e executar esses experimentos.

Assim, por exemplo, os físicos se empenham em desenvolver relógios extremamente precisos para que intervalos de tempo possam ser medidos e comparados com exatidão. O leitor pode estar se perguntando se essa exatidão é realmente necessária. Eis um exemplo de sua importância: se não houvesse relógios extremamente precisos, o Sistema de Posicionamento Global (GPS — Global Positioning System), usado atualmente no mundo inteiro em uma infinidade de aplicações, não seria possível.

1-2 | Medindo Grandezas

Descobrimos a física aprendendo a medir e comparar grandezas como comprimento, tempo, massa, temperatura, pressão e corrente elétrica.

Medimos cada grandeza física em unidades apropriadas, por comparação com um **padrão**. A **unidade** é um nome particular que atribuímos às medidas dessa grandeza. Assim, por exemplo, o metro (m) é uma unidade da grandeza comprimento. O padrão corresponde a exatamente 1,0 unidade da grandeza. Como vamos ver, o padrão de comprimento, que corresponde a exatamente 1,0 m, é a distância percorrida pela luz, no vácuo, durante uma certa fração de segundo. Em princípio, podemos definir uma unidade e seu padrão da forma que quisermos, mas é importante que cientistas em diferentes partes do mundo concordem que nossas definições são ao mesmo tempo razoáveis e práticas.

Depois de escolher um padrão (de comprimento, digamos), precisamos estabelecer procedimentos através dos quais qualquer comprimento, seja ele o raio do átomo de hidrogênio, a largura de um skate ou a distância de uma estrela, possa ser expresso em termos do padrão. Usar uma régua de comprimento aproximadamente igual ao padrão pode ser uma forma de executar medidas de comprimento. Entretanto, muitas das comparações são necessariamente indiretas. É impossível usar uma régua, por exemplo, para medir o raio de um átomo ou a distância de uma estrela.

Existem tantas grandezas físicas que não é fácil organizá-las. Felizmente, elas não são todas independentes; assim, por exemplo, a velocidade é a razão entre as grandezas comprimento e tempo. Assim, o que fazemos é escolher, através de um acordo internacional, um pequeno número de grandezas físicas, como comprimento e tempo, e atribuir padrões apenas a elas. Em seguida, definimos as demais grandezas físicas em termos dessas *grandezas fundamentais* e de seus padrões (conhecidos como *padrões fundamentais*). A velocidade, por exemplo, é definida em termos das grandezas fundamentais comprimento e tempo e seus padrões fundamentais.

Os padrões fundamentais devem ser ao mesmo tempo acessíveis e invariáveis. Se definimos o padrão de comprimento como a distância entre o nariz de uma pessoa qualquer e a ponta do dedo indicador com o braço estendido, certamente temos um padrão acessível, mas que varia, obviamente, de pessoa para pessoa. A necessidade de precisão na ciência e na engenharia nos força, em primeiro lugar, a buscar a invariabilidade. Só então nos preocupamos em produzir réplicas dos padrões fundamentais que sejam acessíveis a todos que precisem utilizá-los.

TABELA 1-1

Unidades de Três Grandezas Fundamentais do SI

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo da Unidade
Comprimento	metro	m
Tempo	segundo	s
Massa	quilograma	kg

1-3 | O Sistema Internacional de Unidades

Em 1971, na 14ª Conferência Geral de Pesos e Medidas, foram selecionadas sete grandezas como fundamentais, as quais constituem a base do Sistema Internacional

de Unidades, cuja abreviação é SI, popularmente conhecido como *sistema métrico*. A Tabela 1-1 mostra as unidades das três grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo) que serão usadas nos primeiros capítulos deste livro. Essas unidades foram definidas de modo a serem da mesma ordem de grandeza que a "escala humana".

Muitas *unidades derivadas* do SI são definidas em termos dessas unidades fundamentais. Assim, por exemplo, a unidade de potência no SI, chamada **watt** (W), é definida em termos das unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Como veremos no Capítulo 7,

$$1\,\text{watt} = 1\,\text{W} = 1\,\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3, \tag{1-1}$$

onde o último conjunto de símbolos de unidades é lido como quilograma metro quadrado por segundo ao cubo.

Para expressar as grandezas muito grandes ou muito pequenas freqüentemente encontradas na física usamos a *notação científica*, que emprega potências de 10. Nesta notação,

$$3\,560\,000\,000\,\text{m} = 3{,}56 \times 10^9\,\text{m} \tag{1-2}$$

e

$$0{,}000\,000\,492\,\text{s} = 4{,}92 \times 10^{-7}\,\text{s}. \tag{1-3}$$

Nos computadores a notação científica às vezes assume uma forma mais abreviada, como 3.56 E9 e 4.92 E–7, onde E é usado para designar o "expoente de dez". Em algumas calculadoras a notação é ainda mais abreviada, com o E substituído por um espaço em branco.

Também por conveniência, quando lidamos com grandezas muito grandes ou muito pequenas usamos os prefixos da Tabela 1-2. Como se pode ver, cada prefixo representa uma certa potência de 10, sendo usado como um fator multiplicativo. Incorporar um prefixo a uma unidade do SI tem o efeito de multiplicar a unidade pelo fator correspondente. Assim, podemos expressar uma certa potência elétrica como

$$1{,}27 \times 10^9\,\text{watts} = 1{,}27\,\text{gigawatt} = 1{,}27\,\text{GW} \tag{1-4}$$

ou um certo intervalo de tempo como

$$2{,}35 \times 10^{-9}\,\text{s} = 2{,}35\,\text{nanossegundos} = 2{,}35\,\text{ns}. \tag{1-5}$$

Alguns prefixos, como os usados em mililitro, centímetro, quilograma e megabyte, são provavelmente familiares para o leitor.

TABELA 1-2

Prefixos das Unidades do SI

Fator	Prefixo[a]	Símbolo
10^{24}	iota-	Y
10^{21}	zeta-	Z
10^{18}	exa-	E
10^{15}	peta-	P
10^{12}	tera-	T
10^9	**giga-**	**G**
10^6	**mega-**	**M**
10^3	**quilo-**	**k**
10^2	hecto-	h
10^1	deca-	da
10^{-1}	deci-	d
10^{-2}	**centi-**	**c**
10^{-3}	**mili-**	**m**
10^{-6}	**micro-**	**μ**
10^{-9}	**nano-**	**n**
10^{-12}	**pico-**	**p**
10^{-15}	femto-	f
10^{-18}	ato-	a
10^{-21}	zepto-	z
10^{-24}	iocto-	y

[a]Os prefixos mais usados aparecem em negrito.

1-4 | Mudança de Unidades

Muitas vezes precisamos mudar as unidades nas quais uma grandeza física está expressa. Isto pode ser feito usando um método conhecido como *conversão em cadeia*. Nesse método multiplicamos o valor original por um **fator de conversão** (uma razão entre unidades que é igual à unidade). Assim, por exemplo, como 1 min e 60 s correspondem a intervalos de tempo iguais, temos:

$$\frac{1\,\text{min}}{60\,\text{s}} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{60\,\text{s}}{1\,\text{min}} = 1.$$

Assim, as razões (1 min)/(60 s) e (60 s)/(1 min) podem ser usadas como fatores de conversão. Note que isso *não* é o mesmo que escrever $\frac{1}{60} = 1$ ou $60 = 1$; cada *número* e sua *unidade* devem ser tratados conjuntamente.

Como a multiplicação de qualquer grandeza por um fator unitário deixa essa grandeza inalterada, podemos usar fatores de conversão sempre que isso for conveniente. No método de conversão em cadeia usamos os fatores de conversão para cancelar unidades indesejáveis. Para converter 2 min em segundos, por exemplo, temos:

$$2\,\text{min} = (2\,\text{min})(1) = (2\,\cancel{\text{min}})\left(\frac{60\,\text{s}}{1\,\cancel{\text{min}}}\right) = 120\,\text{s}. \tag{1-6}$$

Se você introduzir um fator de conversão e as unidades indesejáveis não desaparecerem, inverta o fator e tente novamente. Nas conversões as unidades obedecem às mesmas regras algébricas que se aplicam a variáveis e números.

O Apêndice D fornece fatores de conversão entre unidades de SI e outras unidades, como as que ainda são usadas até hoje nos Estados Unidos. Os fatores de conversão são fornecidos na forma "1 min = 60 s", e não na forma de uma razão. Seguem alguns exemplos de conversão de unidades.

Exemplo 1-1

Quando, segundo a lenda, Feidípides correu de Maratona até Atenas, em 490 a.C., para levar a notícia da vitória dos gregos sobre os persas, ele provavelmente correu a uma velocidade de cerca de 23 rides por hora (rides/h). O ride é uma antiga unidade grega para comprimento, como o stadium e o plethron: 1 ride valia 4 stadia, 1 stadium valia 6 plethra e, em termos de uma unidade moderna, 1 plethron equivale a 30,8 m. Qual foi a velocidade de Feidípides em quilômetros por segundo (km/s)?

IDÉIA-CHAVE No método de conversão em cadeia escrevemos os fatores de conversão como razões que eliminem as unidades indesejáveis.

Cálculo: Nesse caso, temos

$$23 \text{ rides/h} = \left(23 \frac{\text{rides}}{\text{h}}\right)\left(\frac{4 \text{ stadia}}{1 \text{ ride}}\right)\left(\frac{6 \text{ plethra}}{1 \text{ stadium}}\right) \times \left(\frac{30{,}8 \text{ m}}{1 \text{ plethron}}\right)\left(\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}\right)\left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}\right)$$

$$= 4{,}7227 \times 10^{-3} \text{ km/s} \approx 4{,}7 \times 10^{-3} \text{ km/s}. \quad \text{(Resposta)}$$

Exemplo 1-2

O arenque é um tipo de peixe abundante no Atlântico Norte. O *cran* é uma unidade de volume britânica para arenques frescos: 1 cran = 170,474 litros (L) de arenque, cerca de 750 arenques. Suponha que, para liberação pela alfândega da Arábia Saudita, um carregamento de 1255 crans deva ser declarado em termos de covidos cúbicos, onde o covido é uma unidade de comprimento árabe: 1 covido = 48,26 cm. Qual é o volume a ser declarado?

IDÉIA-CHAVE De acordo com o Apêndice D, 1 L equivale a 1000 cm^3. Para converter centímetros *cúbicos* em covidos *cúbicos* devemos elevar ao *cubo* a razão de conversão entre centímetros e covidos.

Cálculo: Escrevemos a seguinte cadeia de conversões:

$$1255 \text{ crans} = (1255 \text{ crans})\left(\frac{170{,}474 \text{ L}}{1 \text{ cran}}\right)\left(\frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}\right)\left(\frac{1 \text{ covido}}{48{,}26 \text{ cm}}\right)^3$$

$$= 1{,}903 \times 10^3 \text{ covidos}^3. \quad \text{(Resposta)}$$

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 1: *Algarismos Significativos e Casas Decimais* Se você calculou a resposta do Exemplo 1-1 sem que sua calculadora tenha arredondado automaticamente o resultado, o número 4.722 666 666 67 $\times 10^{-3}$ deve ter aparecido no visor. A precisão sugerida por este número é ilusória. Arredondamos a resposta para 4,7 $\times 10^{-3}$ km/s para não dar a impressão de que ela é mais precisa que os dados fornecidos. A velocidade conhecida de 23 rides/h contém dois algarismos, que são chamados de **algarismos significativos**. Assim, arredondamos a resposta para dois algarismos significativos. Neste livro, os resultados finais dos cálculos são freqüentemente arredondados para se obter o mesmo número de algarismos significativos que o dado com o menor número de algarismos significativos. (Entretanto, algumas vezes um algarismo significativo a mais é mantido.) Quando o primeiro dígito à direita a ser descartado é maior ou igual a 5, o último dígito mantido é acrescido de uma unidade; caso contrário, ele permanece inalterado. Assim, por exemplo, 11,3516 arredondado para três algarismos significativos é igual a 11,4, enquanto 11,3279 é igual a 11,3. (As respostas dos exemplos neste livro são usualmente apresentadas com o símbolo = em vez de ≈, mesmo que haja um arredondamento.)

Quando um número como 3,15 ou 3,15 $\times 10^3$ é fornecido em um problema, o número de algarismos significativos é evidente, mas o que dizer do número 3000? Ele tem apenas um algarismo significativo (3 $\times 10^3$), ou quatro algarismos significativos (3,000 $\times 10^3$)? Neste livro, supomos que todos os zeros em números como 3000 são significativos, mas outros textos podem usar outra interpretação.

Não confunda *algarismos significativos* com *casas decimais*. Considere os comprimentos 35,6 mm, 3,56 m e 0,00356 m. Todos têm três algarismos significativos mas possuem uma, duas e cinco casas decimais, respectivamente.

1-5 | Comprimento

Em 1792, a recém-criada República da França estabeleceu um novo sistema de pesos e medidas. Sua base era o metro, definido como um décimo de milionésimo da distância entre o pólo norte e o equador. Mais tarde, por razões práticas, esse padrão foi abandonado e o metro veio a ser definido como a distância entre duas linhas finas gravadas perto das extremidades de uma barra de platina-irídio, a **barra do metro-padrão**, mantida no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, nas vizinhanças de Paris. Réplicas precisas dessa barra foram enviadas a laboratórios de padronização em várias partes do mundo. Esses **padrões secundários** foram usados para produzir outros padrões, ainda mais acessíveis, de tal forma que, no final, todos os instrumentos de medição de comprimento estavam relacionados à barra do metro-padrão através de uma complicada cadeia de comparações.

Com o passar do tempo, um padrão mais preciso que a distância entre duas finas ranhuras em uma barra de metal se tornou necessário. Em 1960, foi adotado um novo padrão para o metro, baseado no comprimento de onda da luz. Especificamente, o metro foi redefinido como sendo 1 650 763,73 comprimentos de onda de uma certa luz vermelho-alaranjada emitida por átomos de criptônio-86 (um isótopo do criptônio) em um tubo de descarga de gás. Esse número de comprimentos de onda aparentemente estranho foi escolhido para que o novo padrão não fosse muito diferente do definido pela antiga barra do metro-padrão.

Em 1983, entretanto, a necessidade de maior precisão havia alcançado tal ponto que mesmo o padrão do criptônio-86 já não era suficiente, e naquele ano foi dado um passo audacioso. O metro foi redefinido como a distância percorrida pela luz em um intervalo de tempo especificado. Nas palavras da 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas:

> O metro é a distância percorrida pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 de segundo.

Este intervalo de tempo foi escolhido para que a velocidade da luz c seja exatamente

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}.$$

Como as medidas da velocidade da luz haviam se tornado extremamente precisas, fazia sentido adotar a velocidade da luz como uma grandeza definida e usá-la para redefinir o metro.

A Tabela 1-3 mostra uma ampla gama de comprimentos, que vai desde o tamanho do universo conhecido (linha de cima) até o tamanho de alguns objetos muito pequenos.

TABELA 1-3
Alguns Comprimentos Aproximados

Descrição	Comprimento em Metros
Distância das galáxias mais antigas	2×10^{26}
Distância da galáxia de Andrômeda	2×10^{22}
Distância da estrela mais próxima	4×10^{16}
Distância de Plutão	6×10^{12}
Raio da Terra	6×10^{6}
Altura do monte Everest	9×10^{3}
Espessura desta página	1×10^{-4}
Comprimento de um vírus típico	1×10^{-8}
Raio do átomo de hidrogênio	5×10^{-11}
Raio do próton	1×10^{-15}

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 2: *Ordem de Grandeza* A *ordem de grandeza* de um número é a potência de dez que aparece quando o número é expresso em notação científica. Assim, por exemplo, se $A = 2{,}3 \times 10^4$ e $B = 7{,}8 \times 10^4$, a ordem de grandeza de A e de B é 4.

Freqüentemente, engenheiros e cientistas estimam o resultado de um cálculo pela ordem de grandeza *mais próxima*. Em nosso exemplo, a ordem de grandeza mais próxima é 4 para A e 5 para B. É comum fazer esse tipo de estimativa quando os dados necessários para executar um certo cálculo não são conhecidos com precisão, como ilustra o Exemplo 1-3.

Exemplo 1-3 Aumente sua capacidade

O maior novelo do mundo tem cerca de 2 m de raio. Qual é a ordem de grandeza do comprimento L do fio que forma o novelo?

IDÉIA-CHAVE Poderíamos, evidentemente, desenrolar o novelo e medir o comprimento L do fio, mas isso daria muito trabalho, além de deixar o fabricante do novelo muito insatisfeito. Em vez disso, como estamos interessados apenas na ordem de grandeza, podemos estimar as grandezas necessárias para fazer o cálculo.

Cálculos: Vamos supor que o novelo seja uma esfera de raio $R = 2$ m. O fio do novelo certamente não está apertado (existem espaços vazios entre trechos vizinhos do fio). Para levar em conta esses espaços vazios, vamos superestimar um pouco a área de seção transversal do fio, supondo que ela seja quadrada, com lado de comprimento $d = 4$ mm. Nesse caso, com uma área da seção transversal d^2 e um comprimento L, o fio ocupa um volume total de

$$V = (\text{área da seção transversal})(\text{comprimento}) = d^2L.$$

Este valor é aproximadamente igual ao volume do novelo, dado por $4\pi R^3/3$, que é quase igual a $4R^3$, já que π é quase igual a 3. Assim, temos:

$$d^2L = 4R^3,$$

ou
$$L = \frac{4R^3}{d^2} = \frac{4(2\text{ m})^3}{(4\times10^{-3}\text{ m})^2}$$
$$= 2\times10^6\text{ m} \approx 10^6\text{ m} = 10^3\text{ km}. \quad \text{(Resposta)}$$

(Note que você não precisa usar uma calculadora para realizar um cálculo simples como este.) A ordem de grandeza do comprimento do fio é, portanto, 1000 km!

1-6 | Tempo

O tempo tem dois aspectos. No dia-a-dia e para alguns fins científicos queremos saber a hora do dia para podermos ordenar eventos em seqüência. Em muitos trabalhos científicos estamos interessados em conhecer a duração de um evento. Assim, qualquer padrão de tempo deve ser capaz de responder a duas perguntas: "*Quando* isso aconteceu?" e "*Quanto tempo* isso durou?". A Tabela 1-4 mostra alguns intervalos de tempo.

Qualquer fenômeno repetitivo pode ser usado como padrão de tempo. A rotação da Terra, que determina a duração do dia, foi usada para esse fim durante séculos; a Fig. 1-1 mostra um exemplo interessante de relógio baseado nessa rotação. Um relógio de quartzo, no qual um anel de quartzo é posto em vibração contínua, pode ser sincronizado com a rotação da Terra por meio de observações astronômicas e usado para medir intervalos de tempo no laboratório. Entretanto, a calibração não pode ser realizada com a exatidão exigida pela tecnologia moderna da engenharia e da ciência.

TABELA 1-4

Alguns Intervalos de Tempo Aproximados

Descrição	Intervalo de Tempo em Segundos
Tempo de vida do próton (teórico)	3×10^{40}
Idade do universo	5×10^{17}
Idade da pirâmide de Quéops	1×10^{11}
Expectativa de vida de um ser humano	2×10^{9}
Duração de um dia	9×10^{4}
Intervalos entre duas batidas de um coração humano	8×10^{-1}
Tempo de vida do múon	2×10^{-6}
Pulso mais curto obtido em laboratório	1×10^{-16}
Tempo de vida da partícula mais instável	1×10^{-23}
Tempo de Planck[a]	1×10^{-43}

[a]Tempo decorrido após o big bang, a partir do qual as leis de física que conhecemos passaram a ser válidas.

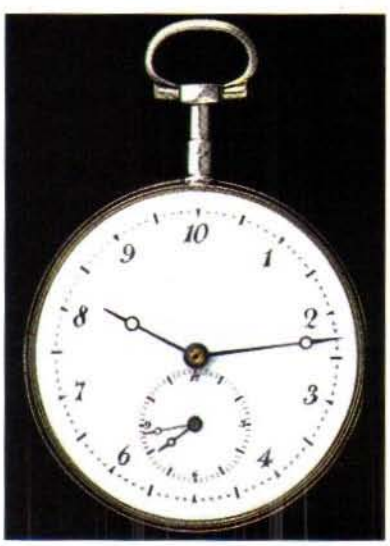


FIG. 1-1 Quando o sistema métrico foi proposto, em 1792, a hora foi redefinida para que um dia tivesse 10 horas. A idéia não vingou. O fabricante deste relógio de 10 horas sabiamente incluiu um pequeno mostrador convencional. Os dois mostradores indicam a mesma hora? *(Pitkin Studio, Rockford, IL, USA)*

Para atender à necessidade de um melhor padrão de tempo, foram desenvolvidos relógios atômicos. Um relógio atômico do National Institute of Standards and Technology (NIST) em Boulder, Colorado, EUA, é o padrão da Hora Coordenada Universal (UTC) nos Estados Unidos. Seus sinais de tempo estão disponíveis através de ondas curtas de rádio (estações WWV e WWVH) e por telefone (303-499-7111). Sinais de tempo (e informações relacionadas) estão também disponíveis no United States Naval Observatory, no site http://tycho.usno.navy.mil/time.html.* (Para acertar um relógio de forma extremamente precisa no local onde você se encontra seria necessário levar em conta o tempo necessário para que esses sinais cheguem até você.)

A Fig. 1-2 mostra as variações da duração de um dia na Terra durante um período de quatro anos, obtidas por comparação com um relógio atômico de césio. Como a variação mostrada na Fig. 1-2 é sazonal e repetitiva, desconfiamos da Terra quando existe uma diferença entre a Terra e um átomo como padrões de tempo. A variação se deve a efeitos de maré causados pela Lua e pela circulação atmosférica.

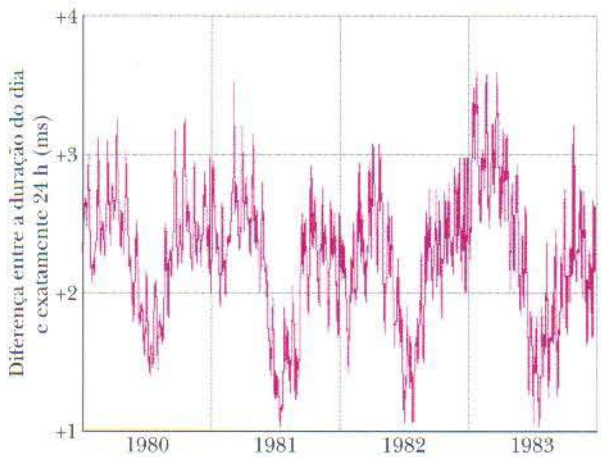


FIG. 1-2 Variações da duração do dia em um período de 4 anos. Note que toda a escala vertical corresponde a uma variação de apenas 3 ms (= 0,003 s).

Em 1967, a 13ª Conferência Geral de Pesos e Medidas adotou como padrão de tempo um segundo baseado no relógio de césio:

> Um segundo é o intervalo de tempo que corresponde a 9 192 631 770 oscilações da luz (de uma transição atômica especificada) emitida por um átomo de césio-133.

Os relógios atômicos são tão estáveis que, em princípio, dois relógios de césio teriam que funcionar por 6000 anos para que a diferença entre suas leituras fosse maior que 1 s. Mesmo assim, essa precisão não é nada em comparação com a dos relógios que estão sendo desenvolvidos atualmente, que pode chegar a uma parte em 10^{18}, ou seja, 1 s em 1×10^{18} s (cerca de 3×10^{10} anos).

1-7 | Massa

O Quilograma-Padrão

O padrão de massa do SI é um cilindro de platina-irídio (Fig. 1-3), mantido no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, nas proximidades de Paris, ao qual foi atribuída, por acordo internacional, a massa de 1 quilograma. Cópias precisas desse cilindro foram enviadas a laboratórios de padronização de outros países, e as massas de outros corpos podem ser determinadas comparando-os com uma dessas cópias.

FIG. 1-3 O quilograma-padrão internacional de massa, um cilindro de platina-irídio com 3,9 cm de altura e 3,9 cm de diâmetro. *(Cortesia do Bureau Internacional de Pesos e Medidas, França)*

* O Observatório Nacional fornece a hora legal brasileira no site http://pcdsh01.on.br. (N.T.)

TABELA 1-5

Algumas Massas Aproximadas

Descrição	Massa em Quilogramas
Universo conhecido	1×10^{53}
Nossa galáxia	2×10^{41}
Sol	2×10^{30}
Lua	7×10^{22}
Asteróide Eros	5×10^{15}
Montanha pequena	1×10^{12}
Transatlântico	7×10^{7}
Elefante	5×10^{3}
Uva	3×10^{-3}
Grão de poeira	7×10^{-10}
Molécula de penicilina	5×10^{-17}
Átomo de urânio	4×10^{-25}
Próton	2×10^{-27}
Elétron	9×10^{-31}

A Tabela 1-5 mostra algumas massas expressas em quilogramas, em uma faixa de aproximadamente 83 ordens de grandeza.

A cópia norte-americana do quilograma-padrão está guardada em um cofre do NIST. Ela é removida, não mais do que uma vez por ano, com o objetivo de aferir duplicatas usadas em outros lugares. Desde 1889 ela foi levada para a França duas vezes para comparação com o padrão primário.

Um Segundo Padrão de Massa

As massas dos átomos podem ser comparadas entre si mais precisamente do que com o quilograma-padrão. Por essa razão, temos um segundo padrão de massa, o átomo de carbono-12, ao qual, por acordo internacional, foi atribuída uma massa de 12 **unidades de massa atômica** (u). A relação entre as duas unidades é a seguinte:

$$1\ \text{u} = 1{,}660\,538\,86 \times 10^{-27}\ \text{kg}, \tag{1-7}$$

com uma incerteza de ±10 nas duas últimas casas decimais. Os cientistas podem determinar experimentalmente, com razoável precisão, as massas de outros átomos em relação à massa do carbono-12. O que nos falta no momento é uma forma confiável de estender tal precisão a unidades de massa mais comuns, como o quilograma.

Massa Específica

Como vamos ver no Capítulo 14, a **massa específica** ρ de uma substância é a massa por unidade de volume:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{1-8}$$

As massas específicas são normalmente expressas em quilogramas por metro cúbico ou em gramas por centímetro cúbico. A massa específica da água (1,00 grama por centímetro cúbico) é muito usada para fins de comparação. A massa específica da neve fresca é de 10% da massa específica da água; a da platina é 21 vezes maior que a da água.

Exemplo 1-4

Um objeto pesado pode afundar no solo durante um terremoto se o tremor fizer com o que o solo passe por um processo de *liquefação*, no qual as partículas do solo deslizam umas em relação às outras quase sem atrito. Nesse caso, o solo se torna praticamente uma areia movediça. A possibilidade de liquefação de um solo arenoso pode ser prevista em termos do *índice de vazios e* de uma amostra do solo:

$$e = \frac{V_v}{V_p}. \tag{1-9}$$

onde V_p é o volume total das partículas de areia na amostra e V_v é o volume total do espaço entre as partículas (isto é, dos *vazios*). Se e excede o valor crítico de 0,80, pode ocorrer liquefação durante um terremoto. Qual é a massa específica da areia, ρ_a, correspondente ao valor crítico? A massa específica do dióxido de silício (principal componente da areia) é ρ_{SiO_2} $2{,}600 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$.

IDÉIA-CHAVE A massa específica da areia, ρ_a, em uma amostra é a massa por unidade de volume, ou seja, a razão entre a massa total m_a das partículas de areia e o volume total V_t da amostra:

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_t}. \tag{1-10}$$

Cálculos: O volume total V_t de uma amostra é dado por

$$V_t = V_p + V_v.$$

Substituindo V_v pelo seu valor, dado pela Eq. 1-9, e explicitando V_p, obtemos:

$$V_p = \frac{V_t}{1+e}. \tag{1-11}$$

De acordo com a Eq. 1-8, a massa total m_a das partículas de areia é o produto da massa específica do dióxido de silício pelo volume total das partículas de areia:

$$m_a = \rho_{SiO_2} V_p, \tag{1-12}$$

Substituindo esta expressão na Eq. 1-10 e substituindo V_p pelo seu valor, dado pela Eq. 1-11, obtemos:

$$\rho_a = \frac{\rho_{SiO_2}}{V_t}\frac{V_t}{1+e} = \frac{\rho_{SiO_2}}{1+e}. \tag{1-13}$$

Fazendo $\rho_{SiO_2} = 2{,}600 \times 10^3$ kg/m^3 e $e = 0{,}80$ nesta equação, descobrimos que a liquefação acontece quando a massa específica da areia é maior que

$$\rho_a = \frac{2{,}600 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}{1{,}80} = 1{,}4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

(Resposta)

REVISÃO E RESUMO

A Medição na Física A física se baseia na medição de grandezas físicas. Algumas grandezas físicas, como comprimento, tempo e massa, foram escolhidas como **grandezas fundamentais**; cada uma foi definida através de um **padrão** e recebeu uma **unidade** de medida (como metro, segundo e quilograma). Outras grandezas físicas são definidas em termos das grandezas fundamentais e de seus padrões e unidades.

Unidades do SI O sistema de unidades adotado neste livro é o Sistema Internacional de Unidades (SI). As três grandezas físicas mostradas na Tabela 1-1 são usadas nos primeiros capítulos. Os padrões, que têm que ser acessíveis e invariáveis, foram estabelecidos para essas grandezas fundamentais por um acordo internacional. Esses padrões são usados em todas as medições físicas, tanto das grandezas fundamentais quanto das grandezas secundárias. A notação científica e os prefixos da Tabela 1-2 são usados para simplificar a notação das medições.

Mudança de Unidades A conversão de unidades pode ser feita usando o método de *conversão em cadeia*, no qual os dados originais são multiplicados sucessivamente por fatores de conversão unitários e as unidades são manipuladas como quantidades algébricas até que apenas as unidades desejadas permaneçam.

Comprimento O metro é definido como a distância percorrida pela luz durante um intervalo de tempo especificado.

Tempo O segundo é definido em termos das oscilações da luz emitida por um isótopo de um certo elemento químico (césio-133). Sinais de tempo precisos são enviados a todo o mundo através de sinais de rádio sincronizados por relógios atômicos em laboratórios de padronização.

Massa O quilograma é definido em termos de um padrão de massa de platina-irídio mantido em um laboratório nas vizinhanças de Paris. Para medições em escala atômica é comumente usada a unidade de massa atômica, definida em termos do átomo de carbono-12.

Massa específica A massa específica ρ de uma substância é a massa por unidade de volume:

$$\rho = \frac{m}{V}. \tag{1-8}$$

PROBLEMAS

• – ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 1-5 Comprimento

•1 O micrômetro (1 μm) também é chamado de *mícron*. (a) Quantos mícrons tem 1,0 km? (b) Que fração do centímetro é igual a 1,0 μm? (c) Quantos mícrons tem uma jarda?

•2 As dimensões das letras e espaços de um livro são expressas em termos de pontos e paicas: 12 pontos = 1 paica e 6 paicas = 1 polegada. Se em uma das provas do livro uma figura apareceu deslocada de 0,80 em relação à posição correta, qual foi o deslocamento (a) em paicas e (b) em pontos?

•3 Em um certo hipódromo da Inglaterra, um páreo foi disputado em uma distância de 4,0 furlongs. Qual é a distância da corrida em (a) varas e (b) cadeias? (1 furlong = 201,168 m, 1 vara = 5,0292 m e uma cadeia = 20,117 m.)

•4 Um *gry* é uma antiga medida inglesa de comprimento, definida como 1/10 de uma linha; *linha* é uma outra medida inglesa de comprimento, definida como 1/12 de uma polegada. Uma medida comum usada nas editoras é o *ponto*, definido como 1/72 de uma polegada. Quanto vale uma área de 0,50 gry^2 em pontos quadrados (points^2)?

•5 A Terra tem a forma aproximada de uma esfera com $6{,}37 \times 10^6$ m. Determine (a) a circunferência da Terra em quilômetros, (b) a área da superfície da Terra em quilômetros quadrados e (c) o volume da Terra em quilômetros cúbicos.

••6 A ponte de Harvard, que liga o MIT às sociedades estudantis através do rio Charles, tem um comprimento de 364,4 smoots mais uma orelha. A unidade de um smoot se baseia no comprimento de Oliver Reed Smoot, Jr., classe de 1962, que foi carregado ou arrastado pela ponte para que outros membros da sociedade Lambda Chi Alpha pudessem marcar (com tinta) comprimentos de 1 Smoot ao longo da ponte. As marcas têm sido refeitas semestralmente por membros da sociedade, normalmente em horários de pico, para que a polícia não possa interferir facilmente. (Os policiais podem ter ficado aborrecidos porque o Smoot não é uma unidade fundamental do SI, mas hoje em dia

parecem ter aceito a unidade.) A Fig. 1-4 mostra três segmentos de reta paralelos medidas em Smoots (S), Willies (W) e Zeldas (Z). Quanto vale uma distância de 50,0 Smoots (a) em Willies e (b) em Zeldas?

FIG. 1-4 Problema 6.

••7 A Antártica é aproximadamente semicircular, com um raio de 2000 km (Fig. 1-5). A espessura média da cobertura de gelo é de 3000 m. Quantos centímetros cúbicos de gelo contém a Antártica? (Ignore a curvatura da Terra.)

FIG. 1-5 Problema 7.

••8 Hoje em dia, as conversões de unidades mais comuns podem ser feitas com o auxílio de calculadoras e computadores, mas é importante que o aluno saiba usar uma tabela de conversão como as do Apêndice D. A Tabela 1-6 é parte de uma tabela de conversão para um sistema de medidas de volume que já foi comum na Espanha: um volume de 1 fanega equivale a 55,501 dm^3 (decímetros cúbicos). Para completar a tabela, que números (com três algarismos significativos) devem ser inseridos (a) na coluna de cahiz, (b) na coluna de fanegas, (c) na coluna de cuartillas e (d) na coluna de almudes? Expresse 7,00 almudes em (e) medios, (f) cahizes e (g) centímetros cúbicos (cm^3).

TABELA 1-6

Problema 8

	cahiz	fanegas	cuartillas	almudes	medios
1 cahiz =	1	12	48	144	288
1 fanega =		1	4	12	24
1 cuartilla =			1	3	6
1 almude =				1	2
1 medio =					1

••9 Os engenheiros hidráulicos dos Estados Unidos usam freqüentemente, como unidade de volume de água, o *acre-pé*, definido como um volume de água suficiente para cobrir 1 acre de terra até uma profundidade de 1 pé. Uma forte tempestade despejou 2,0 polegadas de chuva em 30 min em uma cidade com uma área de 26 km^2. Que volume de água, em acres-pés, caiu sobre a cidade?

seção 1-6 Tempo

•10 A planta de crescimento mais rápido de que se tem notícia é uma *Hesperoyucca whipplei*, que cresceu 3,7 m em 14 dias. Qual foi a velocidade de crescimento da planta em micrômetros por segundo?

•11 O fortnight é uma simpática medida inglesa de tempo igual a 2,0 semanas (a palavra é uma contração de "fourteen nights", ou seja, quatorze noites). Pode ser um tempo adequado para passar com uma companhia agradável, mas uma dolorosa seqüência de microssegundos se for passado com uma companhia desagradável. Quantos microssegundos existem em um fortnight?

•12 Um tempo de aula (50 min) é aproximadamente igual a 1 microssécul o. (a) Qual é a duração de um microssécul o em minutos? (b) Usando a relação

$$\text{erro percentual} = \left(\frac{\text{real} - \text{aproximado}}{\text{real}}\right) 100,$$

determine o erro percentual dessa aproximação.

•13 Por cerca de 10 anos após a Revolução Francesa o governo francês tentou basear as medidas de tempo em múltiplos de dez: uma semana tinha 10 dias, um dia tinha 10 horas, uma hora consistia em 100 minutos e um minuto consistia em 100 segundos. Quais são as razões (a) da semana decimal francesa para a semana comum e (b) do segundo decimal francês para o segundo comum?

•14 Os padrões de tempo são baseados atualmente em relógios atômicos. Um padrão promissor para o segundo é baseado em *pulsares*, que são estrelas de nêutrons (estrelas altamente compactas compostas apenas de nêutrons) que possuem um movimento de rotação. Alguns pulsares giram com velocidade constante, produzindo um sinal de rádio que passa pela superfície da Terra uma vez a cada rotação, como o feixe de luz de um farol. O pulsar PSR 1937+21 é um exemplo; ele gira uma vez a cada 1,557 806 448 872 75 ± 3 ms, em que o símbolo ±3 indica a incerteza na última casa decimal (*não significa* ±3 ms). (a) Quantas rotações o PSR 1937+21 executa em 7,00 dias? (b) Quanto tempo o pulsar leva para girar exatamente um milhão de vezes, e (c) qual é a incerteza associada?

•15 Três relógios digitais, *A*, *B* e *C*, funcionam com velocidades diferentes e não têm leituras simultâneas de zero. A Fig. 1-6 mostra leituras simultâneas de pares dos relógios em quatro ocasiões. (Na primeira ocasião, por exemplo, *B* indica 25,0 s e *C* indica 92,0 s.) Se o intervalo entre dois eventos é de 600 s, de acordo com o relógio *A*, qual é o intervalo entre os eventos (a) no relógio *B* e (b) no relógio *C*? (c) Quando o relógio *A* indica 400 s, qual é a indicação do relógio *B*? (d) Quando o relógio *C* indica 15,0 s, qual é a indicação do relógio *B*? (Suponha que as leituras são negativas para instantes anteriores a zero.)

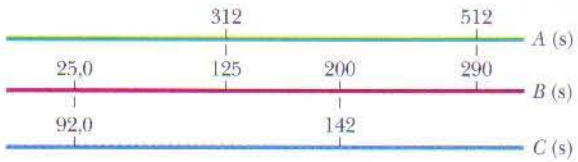


FIG. 1-6 Problema 15.

•16 Até 1913, cada cidade do Brasil tinha sua hora local. Hoje em dia os viajantes acertam o relógio apenas quando a variação de tempo é igual a 1,0 h (o que corresponde a um fuso horário). Que distância, em média, uma pessoa deve percorrer, em graus de longitude, para passar de um fuso horário a outro e ter que acertar o relógio? (*Sugestão:* A Terra gira 360° em aproximadamente 24 h.)

•17 Cinco relógios estão sendo testados em um laboratório. Exatamente ao meio-dia, de acordo com o Observatório Nacional, em dias sucessivos da semana as leituras dos relógios foram anotadas na tabela a seguir. Coloque os relógios em ordem de confiabilidade, começando pelo melhor. Justifique sua escolha.

Relógio	Dom.	Seg.	Ter.	Qua.	Qui.	Sex.	Sáb.
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

••18 Como a velocidade de rotação da Terra está diminuindo gradualmente, a duração dos dias está aumentando: o dia no final de 1,0 século é 1,0 ms mais longo que o dia no início do século. Qual é o aumento da duração do dia após 20 séculos?

•••19 Suponha que você está deitado na praia, perto do equador, vendo o Sol se pôr em um mar calmo, e liga um cronômetro no momento em que o Sol desaparece. Em seguida, você se levanta, deslocando os olhos para cima de uma distância $H = 1{,}70$ m, e desliga o cronômetro no momento em que o Sol volta a desaparecer. Se o tempo indicado pelo cronômetro é $t = 11{,}1$ s, qual é o raio da Terra?

seção 1-7 Massa

•20 O ouro, que tem uma massa específica de 19,32 g/cm^3, é um metal extremamente dúctil e maleável, isto é, pode ser transformado em fios ou folhas muito finas. (a) Se uma amostra de ouro, com uma massa de 27,63 g, é prensada até se tornar uma folha com 1,000 μm de espessura, qual é a área dessa folha? (b) Se, em vez disso, o ouro é transformado em um fio cilíndrico com 2,500 μm de raio, qual é o comprimento do fio?

•21 (a) Supondo que a água tenha uma massa específica de exatamente 1 g/cm^3, determine a massa de um metro cúbico de água em quilogramas. (b) Suponha que são necessárias 10,0 h para drenar um recipiente com 5700 m^3 de água. Qual é a "vazão de massa" da água do recipiente, em quilogramas por segundo?

•22 O recorde para a maior garrafa de vidro foi estabelecido em 1992 por uma equipe de Millville, Nova Jersey, que soprou uma garrafa com um volume de 193 galões americanos. (a) Qual é a diferença entre esse volume e 1,0 milhão de centímetros cúbicos? (b) Se a garrafa fosse enchida com água a uma vazão de 1,8 g/min, em quanto tempo estaria cheia? A massa específica da água é de 1000 kg/m^3.

•23 A Terra tem uma massa de $5{,}98 \times 10^{24}$ kg. A massa média dos átomos que compõem a Terra é 40 u. Quantos átomos existem na Terra?

••24 Em um centímetro cúbico de uma nuvem cúmulo típica existem de 50 a 500 gotas d'água, com um raio típico de 10 μm. Para essa faixa de valores, determine os valores mínimo e máximo, respectivamente, das seguintes grandezas: (a) número de metros cúbicos de água numa nuvem cúmulo cilíndrica com 3,0 km de altura e 1,0 km de raio; (b) número de garrafas de 1 litro que podem ser enchidas com essa quantidade de água; (c) a massa da água contida nessa nuvem, sabendo que a massa específica da água é de 1000 kg/m^3.

••25 A massa específica do ferro é de 7,87 g/cm^3, e a massa de um átomo de ferro é de $9{,}27 \times 10^{-26}$ kg. Se os átomos são esféricos e estão densamente compactados, (a) qual é o volume de um átomo de ferro e (b) qual é a distância entre os centros de dois átomos vizinhos?

••26 Um mol de átomos contém $6{,}02 \times 10^{23}$ átomos. Qual é a ordem de grandeza do número de átomos que existem em um gato grande? As massas de um átomo de hidrogênio, de um átomo de oxigênio e de um átomo de carbono são 1,0 u, 16 u e 12 u, respectivamente.

••27 Em uma viagem à Malásia você não resiste à tentação e compra um touro que pesa 28,9 piculs no sistema local de unidades de peso: 1 picul = 100 gins, 1 gin = 16 tahils, 1 tahil = 10 chees e 1 chee = 10 hoons. O peso de 1 hoon corresponde a uma massa de 0,3779 g. Quando você despacha o boi para casa, que massa deve declarar à alfândega? (*Sugestão:* Use conversões em cadeia.)

••28 Os grãos de areia das praias da Califórnia são aproximadamente esféricos, com um raio de 50 μm, e são feitos de dióxido de silício, que tem uma massa específica de 2600 kg/m^3. Que massa de grãos de areia possui uma área superficial total (soma das áreas de todas as esferas) igual à área da superfície de um cubo com 1,00 m de aresta?

••29 Durante uma tempestade, parte da encosta de uma montanha, com 2,5 km de largura, 0,80 km de altura ao longo da encosta e 2,0 m de espessura, desliza até um vale em uma avalanche de lama. Suponha que a lama fique distribuída uniformemente em uma área quadrada do vale com 0,40 km de lado e que ela tenha uma massa específica de 1900 kg/m^3. Qual é a massa da lama existente em uma área de 4,0 m^2 do vale?

••30 Despeja-se água em um recipiente que possui um vazamento. A massa m de água no recipiente em função do tempo t é dada por $m = 5{,}00t^{0,8} - 3{,}00t + 20{,}00$ para $t \geq 0$, onde a massa está em gramas e o tempo em segundos. (a) Em que instante a massa de água é máxima? (b) Qual é o valor dessa massa? Qual é taxa de variação da massa, em quilogramas por minuto, (c) em $t = 2{,}00$ s e (d) em $t = 5{,}00$ s?

•••31 Um recipiente vertical cuja base mede 14,0 cm por 17,0 cm está sendo enchido com barras de chocolate que possuem um volume de 50 mm^3 e uma massa de 0,0200 g. Suponha que o espaço vazio entre as barras de chocolate é tão pequeno que pode ser desprezado. Se a altura das barras de chocolate no recipiente aumenta à razão de 0,250 cm/s, qual é a taxa de aumento da massa das barras de chocolate no recipiente em quilogramas por minuto?

Problemas Adicionais

32 A Tabela 1-7 mostra algumas unidades antigas de volume de líquidos. Para completar a tabela, que números (com três algarismos significativos) devem ser introduzidos (a) na coluna de weys; (b) na coluna de chaldrons; (c) na coluna de bags; (d) na coluna de pottles; (e) na coluna da gills? (f) O volume de 1 bag equivale a 0,1091 m^3. Em uma história antiga, uma feiticeira prepara uma poção mágica em um caldeirão com um volume de 1,5 chaldron. Qual é o volume do caldeirão em metros cúbicos?

TABELA 1-7

Problema 32

	weys	chaldrons	bags	pottles	gills
1 wey =	1	10/9	40/3	640	120 240
1 chaldron =					
1 bag =					
1 pottle =					
1 gill =					

33 Uma antiga poesia infantil inglesa diz o seguinte: "Little Miss Muffet sat on a tuffet, eating her curds and whey, when along came a spider who sat down beside her." ("A pequena

Miss Muffet estava sentada em um banquinho, comendo queijo cottage, quando chegou uma aranha e sentou-se ao seu lado.") A aranha não se aproximou por causa do queijo, e sim porque Miss Muffet tinha 11 tuffets de moscas secas. O volume de um tuffet é dado por 1 tuffet = 2 pecks = 0,50 Imperial bushel, em que 1 Imperial bushel = 36,3687 litros (L). Qual era o volume das moscas de Miss Muffet em (a) pecks; (b) Imperial bushels; (c) litros?

34 Um antigo manuscrito revela que um proprietário de terras no tempo do rei Artur possuía 3,00 acres de terra cultivada e uma área para criação de gado de 25,0 perchas por 4,00 perchas. Qual era a área total (a) na antiga unidade de roods e (b) na unidade mais moderna de metros quadrados? 1 acre é uma área de 40 perchas por 4 perchas, 1 rood é uma área de 40 perchas por 1 percha, e 1 percha equivale a 16,5 pés.

35 Um turista americano compra um carro na Inglaterra e o despacha para os Estados Unidos. Um adesivo no carro informa que o consumo de combustível do carro é de 40 milhas por galão na estrada. O turista não sabe que o galão inglês é diferente do galão americano:

1 galão inglês = 4,545 963 1 litros
1 galão americano = 3,785 306 0 litros.

Para fazer uma viagem de 750 milhas nos Estados Unidos, de quantos galões de combustível (a) o turista pensa que precisa e (b) o turista realmente precisa?

36 Dois tipos de *barril* foram usados como unidades de volume na década de 1920 nos Estados Unidos. O barril de maçã tinha um volume oficial de 7056 polegadas cúbicas; o barril de cranberry, 5826 polegadas cúbicas. Se um comerciante vende 20 barris de cranberry a um freguês que pensa estar recebendo barris de maçã, qual é a diferença de volume em litros?

37 Uma certa marca de tinta de parede promete uma cobertura de 460 pés quadrados por galão. (a) Expresse este valor em metros quadrados por litro. (b) Expresse este valor em uma unidade do SI (veja os Apêndices A e D). (c) Qual é o inverso da grandeza original e (d) qual é o seu significado físico?

38 Nos Estados Unidos, uma casa de boneca tem uma escala de 1:12 em relação a uma casa de verdade (ou seja, cada comprimento na casa de boneca é 1/12 do comprimento correspondente na casa de verdade), e uma casa em miniatura (uma casa de boneca feita para caber em uma casa de boneca) tem uma escala de 1:144 em relação a uma casa de verdade. Suponha que uma casa de verdade (Fig. 1-7) tem 20 m de comprimento, 12 m de largura, 6,0 m de altura e um telhado inclinado padrão (com o perfil de um triângulo isósceles) de 3,0 m de altura. Qual é o volume, em metros cúbicos, (a) da casa de bonecas e (b) da casa em miniatura correspondente?

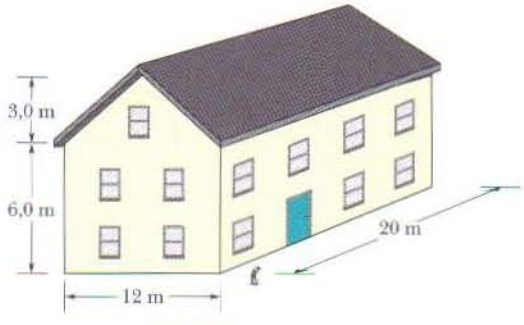


FIG. 1-7 Problema 38.

39 O *cord* é um volume de madeira cortada correspondente a uma pilha de 8 pés de comprimento, 4 pés de largura e 4 pés de altura. Quantos cords existem em 1,0 m^3 de madeira?

40 Uma molécula de água (H_2O) contém dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio. Um átomo de hidrogênio tem uma massa de 1,0 u, e um átomo de oxigênio tem uma massa de 16 u, aproximadamente. (a) Qual é a massa de uma molécula de água em quilogramas? (b) Quantas moléculas de água existem nos oceanos da Terra, cuja massa estimada é $1,4 \times 10^{21}$ kg?

41 A tonelada é uma medida de volume freqüentemente usada no transporte de mercadorias, mas seu uso requer uma certa cautela, pois existem pelo menos três tipos de tonelada: uma *tonelada de deslocamento* é igual a 7 barrels bulk, uma *tonelada de frete* é igual a 8 barrels bulk e uma *tonelada de registro* é igual a 20 barrels bulk. O *barrel bulk* é outra medida de volume: 1 barrel bulk = 0,1415 m^3. Suponha que você esteja analisando um pedido de "73 toneladas" de chocolate M&M e tenha certeza de que o cliente que fez a encomenda usou "tonelada" como unidade de volume (e não como de peso ou de massa, como será discutido no Capítulo 5). Se o cliente estava pensando em toneladas de deslocamento, quantos alqueires americanos em excesso você vai despachar se interpretar equivocadamente o pedido como (a) 73 toneladas de frete e (b) 73 toneladas de registro? (1 m^3 = 28,378 alqueires americanos.)

42 O vinho de uma grande festa de casamento será servido em um deslumbrante vaso de vidro lapidado com dimensões internas de 40 cm × 40 cm × 30 cm (altura). O vaso deve ser enchido até a borda. O vinho pode ser adquirido em garrafas, cujos tamanhos aparecem na tabela a seguir. É mais barato comprar uma garrafa de vinho maior do que o mesmo volume em garrafas menores. (a) Para minimizar o custo, que tamanhos de garrafa devem ser escolhidos e quantas garrafas de cada tamanho devem ser adquiridas? Depois que o vaso é cheio, quanto vinho sobra (b) em número de garrafas normais e (c) em litros?

1 garrafa normal

1 magnum = 2 garrafas normais

1 jeroboão = 4 garrafas normais

1 roboão = 6 garrafas normais

1 matusalém = 8 garrafas padrões

1 salmanasar = 12 garrafas normais

1 baltasar = 16 garrafas normais = 11,356 L

1 nabucodonosor = 20 garrafas normais

43 Um cubo de açúcar típico tem 1 cm de aresta. Qual é o valor da aresta de uma caixa cúbica com capacidade suficiente para conter um mol de cubos de açúcar? (Um mol = $6,02 \times 10^{23}$ unidades.)

44 Usando os dados fornecidos neste capítulo, determine o número de átomos de hidrogênio necessários para obter 1,0 kg de hidrogênio. Um átomo de hidrogênio tem uma massa de 1,0 u.

45 Uma unidade astronômica (UA) é a distância média entre a Terra e o Sol, aproximadamente $1,50 \times 10^8$ km. A velocidade da luz é de aproximadamente $3,0 \times 10^8$ m/s. Expresse a velocidade da luz em unidades astronômicas por minuto.

46 Que massa de água caiu sobre a cidade no Problema 9? A massa específica da água é $1,0 \times 10^3$ kg/m^3.

47 Uma pessoa que esteja de dieta pode perder 2,3 kg por semana. Expresse a taxa de perda de massa em miligramas por segundo, como se a pessoa pudesse sentir a perda segundo a segundo.

48 A *razão milho-porco* é um termo financeiro usado no mercado de porcos, provavelmente relacionado ao custo de alimentar um porco até que ele seja suficientemente grande para ser vendido. É definida como a razão entre o preço de mercado de um porco com

uma massa de 3,108 slugs e o preço de mercado de um alqueire americano de milho. (A palavra "slug" é derivada de uma antiga palavra alemã que significa "golpear"; este é um dos possíveis significados de "slug" no inglês moderno.) Um alqueire americano equivale a 35,238 L. Se a razão milho-porco está cotada a 5,7 na bolsa de mercadorias, determine o seu valor em unidades métricas de

$$\frac{\text{preço de 1 quilograma de porco}}{\text{preço de 1 litro de milho}}$$

(*Sugestão:* Consulte a tabela de conversão de unidades de massa do Apêndice D.)

49 Você foi encarregado de preparar um jantar para 400 pessoas em um encontro de apreciadores de comida mexicana. A receita recomenda usar duas pimentas jalapeño em cada porção (uma porção por pessoa). Entretanto, você dispõe apenas de pimentas habanero. O grau de ardência das pimentas é medido em termos da *unidade de calor de scoville* (UCS). Em média, uma pimenta jalapeño tem uma ardência de 4000 UCS e uma pimenta habanero tem uma ardência de 300 000 UCS. Quantas pimentas habanero você deve usar no lugar das pimentas jalapeño da receita para obter o grau de ardência desejado nos 400 pratos do jantar?

50 Uma unidade de área freqüentemente usada na medição de áreas de terrenos é o *hectare*, definido como 10^4 m^2. Uma mina de carvão a céu aberto consome anualmente 75 hectares de terra até uma profundidade de 26 m. Qual é o volume de terra removido por ano em quilômetros cúbicos?

51 (a) O *shake* é uma unidade de tempo usada informalmente pelos físicos nucleares. Um shake é igual a 10^{-8} s. Existem mais shakes em um segundo do que segundos em um ano? (b) O homem existe há aproximadamente 10^6 anos, enquanto a idade do universo é cerca de 10^{10} anos. Se a idade do universo é definida como 1 "dia do universo", dividido em "segundos do universo", como um dia comum é dividido em segundos comuns, há quantos segundos do universo o homem existe?

52 Para ter uma idéia da diferença entre o antigo e o moderno e entre o grande e o pequeno, considere o seguinte: na antiga Inglaterra rural, 1 hide (entre 100 e 120 acres) era a área de terra necessária para sustentar uma família com um arado durante um ano. (Uma área de 1 acre equivale a 4047 m^2.) Além disso, 1 wapentake era a área de terra necessária para 100 famílias na mesmas condições. Na física quântica, a área da seção de choque de um núcleo (definida através da probabilidade de que uma partícula incidente seja absorvida pelo núcleo) é medida em barns; 1 barn = 1×10^{-28} m^2. (No jargão da física nuclear, se um núcleo é "grande", acertá-lo com uma partícula é tão fácil quanto acertar um tiro em um celeiro.) Qual é a razão entre 25 wapentakes e 11 barns?

53 Uma unidade de comprimento tradicional no Japão é o ken (1 ken = 1,97 m). Determine a razão (a) entre kens quadrados e metros quadrados e (b) entre kens cúbicos e metros cúbicos. Qual é o volume de um tanque de água cilíndrico com 5,50 kens de altura e 3,00 kens de raio (c) em kens cúbicos e (d) em metros cúbicos?

54 Você foi encarregado de navegar 24,5 milhas para leste, de modo a posicionar seu barco de salvamento exatamente sobre a posição de um navio pirata afundado. Quando os mergulhadores não encontram nenhum sinal do navio, você se comunica com a base e descobre que deveria ter percorrido 24,5 *milhas náuticas*, e não milhas comuns. Use a tabela de conversão de unidades de comprimento do Apêndice D para calcular a distância em quilômetros entre sua posição atual e o local onde o navio pirata afundou.

55 Os degraus de uma escada têm 19 cm de altura e 23 cm de largura. As pesquisas mostram que a escada será mais segura na descida se a largura dos degraus for aumentada para 28 cm. Sabendo que a altura da escada é de 4,57 m, qual será o aumento da distância horizontal coberta pela escada se a modificação da largura dos degraus for executada?

56 A toupeira comum tem uma massa de aproximadamente 75 g, que corresponde a cerca de 7,5 mols de átomos. (Um mol de átomos corresponde a $6{,}02 \times 10^{23}$ átomos.) Qual é a massa total dos átomos de uma toupeira em unidades de massa atômica (u)?

57 A *unidade astronômica* (UA) é a distância média entre a Terra e o Sol, cerca de $92{,}9 \times 10^6$ milhas. O *parsec* (pc) é a distância para a qual uma distância de 1 UA subtende um ângulo de exatamente 1 segundo de arco (Fig. 1-8). O *ano-luz* é a distância que a luz, viajando no vácuo com uma velocidade de 186 000 milhas por segundo, percorre em 1,0 ano. Expresse a distância entre a Terra e o Sol (a) em parsecs e (b) em anos-luz.

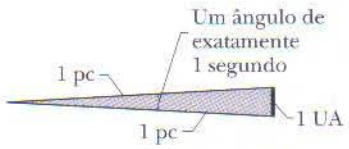


FIG. 1-8 Problema 57.

58 Ao comprar comida para uma reunião de políticos você encomendou erroneamente ostras do Pacífico sem casca de tamanho médio (um pint americano contém 8 a 12 dessas ostras), em vez de ostras do Atlântico sem casca de tamanho médio (um pint americano contém 26 a 38 dessas ostras). As ostras chegaram em uma caixa de isopor cujas dimensões internas são 1,0 m × 12 cm × 20 cm, e um pint americano equivale a 0,4732 litro. Quantas ostras a menos você pediu?

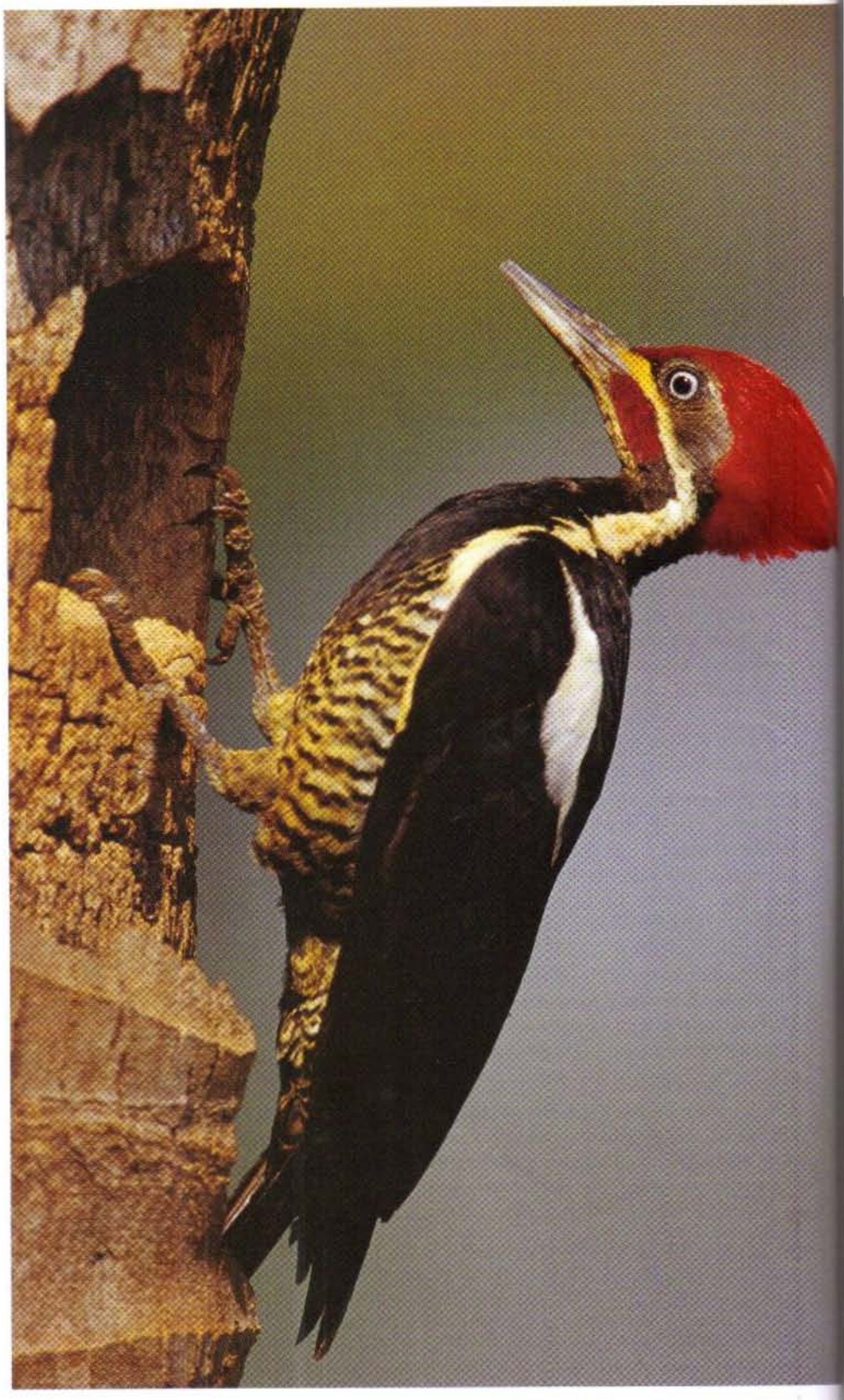
59 O cúbito é uma antiga unidade de comprimento baseada na distância entre o cotovelo e a ponta do dedo médio. Suponha que essa distância estivesse entre 43 e 53 cm e que gravuras antigas mostrem que uma coluna cilíndrica tinha 9 cúbitos de altura e 2 cúbitos de diâmetro. Determine os valores mínimo e máximo, respectivamente, (a) da altura da coluna em metros; (b) da altura da coluna em milímetros; (c) do volume da coluna em metros cúbicos.

60 Um antigo livro de culinária inglesa contém a seguinte receita de sopa de creme de urtiga: "Ferva um caldo com a seguinte quantidade de água: 1 xícara inglesa mais 1 xícara de chá mais 6 colheres de sopa mais uma colher de sobremesa. Usando luvas, separe as folhas de urtiga até que você tenha 0,5 quarto; adicione as folhas ao caldo em ebulição. Adicione uma colher de sopa de arroz cozido e uma colher de sal de sal. Deixe ferver durante 15 minutos". A tabela a seguir fornece fatores de conversão entre antigas medidas inglesas e medidas americanas. (Essas medidas clamam pela adoção do sistema métrico.) Para medidas de líquidos, 1 colher de chá inglesa = 1 colher de chá americana. Para medidas de sólidos, 1 colher de chá inglesa = 2 colheres de chá americanas, e 1 quart inglês = 1 quart americano. Qual o volume (a) de caldo, (b) de folhas de urtiga, (c) de arroz e (d) de sal usado na receita, em unidades americanas?

Medidas Inglesas Antigas	Medidas Americanas
colher de chá = 2 colheres de sal	colher de sopa = 3 colheres de chá
colher de sobremesa = 2 colheres de chá	meia xícara = 8 colheres de sopa
colher de sopa = 2 colheres de sobremesa	xícara = 2 meias xícaras
xícara de chá = 8 colheres de sopa	
xícara inglesa = 2 xícaras de chá	

2 Movimento Retilíneo

Um pica-pau bate repetidamente com o bico no tronco de uma árvore para procurar insetos para comer, para criar um depósito ou para anunciar que está à procura de uma parceira. O movimento em direção ao tronco pode ser muito rápido, mas a desaceleração quando o bico se choca com a madeira é quase instantânea, e seria fatal para um ser humano. Na verdade, um pica-pau deveria cair da árvore, morto ou inconsciente, toda vez que batesse com o bico no tronco. Entretanto, ele não só sobrevive como repete o movimento, produzindo um som de metralhadora.



Fonte: Jeremy Woodhouse/Masterfile

Como um pica-pau pode sobreviver aos violentos impactos de seu bico em uma árvore?

A resposta está neste capítulo.

2-1 O QUE É FÍSICA?

Um dos propósitos da física é estudar o movimento dos objetos: a rapidez com que se movem, por exemplo, ou a distância percorrida em um dado intervalo de tempo. Os engenheiros da NASCAR são fanáticos por esses aspectos da física quando determinam o desempenho dos seus carros antes e durante uma corrida. Os geólogos usam essa física para estudar o movimento de placas tectônicas na tentativa de prever terremotos. Os médicos necessitam dessa física para mapear o fluxo de sangue em um paciente quando examinam uma artéria parcialmente obstruída, e motoristas a usam para tentar reduzir a velocidade e escapar de uma multa quando percebem que existe um radar à frente. Existem inúmeros outros exemplos. Neste capítulo, estudamos a física básica do movimento nos casos em que o objeto (carro de corrida, placa tectônica, célula sangüínea ou qualquer outro) está se movendo em linha reta. Este tipo de movimento é chamado de *movimento unidimensional*.

2-2 | Movimento

O mundo, e tudo que nele existe, está sempre em movimento. Mesmo objetos aparentemente estacionários, como uma estrada, estão em movimento por causa da rotação da Terra, da órbita da Terra em torno do Sol, da órbita do Sol em torno do centro da Via Láctea e do movimento da Via Láctea em relação às outras galáxias. A classificação e a comparação dos movimentos (chamada de **cinemática**) podem ser um desafio. O que exatamente deve ser medido? Com que deve ser comparado?

Antes de tentarmos responder a essas perguntas, vamos examinar algumas propriedades gerais do movimento unidimensional, restringindo nossa análise de três formas.

1. Vamos supor que o movimento se dá ao longo de uma linha reta. A trajetória pode ser vertical, horizontal ou inclinada, mas deve ser retilínea.
2. Vamos discutir apenas o movimento em si e suas mudanças, sem nos preocuparmos com as suas causas. As forças (empurrões e puxões) modificam o movimento, mas não serão discutidas até o Capítulo 5.
3. Vamos supor que o objeto em movimento é uma **partícula** (ou seja, um objeto pontual, como um elétron) ou um objeto que se move como uma partícula (isto é, todas as partes do objeto se movem na mesma direção e com a mesma rapidez). Assim, por exemplo, podemos imaginar que o movimento de um porco rígido deslizando em um escorrega é semelhante ao de uma partícula; não podemos dizer o mesmo, porém, de uma bola rolando em uma mesa de sinuca.

2-3 | Posição e Deslocamento

Localizar um objeto significa determinar sua posição em relação a um ponto de referência, freqüentemente a **origem** (ou ponto zero) de um eixo como o eixo x da Fig. 2-1. O **sentido positivo** do eixo é o sentido dos números (coordenadas) crescentes, que na Fig. 2-1 é para a direita. O sentido oposto é o **sentido negativo**.

Assim, por exemplo, uma partícula pode estar localizada em $x = 5$ m, o que significa que está a 5 m da origem no sentido positivo. Se estivesse localizada em $x = -5$ m, estaria também a 5 m da origem, mas no sentido oposto. Sobre o eixo, uma coordenada de -5 m é menor que uma coordenada de -1 m, e ambas são menores que uma coordenada de +5 m. O sinal positivo de uma coordenada não precisa ser mostrado explicitamente, mas o sinal negativo deve sempre ser mostrado.

A uma mudança de uma posição x_1 para uma posição x_2 é associado um **deslocamento** Δx, dado por

$$\Delta x = x_2 - x_1. \tag{2-1}$$

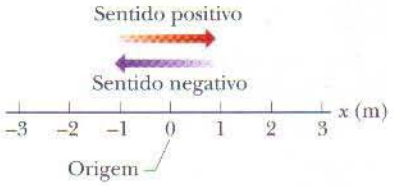


FIG. 2-1 A posição é determinada em um eixo marcado em unidades de comprimento (metros, por exemplo), que se estende indefinidamente nos dois sentidos. O nome do eixo, x, por exemplo, aparece sempre no lado positivo do eixo em relação à origem.

(O símbolo Δ, a letra grega delta maiúsculo, é usado para representar a variação de uma grandeza e corresponde à diferença entre o valor final e o valor inicial.) Quando atribuímos números às posições x_1 e x_2 da Eq. 2-1, um deslocamento no sentido positivo (para a direita na Fig. 2-1) sempre resulta em um deslocamento positivo, e um deslocamento no sentido oposto (para a esquerda na figura) sempre resulta em um deslocamento negativo. Assim, por exemplo, se uma partícula se move de $x_1 = 5$ m para $x_2 = 12$ m, $\Delta x = (12\text{ m}) - (5\text{ m}) = +7$ m. O resultado positivo indica que o movimento é no sentido positivo. Se, em vez disso, a partícula se move de $x_1 = 5$ m para $x_2 = 1$ m, $\Delta x = (1\text{ m}) - (5\text{ m}) = -4$ m. O resultado negativo indica que o movimento é no sentido negativo.

O número real de metros percorridos é irrelevante; o deslocamento envolve apenas as posições inicial e final. Assim, por exemplo, se a partícula se move de $x = 5$ m para $x = 200$ m e em seguida volta para $x = 5$ m, o deslocamento é $\Delta x = (5\text{ m}) - (5\text{ m}) = 0$.

O sinal positivo do deslocamento não precisa ser mostrado, mas o sinal negativo deve sempre ser mostrado. Quando ignoramos o sinal (e, portanto, o sentido) do deslocamento, ficamos com o **módulo** do deslocamento. Assim, por exemplo, a um deslocamento $\Delta x = -4$ m corresponde um módulo de 4 m.

O deslocamento é um exemplo de **grandeza vetorial**, uma grandeza que possui módulo, direção e sentido. Os vetores serão discutidos com mais detalhes no Capítulo 3 (na verdade, talvez alguns de vocês já tenham lido esse capítulo), mas tudo de que necessitamos no momento é a idéia de que o deslocamento tem duas características: (1) seu *módulo* é a distância (como, por exemplo, o número de metros) entre as posições inicial e final; (2) sua *direção*, de uma posição inicial para uma posição final, pode ser representada por um sinal positivo ou um sinal negativo se o movimento é retilíneo.

O que se segue é o primeiro dos muitos testes que o leitor encontrará neste livro. Estes testes contêm uma ou mais questões cujas respostas requerem um raciocínio ou cálculo mental e permitem verificar sua compreensão do ponto discutido. As respostas aparecem no final do livro.

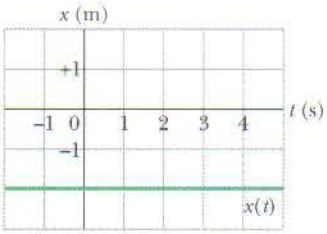


FIG. 2-2 Gráfico de $x(t)$ para um tatu que está em repouso em $x = -2$ m. O valor de x é –2 m para qualquer instante t.

TESTE 1 Considere três pares de posições iniciais e finais, respectivamente, ao longo do eixo x. A quais dos pares correspondem deslocamentos negativos: (a) −3 m, +5 m; (b) −3 m, −7 m; (c) 7 m, −3 m?

2-4 | Velocidade Média e Velocidade Escalar Média

Uma forma compacta de descrever a posição de um objeto é desenhar um gráfico da posição x em função do tempo t, ou seja, um gráfico de $x(t)$. [A notação $x(t)$ representa uma função x de t, e não o produto de x por t.] Como um exemplo simples, a Fig. 2-2 mostra a função posição $x(t)$ para um tatu em repouso (tratado como uma partícula) durante um intervalo de tempo de 7 s. A posição do animal tem sempre o mesmo valor, $x = -2$ m.

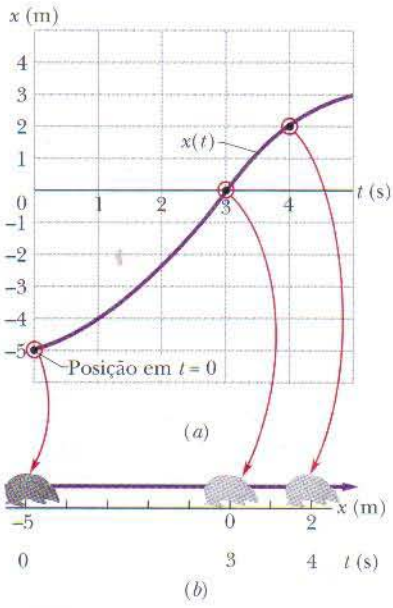


FIG. 2-3 (*a*) Gráfico de $x(t)$ para um tatu em movimento. (*b*) A trajetória associada ao gráfico. A escala abaixo do eixo x mostra os instantes nos quais o tatu atinge alguns valores de x.

A Fig. 2-3*a* é mais interessante, já que envolve movimento. O tatu é aparentemente avistado em $t = 0$, quando está na posição $x = -5$ m. Ele se move no sentido de $x = 0$, passa por esse ponto em $t = 3$ s e continua a se deslocar para maiores valores positivos de x. A Fig. 2-3*b* mostra o movimento real do tatu em linha reta, que é a trajetória que você veria. O gráfico da Fig. 2-3*a* é mais abstrato e bem diferente daquilo que você realmente veria, mas é muito mais rico em informações. Ele também revela com que rapidez o tatu se move.

Na verdade, várias grandezas estão associadas à expressão "com que rapidez". Uma é a **velocidade média** $v_{méd}$, que é a razão entre o deslocamento Δx e o intervalo de tempo Δt durante o qual esse deslocamento ocorre:

$$v_{méd} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \qquad (2\text{-}2)$$

A notação significa que a posição é x_1 no instante t_1 e x_2 no instante t_2. A unidade de $v_{méd}$ no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o metro por segundo (m/s). Outras unidades são usadas em alguns problemas, mas todas estão na forma de comprimento/tempo.

Em um gráfico de x em função de t, $v_{méd}$ é a **inclinação** da reta que liga dois pontos particulares da curva $x(t)$: um dos pontos corresponde a x_2 e t_2 e o outro a x_1 e t_1. Da mesma forma que o deslocamento, $v_{méd}$ também possui um módulo e uma direção (também é uma grandeza vetorial). O módulo é valor absoluto da inclinação da reta. Um valor positivo de $v_{méd}$ (e da inclinação) significa que a reta está inclinada para cima da esquerda para a direita; um valor negativo de $v_{méd}$ (e da inclinação) significa que a reta está inclinada para baixo da esquerda para a direita. A velocidade média $v_{méd}$ tem sempre o mesmo sinal do deslocamento Δx porque Δt na Eq. 2-2 é sempre positivo.

A Fig. 2-4 mostra como determinar $v_{méd}$ na Fig. 2-3 para o intervalo de tempo de $t = 1$ s a $t = 4$ s. Traçamos a linha reta que une os pontos correspondentes ao início e ao final do intervalo de tempo considerado. Em seguida, calculamos a inclinação $\Delta x/\Delta t$ da linha reta. Para o intervalo de tempo dado, a velocidade média é

$$v_{méd} = \frac{6\text{ m}}{3\text{ s}} = 2\text{ m/s}.$$

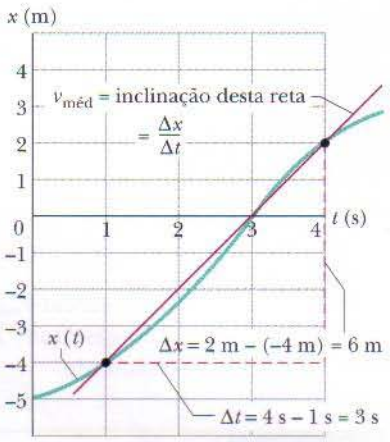


FIG. 2-4 Cálculo da velocidade média entre $t = 1$ s e $t = 4$ s como a inclinação da reta que une os pontos sobre a curva $x(t)$ que correspondem a esses tempos.

A **velocidade escalar média** $s_{méd}$ é uma forma diferente de descrever "com que rapidez" uma partícula está se movendo. Enquanto a velocidade média envolve o deslocamento da partícula Δx, a velocidade escalar média é definida em termos da distância total percorrida (o número de metros percorridos, por exemplo), independentemente da direção. Assim,

$$s_{méd} = \frac{\text{distância total}}{\Delta t}. \qquad (2\text{-}3)$$

Como a definição de velocidade escalar média *não inclui* a direção do movimento, ela não possui um sinal algébrico. Em alguns casos, $s_{méd}$ é igual (a não ser pela ausência de sinal) a $v_{méd}$. Entretanto, como é demonstrado no Exemplo 2-1, as duas velocidades podem ser bastante diferentes.

Exemplo 2-1

Depois de dirigir uma van em uma estrada retilínea por 8,4 km a 70 km/h, você pára por falta de gasolina. Nos 30 min seguintes você caminha por mais 2,0 km ao longo da estrada até chegar ao posto de gasolina mais próximo.

(a) Qual é o deslocamento total, desde o início da viagem até chegar ao posto de gasolina?

IDÉIA-CHAVE Suponha, por conveniência, que você se move no sentido positivo do eixo x, da posição inicial x_1 até a posição final x_2, no posto de gasolina. Essa segunda posição deve ser $x_2 = 8{,}4\text{ km} + 2{,}0\text{ km} = 10{,}4\text{ km}$. O deslocamento Δx ao longo do eixo x é a diferença entre a segunda posição e a primeira.

Cálculo: De acordo com a Eq. 2-1, temos:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 10{,}4\text{ km} - 0 = 10{,}4\text{ km}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Assim, o deslocamento total é de 10,4 km no sentido positivo do eixo x.

(b) Qual é o intervalo de tempo Δt entre o início da viagem e o instante em que você chega ao posto?

IDÉIA-CHAVE Já sabemos quanto tempo você passou caminhando, Δt_{cam} (0,50 h), mas não sabemos quanto tempo você passou dirigindo, Δt_{dir}. Sabemos, porém, que você viajou 8,4 km de carro a uma velocidade média $v_{méd,\,dir} = 70$ km/h. Esta velocidade média é igual à razão entre o deslocamento do carro e o intervalo de tempo correspondente a esse deslocamento.

Cálculos: Em primeiro lugar, sabemos que

$$v_{méd,\,dir} = \frac{\Delta x_{dir}}{\Delta t_{dir}}.$$

Explicitando Δt_{dir} e substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$\Delta t_{dir} = \frac{\Delta x_{dir}}{v_{méd,\,dir}} = \frac{8{,}4\text{ km}}{70\text{ km/h}} = 0{,}12\text{ h}.$$

e, portanto, $\Delta t = \Delta t_{dir} + \Delta t_{cam}$

$$= 0{,}12\text{ h} + 0{,}50\text{ h} = 0{,}62\text{ h}. \quad \text{(Resposta)}$$

(c) Qual é a velocidade média $v_{méd}$ do início da viagem até a chegada ao posto de gasolina? Determine a solução numericamente e graficamente.

IDÉIA-CHAVE De acordo com a Eq. 2-2, $v_{méd}$ *para todo o percurso* é a razão entre o deslocamento de 10,4 km *para todo o percurso* e o intervalo de tempo de 0,62 h *para todo o percurso*.

Cálculo: Neste caso,

$$v_{méd} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10{,}4\text{ km}}{0{,}62\text{ h}}$$

$$= 16{,}8\text{ km/h} \approx 17\text{ km/h}. \quad \text{(Resposta)}$$

Para determinar $v_{méd}$ graficamente traçamos o gráfico da função $x(t)$, como mostra a Fig. 2-5, onde os pontos de partida e chegada no gráfico são a origem e o ponto assinalado como "Posto". A velocidade média é a inclinação da reta que une esses pontos, ou seja, $v_{méd}$ é a razão entre a *elevação* (Δx = 10,4 km) e o *curso* (Δt = 0,62 h), o que nos dá $v_{méd}$ = 16,8 km/h.

(d) Suponha que para encher um bujão de gasolina, pagar e caminhar de volta para a van você leve 45 min. Qual é sua velocidade escalar média do início da viagem até o momento em que chega de volta ao lugar onde deixou a van?

IDÉIA-CHAVE A velocidade escalar média é a razão entre a distância total percorrida e o tempo gasto para percorrer essa distância.

Cálculo: A distância total é 8,4 km + 2,0 km + 2,0 km = 12,4 km. O intervalo de tempo total é 0,12 h + 0,50 h + 0,75 h = 1,37 h. Assim, de acordo com a Eq. 2-3,

$$s_{méd} = \frac{12{,}4\text{ km}}{1{,}37\text{ h}} = 9{,}1\text{ km/h}. \quad \text{(Resposta)}$$

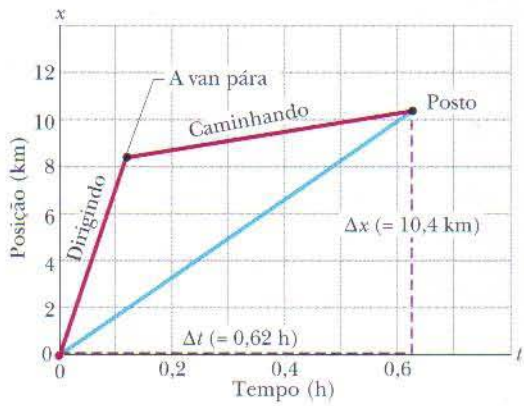


FIG. 2-5 As retas "Dirigindo" e "Caminhando" são os gráficos da posição em função do tempo para os deslocamentos de carro e a pé. (O gráfico para o deslocamento a pé supõe uma caminhada com velocidade constante.) A inclinação da reta que liga a origem ao ponto "Posto" é a velocidade média para o percurso até o posto.

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 1: *Você Compreende o Problema?* A dificuldade mais comum é simplesmente não compreender qual é o problema. A melhor forma de verificar se você compreendeu o problema é a seguinte: você seria capaz de explicá-lo a outra pessoa?

Escreva os dados fornecidos, com suas unidades, usando os símbolos do capítulo. [No Exemplo 2-1, os dados fornecidos permitem calcular o deslocamento Δx na parte (a) e o intervalo de tempo correspondente Δt na parte (b).] Identifique a incógnita e seu símbolo. (No exemplo, a incógnita da parte (c) é a velocidade média $v_{méd}$.) Determine a relação entre a incógnita e os dados. (A relação é fornecida pela Eq. 2-2, a definição de velocidade média.)

Tática 2: *As Unidades Estão Corretas?* Antes de substituir valores numéricos nas equações, certifique-se de que as unidades usadas são compatíveis. No Exemplo 2-1 é natural, diante dos dados fornecidos, usar quilômetros para distâncias, horas para intervalos de tempo e quilômetros por hora para velocidades. Muitas vezes é preciso converter algumas unidades para torná-las compatíveis com outras.

Tática 3: *A Resposta Obtida É Razoável?* A resposta fez sentido ou parece muito grande ou muito pequena? O sinal está correto? As unidades são apropriadas? Na parte (*c*) do Exemplo 2-1, por exemplo, a resposta correta é 17 km/h. Se você encontrasse 0,00017 km/h, −17 km/h, 17 km/s ou 17000 km/h deveria perceber imediatamente que cometeu um erro. O erro pode estar no método usado, nos cálculos ou no modo como os dados foram digitados em uma calculadora.

Tática 4: *Interpretação de Gráficos* As Figs. 2-2, 2-3*a*, 2-4 e 2-5 são gráficos que você deve ser capaz de interpretar com facilidade. Em cada um desses gráficos, a variável associada ao eixo horizontal é o tempo *t*, com o tempo aumentando para a direita. A variável associada ao eixo vertical é a posição *x* da partícula em movimento em relação à origem, com o valor que define a posição aumentando para cima. Preste sempre atenção nas unidades (segundos ou minutos; metros ou quilômetros) nas quais as variáveis estão expressas.

2-5 | Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar Instantânea

Vimos até agora duas formas de descrever a rapidez com a qual um objeto se move: a velocidade média e a velocidade escalar média, ambas medidas para um intervalo de tempo Δt. Entretanto, quando falamos em "rapidez" em geral estamos pensando na rapidez com a qual um objeto está se movendo em um certo instante, ou seja, em sua **velocidade instantânea** (ou, simplesmente, **velocidade**) v.

A velocidade em um dado instante é obtida a partir da velocidade média reduzindo o intervalo de tempo Δt até torná-lo próximo de zero. À medida que Δt diminui, a velocidade média se aproxima de um valor-limite, que é a velocidade instantânea:

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}. \qquad (2\text{-}4)$$

Observe que v é a taxa com a qual a posição x está variando com o tempo em um dado instante, ou seja, v é a derivada de x em relação a t. Observe também que v, em qualquer instante, é a inclinação da curva que representa a posição em função do tempo no instante considerado. A velocidade instantânea também é uma grandeza vetorial e, portanto, possui uma direção e um sentido.

Velocidade escalar instantânea, ou, simplesmente, **velocidade escalar**, é o módulo da velocidade, ou seja, a velocidade desprovida de qualquer indicação de direção. (*Atenção:* a velocidade escalar e a velocidade escalar média podem ser muito diferentes.) A velocidade escalar de um objeto que está se movendo a uma velocidade de +5 m/s é a mesma (5 m/s) que a de um objeto que está se movendo a uma velocidade de −5 m/s. O velocímetro de um carro indica a velocidade escalar e não a velocidade, já que não mostra a direção em que o carro está se movendo.

TESTE 2 As equações a seguir fornecem a posição $x(t)$ de uma partícula em quatro casos (em todas as equações, x está em metros, t em segundos e $t > 0$): (1) $x = 3t - 2$; (2) $x = -4t^2 - 2$; (3) $x = 2/t^2$; (4) $x = -2$. (a) Em que caso(s) a velocidade v da partícula é constante? (b) Em que caso(s) a velocidade v é no sentido negativo do eixo x?

Exemplo 2-2

A Fig. 2-6*a* mostra o gráfico $x(t)$ de um elevador que, depois de passar algum tempo parado, começa a se mover para cima (que tomamos como sendo o sentido positivo de x) e depois pára novamente. Plote $v(t)$.

IDÉIA-CHAVE Podemos determinar a velocidade em qualquer instante calculando a inclinação da curva de $x(t)$ nesse instante.

Cálculos: A inclinação de $x(t)$, e também a velocidade, é zero nos intervalos de 0 a 1 s e de 9 s em diante, já que o elevador está parado nesses intervalos. Durante o intervalo *bc*, a inclinação é constante e diferente de zero, o que significa que o elevador se move com velocidade constante. A inclinação de $x(t)$ é dada por

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v = \frac{24\text{ m} - 4{,}0\text{ m}}{8{,}0\text{ s} - 3{,}0\text{ s}} = +4{,}0\text{ m/s}.$$

O sinal positivo indica que o elevador está se movendo no sentido positivo de x. Estes intervalos (nos quais $v = 0$ e $v = 4$ m/s) estão plotados na Fig. 2-6*b*. Além disso, como o elevador começa a se mover a partir do repouso e depois reduz a velocidade até parar, v varia da forma indicada nos intervalos de 1 s a 3 s e de 8 s a 9 s. Assim, a Fig. 2-6*b* é o gráfico pedido. (A Fig. 2-6*c* será discutida na Seção 2-6.)

Dado um gráfico de $v(t)$ como a Fig. 2-6*b*, poderíamos "retroagir" para determinar a forma do gráfico de $x(t)$ correspondente (Fig. 2-6*a*). Entretanto, não conheceríamos os verdadeiros valores de x nos vários instantes de tempo, porque o gráfico de $v(t)$ contém informações ape-

nas sobre as *variações* em x. Para determinar a variação de x em um intervalo dado devemos, na linguagem do cálculo, calcular a área "sob a curva" no gráfico de $v(t)$ para esse intervalo. Assim, por exemplo, durante o intervalo de 3 s a 8 s, no qual o elevador tem uma velocidade de 4,0 m/s, a variação de x é

$$\Delta x = (4{,}0 \text{ m/s})(8{,}0 \text{ s} - 3{,}0 \text{ s}) = +20 \text{ m}.$$

(Esta área é positiva porque a curva $v(t)$ está acima do eixo t.) A Fig. 2-6*a* mostra que x realmente aumenta de 20 m nesse intervalo. Entretanto, a Fig. 2-6*b* nada nos diz sobre os valores de x no início e no final do intervalo. Para isso, necessitamos de informações adicionais, como o valor de x em algum instante.

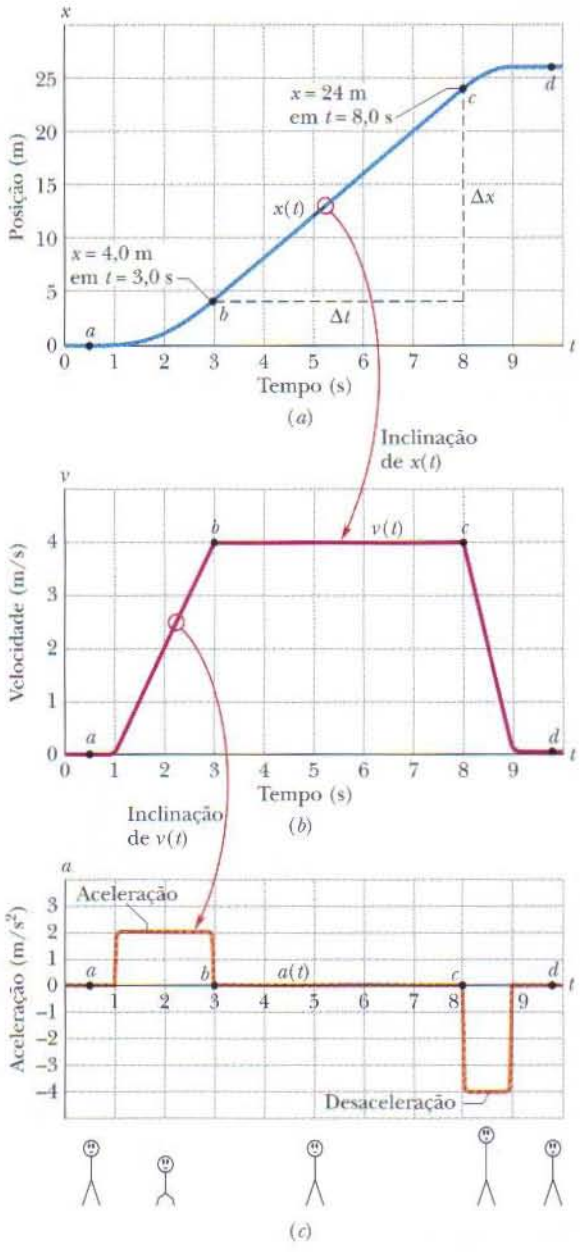


FIG. 2-6 (*a*) A curva $x(t)$ de um elevador que se move para cima ao longo do eixo x. (*b*) A curva $v(t)$ do elevador. Observe que é a derivada da curva $x(t)$ ($v = dx/dt$). (*c*) A curva $a(t)$ do elevador, que é a derivada da curva $v(t)$ ($a = dv/dt$). As figuras na parte de baixo dão uma idéia de como um passageiro se sentiria durante as acelerações.

Exemplo 2-3

A posição de uma partícula que se move em um eixo x é dada por

$$x = 7{,}8 + 9{,}2t - 2{,}1t^3, \qquad (2\text{-}5)$$

com x em metros e t em segundos. Qual é a velocidade da partícula em $t = 3{,}5$ s? A velocidade é constante ou está variando continuamente?

IDÉIA-CHAVE A velocidade é a derivada primeira (em relação ao tempo) da função posição $x(t)$.

Cálculos: Para simplificar, as unidades foram omitidas na Eq. 2-5, mas você pode inseri-las, se quiser, mudando os coeficientes para 7,8 m, 9,2 m/s e –2,1 m/s³. Derivando a Eq. 2-5, obtemos

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(7{,}8 + 9{,}2t - 2{,}1t^3),$$

e, portanto,

$$v = 0 + 9{,}2 - (3)(2{,}1)t^2 + 9{,}2 - 6{,}3t^2. \qquad (2\text{-}6)$$

Em $t = 3{,}5$ s,

$$v = 9{,}2 - (6{,}3)(3{,}5)^2 = -68 \text{ m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Em $t = 3{,}5$ s, a partícula está se movendo no sentido negativo de x (note o sinal negativo) com uma velocidade escalar de 68 m/s. Como a variável t aparece na Eq. 2-6, a velocidade v depende de t e, portanto, está variando continuamente.

2-6 | Aceleração

Quando a velocidade de uma partícula varia, diz-se que a partícula sofreu uma **aceleração** (ou foi acelerada). Para movimentos ao longo de um eixo, a **aceleração média** $a_{méd}$ em um intervalo de tempo Δt é

$$a_{méd} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \tag{2-7}$$

onde a partícula tem velocidade v_1 no instante t_1 e velocidade v_2 no instante t_2. A **aceleração instantânea** (ou, simplesmente, **aceleração**) é dada por

$$a = \frac{dv}{dt}. \tag{2-8}$$

Em palavras, a aceleração de uma partícula em qualquer instante é a taxa com a qual a velocidade está variando nesse instante. Graficamente, a aceleração em qualquer ponto é a inclinação da curva de $v(t)$ nesse ponto. Podemos combinar a Eq. 2-8 com a Eq. 2-4 e escrever

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dx}{dt}\right) = \frac{d^2x}{dt^2}. \tag{2-9}$$

Em palavras, a aceleração de uma partícula em qualquer instante é a derivada segunda da posição $x(t)$ em relação ao tempo.

A unidade de aceleração no SI é o metro por segundo ao quadrado, m/s^2. Outras unidades são usadas em alguns problemas, mas todas estão na forma de comprimento/tempo^2. Da mesma forma que o deslocamento e a velocidade, a aceleração possui um módulo e uma direção (também é uma grandeza vetorial). O sinal algébrico representa seu sentido em relação a um eixo, ou seja, uma aceleração com um valor positivo tem o sentido positivo de um eixo, enquanto uma aceleração com valor negativo tem o sentido negativo.

A Fig. 2-6*c* é um gráfico da aceleração do elevador do Exemplo 2-2. Compare esta curva de $a(t)$ com a curva de $v(t)$; cada ponto na curva de $a(t)$ corresponde à derivada (inclinação) da curva de $v(t)$ no mesmo instante de tempo. Quando v é constante (com o valor de 0 ou 4 m/s), a derivada é nula e, portanto, a aceleração é nula. Quando o elevador começa a se mover, a curva de $v(t)$ tem derivada positiva (a inclinação é positiva), o que significa que $a(t)$ é positiva. Quando o elevador reduz a velocidade até parar, a derivada e a inclinação da curva de $v(t)$ são negativas, ou seja, $a(t)$ é negativa.

Compare as inclinações da curva de $v(t)$ nos dois períodos de aceleração. A inclinação associada à redução de velocidade do elevador (ou seja, à "desaceleração") é maior porque o elevador pára na metade do tempo que levou para atingir uma velocidade constante. Uma inclinação maior significa que o módulo da desaceleração é maior que o da aceleração, como mostra a Fig. 2-6*c*.

As sensações que você teria se estivesse no elevador da Fig. 2-6 estão indicadas pelos bonequinhos que aparecem na parte inferior da figura. Quando o elevador acelera, você se sente como se estivesse sendo empurrado para baixo; mais tarde, quando o elevador freia até parar, tem a impressão de que está sendo puxado para cima. Entre esses dois intervalos não sente nada de especial. Em outras palavras, nosso corpo reage a acelerações (é um acelerômetro), mas não a velocidades (não é um velocímetro). Quando estamos viajando de carro a 90 km/h ou viajando de avião a 900 km/h não temos nenhuma sensação de movimento. Entretanto, se o carro ou o avião muda bruscamente de velocidade percebemos imediatamente a mudança e podemos até ficar assustados. Boa parte da emoção que sentimos quando andamos de montanha-russa se deve às mudanças súbitas de velocidade às quais somos submetidos (pagamos pela aceleração, não pela velocidade). Um exemplo mais extremo aparece nas fotografias da Fig. 2-7, tiradas enquanto um trenó a jato era rapidamente acelerado sobre trilhos e depois freado bruscamente até parar.

FIG. 2-7 O coronel J. P. Stapp em um trenó a jato, cuja velocidade aumenta bruscamente (aceleração para fora do papel) e, em seguida, diminui bruscamente (aceleração para dentro do papel). (*Cortesia da Força Aérea americana.*)

Grandes acelerações são às vezes expressas em unidades de g, onde

$$1g = 9{,}8\ \text{m/s}^2 \qquad \text{(unidade de } g\text{)}. \tag{2-10}$$

(Como vamos discutir na Seção 2-9, g é o módulo da aceleração de um objeto em queda livre nas proximidades da superfície da Terra.) Uma montanha-russa submete os passageiros a uma aceleração de até $3g$, o equivalente a $(3)(9{,}8\ \text{m/s}^2)$, ou cerca de $29\ \text{m/s}^2$, um valor mais do que suficiente para justificar o preço do passeio.

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 5: ***Sinal da Aceleração*** Na linguagem comum, o sinal de uma aceleração tem um significado não-científico: aceleração positiva significa que a velocidade do objeto está aumentando, e aceleração negativa significa que a velocidade está diminuindo (o objeto está desacelerando). Neste livro, porém, o sinal de uma aceleração indica um sentido, e não se a velocidade do objeto está aumentando ou diminuindo.

Assim, por exemplo, se um carro com uma velocidade inicial $v = -25$ m/s é freado até parar em 5,0 s, $a_{méd} = +5{,}0\ \text{m/s}^2$. A aceleração é *positiva*, mas a velocidade escalar do carro diminuiu. A razão está na diferença de sinais: o sentido da aceleração é contrário ao da velocidade.

A forma apropriada de interpretar os sinais é a seguinte:

Se os sinais da velocidade e da aceleração de uma partícula são iguais, a velocidade escalar da partícula aumenta. Se os sinais são opostos, a velocidade escalar diminui.

TESTE 3 Um marsupial se move ao longo do eixo x. Qual é o sinal de sua aceleração se ele está se movendo (a) no sentido positivo com velocidade escalar crescente; (b) no sentido positivo com velocidade escalar decrescente; (c) no sentido negativo com velocidade escalar crescente; (d) no sentido negativo com velocidade escalar decrescente?

Exemplo 2-4 Aumente sua capacidade

A posição de uma partícula no eixo x da Fig. 2-1 é dada por

$$x = 4 - 27t + t^3,$$

com x em metros e t em segundos.

(a) Como a posição x depende do tempo t, a partícula deve estar em movimento. Determine a função velocidade $v(t)$ e a função aceleração $a(t)$ da partícula.

IDÉIAS-CHAVE (1) Para obter a função velocidade $v(t)$, derivamos a função posição $x(t)$ em relação ao tempo. (2) Para obter a função aceleração $a(t)$, derivamos a função velocidade $v(t)$ em relação ao tempo.

Cálculos: Derivando a função posição, obtemos

$$v = -27 + 3t^2, \qquad \text{(Resposta)}$$

com v em metros por segundo. Derivando a função velocidade, obtemos

$$a = +6t \qquad \text{(Resposta)}$$

com a em metros por segundo ao quadrado.

(b) Existe algum instante para o qual $v = 0$?

Cálculo: Fazendo $v(t) = 0$, obtemos

$$0 = -27 + 3t^2,$$

E, portanto,

$$t = \pm 3\ \text{s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Assim, a velocidade é nula tanto 3 s antes como 3 s após o instante $t = 0$.

(c) Descreva o movimento da partícula para $t \geq 0$.

Raciocínio: Precisamos examinar as expressões de $x(t)$, $v(t)$ e $a(t)$.

Em $t = 0$, a partícula está em $x(0) = +4$ m e está se movendo com velocidade $v(0) = -27$ m/s, ou seja, no sentido negativo do eixo x. A aceleração é $a(0) = 0$ porque nesse instante a velocidade da partícula não está variando.

Para $0 < t < 3$ s, a partícula ainda possui velocidade negativa e, portanto, continua a se mover no sentido ne-

FIG. 2-7 *Continuação.*

gativo. Entretanto, a aceleração não mais é igual a zero, e sim crescente e positiva. Como os sinais da velocidade e da aceleração são opostos, o módulo da velocidade da partícula deve estar diminuindo.

De fato, já sabemos que a partícula pára momentaneamente em $t = 3$ s. Nesse instante, a partícula se encontra na maior distância à esquerda da origem da Fig. 2-1. Fazendo $t = 3$ s na expressão de $x(t)$, descobrimos que a posição da partícula nesse instante é $x = -50$ m. A aceleração é ainda positiva.

Para $t > 3$ s, a partícula se move para a direita sobre o eixo. A aceleração permanece positiva e aumenta progressivamente em módulo. A velocidade é agora positiva e seu módulo também aumenta progressivamente.

2-7 | Aceleração Constante: Um Caso Especial

Em muitos tipos de movimento, a aceleração é constante ou aproximadamente constante. Assim, por exemplo, você pode acelerar um carro a uma taxa aproximadamente constante quando a luz de um sinal de trânsito muda de vermelho para verde. Nesse caso, os gráficos de sua posição, velocidade e aceleração se assemelhariam aos da Fig. 2-8. [Note que $a(t)$ na Fig. 2-8*c* é constante, o que requer que $v(t)$ na Fig. 2-8*b* tenha uma inclinação constante.] Mais tarde, quando você freia o carro até parar, a aceleração (ou desaceleração, na linguagem comum) pode também ser aproximadamente constante.

Esses casos são tão freqüentes que foi formulado um conjunto especial de equações para lidar com eles. Uma forma de obter essas equações é apresentada nesta seção. Uma segunda forma será apresentada na próxima seção. Nestas duas seções e mais tarde, quando você trabalhar na solução dos problemas, lembre-se de que *essas soluções são válidas apenas quando a aceleração é constante (ou em situações nas quais a aceleração pode ser considerada aproximadamente constante).*

Quando a aceleração é constante, a aceleração média e a aceleração instantânea são iguais, e podemos escrever a Eq. 2-7, com algumas mudanças de notação, na forma

$$a = a_{\text{méd}} = \frac{v - v_0}{t - 0},$$

onde v_0 é a velocidade no instante $t = 0$ e v é a velocidade em um instante de tempo posterior t. Explicitando v, temos:

$$v = v_0 + at. \tag{2-11}$$

Como verificação, note que esta equação se reduz a $v = v_0$ para $t = 0$, como era se de esperar. Como verificação adicional, vamos calcular a derivada da Eq. 2-11. O resultado é $dv/dt = a$, o que corresponde à definição de a. A Fig. 2-8*b* mostra o gráfico da Eq. 2-11, a função $v(t)$; a função é linear e, portanto, seu gráfico é uma linha reta.

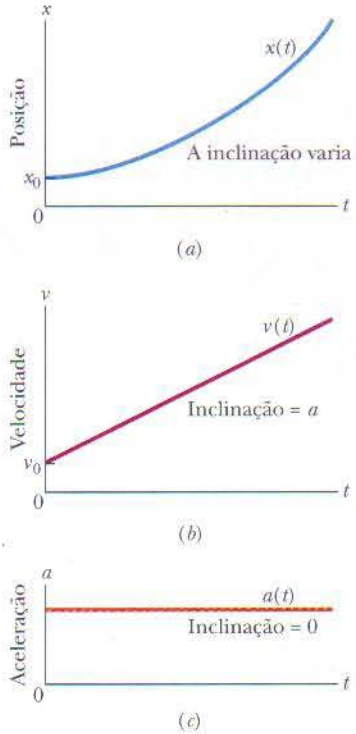


FIG. 2-8 (*a*) A posição $x(t)$ de uma partícula que se move com aceleração constante. (*b*) A velocidade da partícula, $v(t)$, dada em cada ponto pela inclinação da curva de $x(t)$. (*c*) A aceleração (constante) da partícula, igual à inclinação (constante) da curva de $v(t)$.

De maneira análoga, podemos escrever a Eq. 2-2 (com algumas mudanças na notação) na forma

$$v_{méd} = \frac{x - x_0}{t - 0}$$

o que nos dá

$$x = x_0 + v_{méd}t, \tag{2-12}$$

onde x_0 é a posição da partícula em $t = 0$ e $v_{méd}$ é a velocidade média entre $t = 0$ e um instante de tempo posterior t.

Para a função velocidade linear da Eq. 2-11, a velocidade *média* em qualquer intervalo de tempo (de $t = 0$ a um instante posterior t, digamos) é a média aritmética da velocidade no início do intervalo (v_0) com a velocidade no final do intervalo (v). Para o intervalo de $t = 0$ até um instante posterior t, portanto, a velocidade média é

$$v_{méd} = \tfrac{1}{2}(v_0 + v). \tag{2-13}$$

Substituindo v pelo seu valor, dado pela Eq. 2-11, obtemos, agrupando os termos,

$$v_{méd} = v_0 + \tfrac{1}{2}at. \tag{2-14}$$

Finalmente, substituindo a Eq. 2-14 na Eq. 2-12, obtemos:

$$x - x_0 = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2. \tag{2-15}$$

Como verificação, note que esta equação se reduz a $x = x_0$ para $t = 0$, como era de se esperar. Como verificação adicional, vamos calcular a derivada da Eq. 2-15. O resultado é a Eq. 2-11, como era de se esperar. A Fig. 2-8*a* mostra o gráfico da Eq. 2-15; como a função é do segundo grau, o gráfico não é uma linha reta.

As Eqs. 2-11 e 2-15 são as *equações básicas do movimento com aceleração constante*; podem ser usadas para resolver qualquer problema deste livro que envolva uma aceleração constante. Entretanto, é possível deduzir outras equações que podem ser úteis em situações específicas. Observe que um problema com aceleração constante pode envolver até cinco grandezas: $x - x_0$, v, t, a e v_0. Normalmente, uma dessas grandezas *não está* envolvida no problema, *nem como dado, nem como incógnita*. São fornecidas três das grandezas restantes e o problema consiste em determinar a quarta.

As Eqs. 2-11 e 2-15 contêm, cada uma, quatro dessas grandezas, mas não as mesmas quatro. Na Eq. 2-11, a grandeza ausente é o deslocamento $x - x_0$; na Eq. 2-15, é a velocidade v. As duas equações também podem ser combinadas de três maneiras diferentes para produzir três novas equações, cada uma das quais envolve quatro grandezas diferentes. Em primeiro lugar, podemos eliminar t para obter

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0). \tag{2-16}$$

Esta equação é útil se não conhecemos t e não precisamos determinar o seu valor. Em segundo lugar, podemos eliminar a aceleração a, combinando as Eqs. 2-11 e 2-15 para obter uma equação em que a não aparece:

$$x - x_0 = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t. \tag{2-17}$$

Finalmente, podemos eliminar v_0, obtendo

$$x - x_0 = vt - \tfrac{1}{2}at^2. \tag{2-18}$$

Note a diferença sutil entre esta equação e a Eq. 2-15. Uma envolve a velocidade inicial v_0; a outra envolve a velocidade v no instante t.

A Tabela 2-1 mostra as equações básicas do movimento com aceleração constante (Eqs. 2-11 e 2-15), assim como as equações especiais que deduzimos. Para resolver um problema simples envolvendo aceleração constante, em geral é possível

usar uma equação desta lista (*se* você puder consultar a lista). Escolha uma equação para a qual a única variável desconhecida é a variável pedida no problema. Um plano mais simples é memorizar apenas as Eqs. 2-11 e 2-15 e montar com elas um sistema de equações, caso isso seja necessário.

TESTE 4 As equações a seguir fornecem a posição $x(t)$ de uma partícula em quatro casos: (1) $x = 3t - 4$; (2) $x = -5t^3 + 4t^2 + 6$; (3) $x = 2/t^2 - 4/t$; (4) $x = 5t^2 - 3$. Em que caso(s) as equações da Tabela 2-1 podem ser aplicadas?

TABELA 4-1

Equações do Movimento com Aceleração Constante[a]

Número da Equação	Equação	Grandeza que Falta
2-11	$v = v_0 + at$	$x - x_0$
2-15	$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	v
2-16	$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$	t
2-17	$x - x_0 = \frac{1}{2}(v_0 + v)t$	a
2-18	$x - x_0 = vt - \frac{1}{2}at^2$	v_0

[a]Certifique-se de que a aceleração é constante antes de usar as equações desta tabela.

Exemplo 2-5

A cabeça de um pica-pau está se movendo para a frente com uma velocidade de 7,49 m/s quando o bico faz contato com um tronco de árvore. O pico pára depois de penetrar 1,87 mm no tronco. Determine o módulo da aceleração, em unidades de g, supondo que ela é constante.

IDÉIA-CHAVE Podemos usar as equações de velocidade constante; em particular, podemos usar a Eq. 2-16 $[v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)]$, que relaciona a velocidade ao deslocamento.

Cálculos: Como a cabeça do pica-pau pára, a velocidade final é $v = 0$. A velocidade inicial é $v_0 = 7{,}49$ m/s, e o deslocamento durante a aceleração constante é $x - x_0 = 1{,}87 \times 10^{-3}$ m. Substituindo esses valores na Eq. 2-16, obtemos

$$0^2 = (7{,}49\ \text{m/s})^2 + 2a(1{,}87 \times 10^{-3}\ \text{m}),$$

$$a = 1{,}500 \times 10^4\ \text{m/s}^2.$$

Dividindo por $g = 9{,}8$ m/s^2 e tomando o valor absoluto, descobrimos que o módulo da aceleração da cabeça é

$$a = (1{,}53 \times 10^3)g. \qquad \text{(Resposta)}$$

Comentário: Esta aceleração típica da cabeça de um pica-pau é aproximadamente 70 vezes maior que a aceleração do coronel Stapp na Fig. 2-7, e certamente seria mortal para um ser humano. A capacidade de um pica-pau de suportar acelerações tão elevadas ainda não foi bem explicada, mas existem duas teorias principais. (1) O movimento da cabeça do pica-pau é quase retilíneo. Alguns pesquisadores acreditam que uma concussão pode acontecer nos seres humanos e nos animais quando a cabeça gira muito depressa em torno do pescoço (e do tronco cerebral), mas é menos provável em um movimento retilíneo. (2) O cérebro do pica-pau está tão firmemente preso ao crânio que as duas estruturas se movem em uníssono, o que minimiza os efeitos da aceleração.

Exemplo 2-6 Aumente sua capacidade

A Fig. 2-9 mostra a velocidade v de uma partícula em função da posição enquanto ela se move ao longo do eixo x com aceleração constante. Qual é a velocidade da partícula no ponto $x = 0$?

IDÉIA-CHAVE Podemos usar as equações de aceleração constante; em particular, podemos usar a Eq. 2-16 $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$, que relaciona a velocidade à posição.

Primeira tentativa: Normalmente estamos interessados em usar uma equação que contenha a variável pedida. Na Eq. 2-16 podemos dizer que $x_0 = 0$ e que v_0 é a variável pedida. Para determinar o valor de v_0, precisamos conhecer os valores de v e x no mesmo ponto. O gráfico nos permite determinar dois pares de valores para v e x: (1) $v = 8$ m/s e $x = 20$ m; (2) $v = 0$ e $x = 70$ m. Usando o primeiro par, podemos escrever:

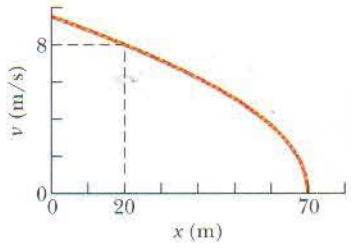


FIG. 2-9 Velocidade de uma partícula em função da posição.

$$(8\ \text{m/s})^2 = v_0^2 + 2a(20\ \text{m} - 0), \qquad (2\text{-}19)$$

Entretanto, não podemos usar a Eq. (2-19) para calcular o valor de v_0, já que não conhecemos o valor de a.

Segunda tentativa: em vez de tentarmos determinar diretamente a variável pedida, vamos aplicar a Eq. 2-16 aos dois pontos conhecidos chamando de $v_0 = 8$ m/s, $x_0 = 20$ m o primeiro par de valores e de $v = 0$ m/s, $x = 70$ m o segundo par. Nesse caso, podemos escrever:

$$(0 \text{ m/s})^2 = (8 \text{ m/s})^2 + 2a(70 \text{ m} - 20 \text{ m}),$$

o que nos dá $a = -0{,}64$ m/s^2. Substituindo este valor na Eq. 2-19 e explicitando v_0 (a velocidade associada à posição $x = 0$), obtemos

$$v_0 = 9{,}5 \text{ m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Comentário: Alguns problemas envolvem uma equação que inclui a variável pedida. Os problemas mais difíceis são aqueles que exigem o uso de uma equação que não inclui a variável pedida, mas fornece um valor necessário para determiná-la. Às vezes, este tipo de abordagem exige *coragem*, já que se trata de uma solução indireta. A solução de qualquer tipo de problema, seja físico ou social, requer uma certa dose de prática.

2-8 | Mais sobre Aceleração Constante*

As duas primeiras equações da Tabela 2-1 são as equações básicas a partir das quais as outras podem ser deduzidas. Essas duas equações podem ser obtidas por integração da aceleração com a condição de que a seja uma constante. Para obter a Eq. 2-11, escrevemos a definição de aceleração (Eq. 2-8) na forma

$$dv = a\,dt.$$

Em seguida, escrevemos a *integral indefinida* (ou *antiderivada*) em ambos os lados da equação:

$$\int dv = \int a\,dt.$$

Como a aceleração a é constante, pode ser colocada do lado de fora do sinal de integração. Nesse caso, temos:

$$\int dv = a \int dt$$

ou

$$v = at + C. \qquad (2\text{-}20)$$

Para determinar a constante de integração C, fazemos $t = 0$, instante no qual $v = v_0$. Substituindo esses valores na Eq. 2-20 (que é válida para qualquer valor de t, incluindo $t = 0$), obtemos

$$v_0 = (a)(0) + C = C.$$

Substituindo este valor na Eq. 2-20, obtemos a Eq. 2-11.

Para demonstrar a Eq. 2-15, escrevemos a definição de velocidade (Eq. 2-4) na forma

$$dx = v\,dt$$

e integramos ambos os membros desta equação para obter

$$\int dx = \int v\,dt.$$

Substituindo v pelo seu valor, dado pela Eq. 2-11, temos:

$$\int dx = \int (v_0 + at)\,dt.$$

Como v_0 e a são constantes, podemos escrever

$$\int dx = v_0 \int dt + a \int t\,dt.$$

Integrando, obtemos

$$x = v_0 t + \tfrac{1}{2} at^2 + C', \qquad (2\text{-}21)$$

*Esta seção se destina a alunos que conhecem cálculo integral.

onde C' é outra constante de integração. No instante $t = 0$, temos $x = x_0$. Substituindo esses valores na Eq. 2-21, obtemos $x_0 = C'$. Substituindo C' por x_0 na Eq. 2-21, obtemos a Eq. 2-15.

2-9 | Aceleração em Queda Livre

Se você arremessasse um objeto para cima ou para baixo e pudesse de alguma forma eliminar o efeito do ar sobre o movimento, observaria que o objeto sofre uma aceleração constante para baixo, conhecida como **aceleração em queda livre**, cujo módulo é representado pela letra g. O valor desta aceleração não depende das características do objeto, como massa, densidade e forma; ela é a mesma para todos os objetos.

A Fig. 2-10 mostra dois exemplos de aceleração em queda livre através de uma série de fotos estroboscópicas de uma pena e de uma maçã. Enquanto esses objetos caem, sofrem uma aceleração para baixo, que nos dois casos é igual a g. Assim, suas velocidades aumentam com a mesma taxa, e eles caem juntos.

O valor de g varia ligeiramente com a latitude e com a altitude. No nível do mar e em latitudes médias o valor é 9,8 m/s², que é o valor que você deve usar como número exato nos problemas deste livro, a menos que seja especificado em contrário.

As equações de movimento da Tabela 2-1 para aceleração constante também se aplicam à queda livre nas proximidades da superfície da Terra, ou seja, se aplicam a um objeto que esteja descrevendo uma trajetória vertical, para cima ou para baixo, contanto que os efeitos do ar possam ser desprezados. Observe, porém, que no caso da queda livre (1) a direção do movimento é ao longo de um eixo y vertical e não ao longo de um eixo x horizontal, com o sentido positivo de y apontando para cima (isto será importante em capítulos subseqüentes, em que examinaremos movimentos simultâneos nas direções horizontal e vertical); (2) a aceleração em queda livre é negativa, ou seja, para baixo, em direção ao centro da Terra, e, portanto, tem o valor $-g$ nas equações.

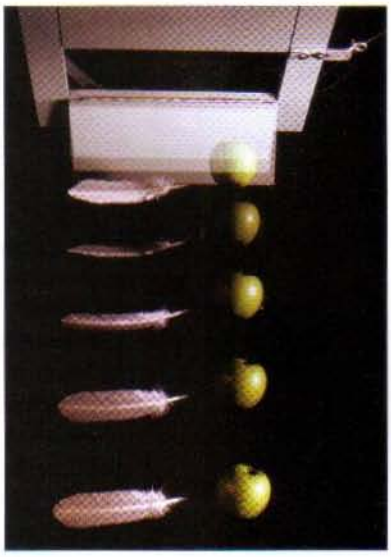


FIG. 2-10 Uma pena e uma maçã em queda livre no vácuo sofrem a mesma aceleração g, que aumenta a distância entre imagens sucessivas. (*Jim Sugar/Corbis Images.*)

A aceleração em queda livre nas proximidades da superfície da Terra é $a = -g = -9{,}8\ \text{m/s}^2$ e o *módulo* da aceleração é $g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$. Não substitua g por $-9{,}8\ \text{m/s}^2$ (e sim por $9{,}8\ \text{m/s}^2$).

Suponha que você arremesse um tomate verticalmente para cima com uma velocidade inicial (positiva) v_0 e o apanhe quando volta ao nível inicial. Durante a *trajetória em queda livre* (do instante imediatamente após o lançamento ao instante imediatamente antes de ser apanhado) as equações da Tabela 2-1 se aplicam ao movimento do tomate. A aceleração é sempre $a = -g = -9{,}8\ \text{m/s}^2$, negativa e, portanto, dirigida para baixo. A velocidade, entretanto, varia, como mostram as Eqs. 2-11 e 2-16: na subida, a velocidade é positiva e o módulo diminui até se tornar momentaneamente igual a zero. Nesse instante, o tomate atinge a altura máxima. Na descida, o módulo da velocidade (agora negativa) cresce.

TESTE 5 (a) Se você arremessa uma bola verticalmente para cima, qual é o sinal do deslocamento da bola durante a subida, desde o ponto inicial até o ponto mais alto da trajetória? (b) Qual é o sinal do deslocamento durante a descida, desde o ponto mais alto da trajetória até o ponto inicial? (c) Qual é a aceleração da bola no ponto mais alto da trajetória?

Exemplo 2-7

Em 26 de setembro de 1993, Dave Munday foi até o lado canadense das cataratas do Niágara com uma bola de aço, equipada com um furo para entrada de ar, e caiu 48 m até a água (e as pedras). Suponha que a velocidade inicial era nula e despreze o efeito do ar sobre a bola durante a queda.

(a) Quanto tempo durou a queda de Munday?

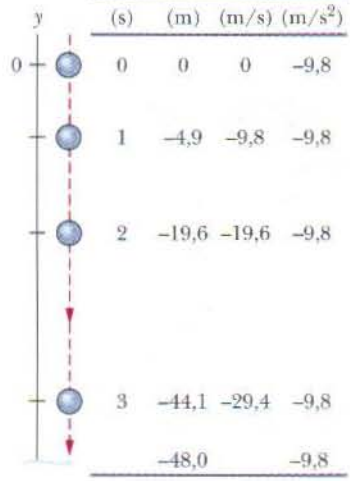
IDÉIA-CHAVE Como a queda de Munday foi uma queda livre, as equações de aceleração constante da Tabela 2-1 podem ser usadas.

Cálculos: Vamos supor que a queda se deu ao longo do eixo y, com $y = 0$ no ponto de partida e o sentido positivo para cima (Fig. 2-11). Nesse caso, a aceleração é $a = -g$ ao longo do eixo y e o nível da água está em $y = -48$ m (negativo porque está abaixo de $y = 0$). Suponha que a queda começa no instante $t = 0$, com uma velocidade inicial $v_0 = 0$.

Consultando a Tabela 2-1, escolhemos a Eq. 2-15 (substituindo x por y) porque ela contém o tempo pedido t e os valores das outras variáveis são conhecidos. Temos:

$$y - y_0 = v_0 t - \tfrac{1}{2}gt^2$$
$$-48\text{ m} - 0 = 0t - \tfrac{1}{2}(9{,}8\text{ m/s}^2)t^2,$$
$$t^2 = 48/4{,}9,$$
$$t = 3{,}1\text{ s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Note que o deslocamento de Munday, $y - y_0$, é negativo, pois sua trajetória foi no *sentido negativo* do eixo y (ele não caiu para cima!). Observe também que 48/4,9 possui duas raízes quadradas: 3,1 e –3,1. Escolhemos a raiz positiva porque Munday obviamente atingiu a superfície da água *depois* de ter começado a cair em $t = 0$.



t (s)	y (m)	v (m/s)	a (m/s²)
0	0	0	–9,8
1	–4,9	–9,8	–9,8
2	–19,6	–19,6	–9,8
3	–44,1	–29,4	–9,8
	–48,0		–9,8

FIG. 2-11 Posição, velocidade e aceleração de um objeto em queda livre, no caso a bola de aço usada por Dave Munday nas Cataratas do Niágara.

(b) Munday podia contar os três segundos de queda livre, mas não podia ver o quanto tinha caído a cada segundo. Determine sua posição no final de cada segundo de queda.

Cálculos: Usamos novamente a Eq. 2-15, mas agora substituímos, sucessivamente, os valores $t = 1{,}0$ s, 2,0 s e 3,0 s e calculamos a posição y de Munday para esses instantes de tempo. Os resultados aparecem na Fig. 2-11.

(c) Qual era a velocidade de Munday ao atingir a superfície da água?

Cálculo: Para obter a velocidade a partir dos dados originais sem usar o tempo de queda calculado no item (a), escrevemos a Eq. 2-16 com y no lugar de x e substituímos os valores conhecidos:

$$v^2 = v_0^2 - 2g(y - y_0) = 0 - (2)(9{,}8\text{ m/s}^2)(-48\text{ m}),$$

e, portanto, $v = -30{,}67\text{ m/s} \approx -31\text{ m/s} = -110\text{ km/h}.$ (Resposta)

Escolhemos a raiz negativa aqui porque a velocidade era no sentido negativo.

(d) Qual era a velocidade de Munday no final de cada segundo? Ele sentiu o aumento de velocidade?

Cálculos: Para obter a velocidade a partir dos dados originais sem usar as posições calculadas no item (b), fazemos $a = -g$ na Eq. 2-11 e substituímos, sucessivamente, os valores $t = 1{,}0$ s, 2,0 s e 3,0 s. Por exemplo:

$$v = v_0 - gt$$
$$= 0 - (9{,}8\text{ m/s}^2)(1{,}0\text{ s}) = -9{,}8\text{ m/s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Os outros resultados aparecem na Fig. 2-11.

Enquanto estava em queda livre, Munday não podia sentir o aumento da velocidade porque a aceleração durante a queda tinha o valor constante de $-9{,}8$ m/s², como mostra a última coluna da Fig. 2-11. Naturalmente, ele teve perfeita noção do momento em que a esfera atingiu a água, já que nesse ponto a aceleração mudou bruscamente. (Munday sobreviveu à queda, mas teve que pagar uma pesada multa por sua ação temerária.)

Exemplo 2-8

Na Fig. 2-12, um lançador arremessa uma bola de beisebol para cima, ao longo do eixo y, com uma velocidade inicial de 12 m/s.

(a) Quanto tempo a bola leva para atingir a altura máxima?

IDÉIA-CHAVE (1) Entre o instante em que a bola é lançada e o instante em que volta ao ponto de partida sua aceleração é a aceleração em queda livre, $a = -g$. Como a aceleração é constante, podemos usar as equações da Tabela 2-1. (2) A velocidade v no instante em que a bola atinge a altura máxima é 0.

Cálculo: Como conhecemos v, a e a velocidade inicial $v_0 = 12$ m/s e estamos interessados em determinar o valor de t, escolhemos a Eq. 2-12, que contém essas quatro variáveis. Explicitando t, obtemos:

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{0 - 12\text{ m/s}}{-9{,}8\text{ m/s}^2} = 1{,}2\text{ s}. \qquad \text{(Resposta)}$$

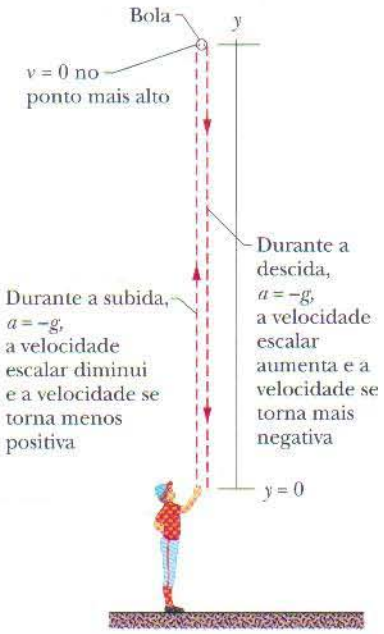


FIG. 2-12 Um lançador arremessa uma bola de beisebol para cima. As equações de queda livre se aplicam tanto a objetos que estão subindo como a objetos que estão caindo, desde que a influência do ar possa ser desprezada.

(b) Qual é a altura máxima alcançada pela bola em relação ao ponto de lançamento?

Cálculo: Podemos tomar o ponto de lançamento da bola como sendo $y_0 = 0$. Nesse caso, podemos escrever a Eq. 2-16 com y no lugar de x, fazer $y - y_0 = y$ e $v = 0$ (na altura máxima) e explicitar y. O resultado é

$$y = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (12 \text{ m/s})^2}{2(-9{,}8 \text{ m/s}^2)} = 7{,}3 \text{ m}. \quad \text{(Resposta)}$$

(c) Quanto tempo a bola leva para atingir um ponto 5,0 m acima do ponto inicial?

Cálculos: Como conhecemos v_0, $a = -g$ e o deslocamento $y - y_0 = 5{,}0$ m e queremos determinar t, escolhemos a Eq. 2-15. Substituindo x por y e fazendo $y_0 = 0$, obtemos

$$y = v_0 t - \tfrac{1}{2} g t^2,$$

ou
$$5{,}0 \text{ m} = (12 \text{ m/s})t - (\tfrac{1}{2})(9{,}8 \text{ m/s}^2)t^2.$$

Omitindo temporariamente as unidades (depois de observar que são coerentes), podemos escrever esta equação na forma

$$4{,}9t^2 - 12t + 5{,}0 = 0.$$

Resolvendo esta equação do segundo grau, obtemos

$$t = 0{,}53 \text{ s e } t = 1{,}9 \text{ s}. \quad \text{(Resposta)}$$

Existem dois tempos possíveis! Isso na verdade não chega a ser uma surpresa, pois a bola passa duas vezes pelo ponto $y = 5{,}0$ m, uma vez na subida e outra na descida.

TÁTICAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Tática 6: *Significado do Sinal Negativo* Nos Exemplos 2-7 e 2-8 definimos um eixo vertical (o eixo y) e escolhemos (arbitrariamente) o sentido para cima como positivo. Em seguida, escolhemos a origem do eixo y (ou seja, a posição $y = 0$) mais apropriada para o problema. No Exemplo 2-7 a origem foi o alto das cataratas, enquanto no Exemplo 2-8 foi a mão do lançador. Um valor negativo de y significa que o corpo está abaixo do ponto escolhido como origem. Uma velocidade negativa significa que o corpo está se deslocando no sentido negativo do eixo y, ou seja, para baixo. Isto é verdade qualquer que seja a posição do corpo.

Consideramos a aceleração como negativa ($-9{,}8$ m/s^2) em todos os problemas que envolvem a queda de corpos. Uma aceleração negativa significa que, com o passar do tempo, a velocidade do corpo se torna menos positiva ou mais negativa. Isto é verdade qualquer que seja a posição do corpo e qualquer que seja o valor ou o sentido de sua velocidade. No Exemplo 2-8, a aceleração da bola é negativa (para baixo) durante todo o trajeto, independentemente do fato de a bola estar subindo ou descendo.

Tática 7: *Respostas Inesperadas* A matemática freqüentemente produz respostas que talvez não estivéssemos esperando, como no item (c) do Exemplo 2-8. Se você obtiver um número maior de respostas do que o previsto, não despreze cegamente as que parecem não ser apropriadas. Examine-as atentamente para verificar se possuem algum significado físico. Se a variável é o tempo, mesmo um valor negativo pode ter um significado físico; afinal, um tempo negativo significa simplesmente um tempo anterior a $t = 0$, o instante (arbitrário) no qual você decidiu ligar o seu cronômetro.

2-10 | Integração de Gráficos em Análise de Movimento

Quando temos o gráfico da aceleração de um objeto em função do tempo podemos integrar o gráfico para obter a velocidade do objeto em qualquer instante dado. Como a aceleração a é definida em termos da velocidade como $a = dv/dt$, o Teorema Fundamental do Cálculo nos diz que

$$v_1 - v_0 = \int_{t_0}^{t_1} a \, dt. \quad (2\text{-}22)$$

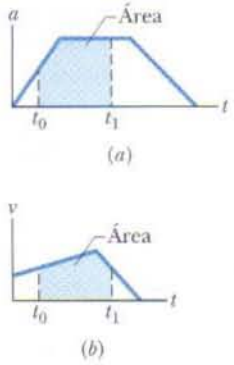


FIG. 2-13 Área entre uma curva e o eixo dos tempos, do instante t_0 ao instante t_1, indicada (*a*) em um gráfico da aceleração a em função do tempo t e (*b*) em um gráfico da velocidade v em função do tempo t.

O lado direito desta equação é uma integral definida (fornece um resultado numérico em vez de uma função), v_0 é a velocidade no instante t_0 e v_1 é a velocidade em um instante posterior t_1. A integral definida pode ser calculada a partir do gráfico de $a(t)$, como na Fig. 2-13*a*. Em particular,

$$\int_{t_0}^{t_1} a\,dt = \begin{pmatrix}\text{área entre a curva de aceleração}\\ \text{e o eixo dos tempos, de } t_0 \text{ a } t_1\end{pmatrix} \tag{2-23}$$

Se uma unidade de aceleração é 1 m/s^2 e uma unidade de tempo é 1 s, a unidade de área no gráfico é

$$(1\ \text{m/s}^2)(1\ \text{s}) = 1\ \text{m/s},$$

que é (como devia ser) uma unidade de velocidade. Quando a curva da aceleração está acima do eixo do tempo, a área é positiva; quando a curva está abaixo do eixo do tempo, a área é negativa.

Da mesma forma, como a velocidade v é definida em termos da posição x como $v = dx/dt$,

$$x_1 - x_0 = \int_{t_0}^{t_1} v\,dt, \tag{2-24}$$

onde x_0 é a posição no instante t_0 e x_1 é a posição no instante t_1. A integral definida no lado direito da Eq. 2-24 pode ser calculada a partir do gráfico de $v(t)$, como mostra a Fig. 2-13*b*. Em particular,

$$\int_{t_0}^{t_1} v\,dt = \begin{pmatrix}\text{área entre a curva de velocidade}\\ \text{e o eixo dos tempos, de } t_0 \text{ a } t_1\end{pmatrix}. \tag{2-25}$$

Se a unidade de velocidade é 1 m/s e a unidade de tempo é 1 s, a unidade de área no gráfico é

$$(1\ \text{m/s})(1\ \text{s}) = 1\ \text{m},$$

que é (como devia ser) uma unidade de posição e deslocamento. A questão de essa área ser positiva ou negativa é determinada da mesma forma que para a curva $a(t)$ da Fig. 2-13*a*.

Exemplo 2-9

Lesões do pescoço causadas pelo "efeito chicote" são freqüentes em colisões traseiras, em que um automóvel é atingido por trás por outro automóvel. Na década de 1970 os pesquisadores concluíram que a lesão ocorria porque a cabeça do ocupante era jogada para trás por cima do banco quando o carro era empurrado para a frente. Como resultado desta descoberta, foram instalados encostos de cabeça nos carros, mas as lesões de pescoço nas colisões traseiras continuaram a acontecer.

Em um teste recente para estudar as lesões do pescoço em colisões traseiras, um voluntário foi preso por cintos a um assento, que foi movimentado bruscamente para simular uma colisão na qual o carro de trás estava se movendo a 10,5 km/h. A Fig. 2-14*a* mostra a aceleração do tronco e da cabeça do voluntário durante a colisão, que começa no instante $t = 0$. O início da aceleração do tronco sofreu um retardo de 40 ms, tempo que o encosto do assento levou para ser comprimido contra o voluntário. A aceleração da cabeça sofreu um retardo de mais 70 ms. Qual era a velocidade do tronco quando a cabeça começou a acelerar?

IDÉIA-CHAVE Podemos determinar a velocidade escalar do tronco em qualquer instante calculando a área sob a curva da aceleração do tronco, $a(t)$.

Cálculos: Sabemos que a velocidade inicial do tronco é $v_0 = 0$ no instante $t_0 = 0$, ou seja, no início da "colisão". Queremos obter a velocidade do tronco v_1 no instante $t_1 = 110$ ms, ou seja, quando a cabeça começa a acelerar.

Combinando as Eqs. 2-22 e 2-23, podemos escrever:

$$v_1 - v_0 = \begin{pmatrix}\text{área entre a curva de aceleração}\\ \text{e o eixo dos tempos, de } t_0 \text{ a } t_1\end{pmatrix}. \tag{2-26}$$

Por conveniência, vamos separar a área em três regiões (Fig. 2-14*b*). De 0 a 40 ms, a região A tem área nula:

$$\text{área}_A = 0.$$

De 40 ms a 100 ms, a região B tem a forma de um triângulo cuja área é

$$\text{área}_B = \tfrac{1}{2}(0{,}060\ \text{s})(50\ \text{m/s}^2) = 1{,}5\ \text{m/s}.$$

De 100 ms a 110 ms, a região C tem a forma de um retângulo cuja área é

$$\text{área}_C = (0{,}010\text{ s})(50\text{ m/s}^2) = 0{,}50\text{ m/s}.$$

Substituindo esses valores e fazendo $v_0 = 0$ na Eq. 2-26, obtemos:

$$v_1 - 0 = 0 + 1{,}5\text{ m/s} + 0{,}50\text{ m/s},$$

ou $$v_1 = 2{,}0\text{ m/s} = 7{,}2\text{ km/h}. \qquad \text{(Resposta)}$$

Comentários: Quando a cabeça está começando a se mover para a frente, o tronco já tem uma velocidade de 7,2 km/h. Os pesquisadores afirmam que é esta diferença de velocidade durante uma colisão traseira que causa lesões do pescoço. O movimento brusco da cabeça para trás acontece depois e pode agravar a lesão, especialmente se não existir um encosto para a cabeça.

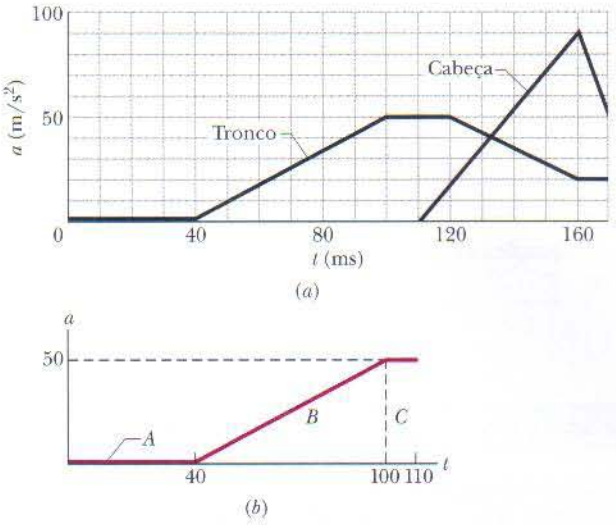


FIG. 2-14 (*a*) Curva de $a(t)$ para o tronco e a cabeça de um voluntário em uma simulação de uma colisão traseira. (*b*) Separação da região entre a curva e o eixo dos tempos para calcular a área.

REVISÃO E RESUMO

Posição A *posição* x de uma partícula em um eixo x localiza a partícula em relação à **origem**, ou ponto zero, do eixo. A posição é positiva ou negativa, dependendo do lado da origem em que se encontra a partícula, ou zero, se a partícula se encontra na origem. O **sentido positivo** de um eixo é o sentido em que os números positivos aumentam; o sentido oposto é o **sentido negativo**.

Deslocamento O *deslocamento* Δx de uma partícula é a variação de sua posição:

$$\Delta x = x_2 - x_1. \qquad (2\text{-}1)$$

O deslocamento é uma grandeza vetorial. É positivo se a partícula se move no sentido positivo do eixo x, e negativo se a partícula se move no sentido oposto.

Velocidade Média Quando uma partícula se desloca de uma posição x_1 para uma posição x_2 durante um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, sua velocidade média durante esse intervalo é dada por

$$v_{\text{méd}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \qquad (2\text{-}2)$$

O sinal algébrico de $v_{\text{méd}}$ indica o sentido do movimento ($v_{\text{méd}}$ é uma grandeza vetorial). A velocidade média não depende da distância que uma partícula percorre, mas apenas das posições inicial e final.

Em um gráfico de x em função de t, a velocidade média em um intervalo de tempo Δt é igual à inclinação da linha reta que une os pontos da curva que representam as duas extremidades do intervalo.

Velocidade Escalar Média A *velocidade escalar média* $s_{\text{méd}}$ de uma partícula durante um intervalo de tempo Δt depende da distância total percorrida pela partícula nesse intervalo:

$$s_{\text{méd}} = \frac{\text{distância total}}{\Delta t}. \qquad (2\text{-}3)$$

Velocidade Instantânea A *velocidade instantânea* (ou simplesmente **velocidade**) v de uma partícula é dada por

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}, \qquad (2\text{-}4)$$

onde Δx e Δt são definidos pela Eq. 2-2. A velocidade instantânea (em um certo instante de tempo) é igual à inclinação (nesse mesmo instante) do gráfico de x em função de t. A **velocidade escalar** é o módulo da velocidade instantânea.

Aceleração Média A *aceleração média* é a razão entre a variação em velocidade Δv e o intervalo de tempo Δt no qual essa variação ocorre:

$$a_{\text{méd}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \qquad (2\text{-}7)$$

O sinal algébrico indica o sentido de $a_{\text{méd}}$.

Aceleração Instantânea A *aceleração instantânea* (ou simplesmente **aceleração**) a é igual à derivada primeira em relação ao tempo da velocidade $v(t)$ ou à derivada segunda da posição $x(t)$ em relação ao tempo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}. \qquad (2\text{-}8, 2\text{-}9)$$

Em um gráfico de v em função de t, a aceleração a em qualquer instante t é igual à inclinação da curva no ponto que representa t.

Aceleração Constante As cinco equações da Tabela 2-1 descrevem o movimento de uma partícula com aceleração constante:

$$v = v_0 + at, \quad (2\text{-}11)$$

$$x - x_0 = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2, \quad (2\text{-}15)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0), \quad (2\text{-}16)$$

$$x - x_0 = \tfrac{1}{2}(v_0 t + v)t, \quad (2\text{-}17)$$

$$x - x_0 = vt - \tfrac{1}{2}at^2. \quad (2\text{-}18)$$

Estas equações *não são válidas* quando a aceleração não é constante.

Aceleração em Queda Livre Um exemplo importante de movimento retilíneo com aceleração constante é o de um objeto subindo ou caindo livremente nas proximidades da superfície da Terra. As equações para aceleração constante podem ser usadas para descrever este movimento, mas devemos fazer duas mudanças na notação: (1) o movimento é descrito em relação a um eixo vertical y, com $+y$ orientado verticalmente *para cima*; (2) a aceleração a é substituída por $-g$, onde g é o módulo da aceleração em queda livre. Perto da superfície da Terra, $g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$.

PERGUNTAS

1 A Fig. 2-15 mostra as trajetórias de quatro objetos de um ponto inicial a um ponto final, todas no mesmo intervalo de tempo. As trajetórias passam por três linhas retas igualmente espaçadas. Coloque as trajetórias na ordem (a) da velocidade média dos objetos e (b) da velocidade escalar média dos objetos, começando pela maior.

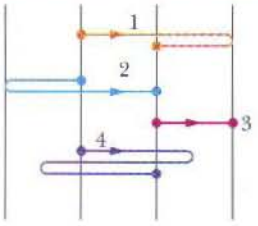


FIG. 2-15 Pergunta 1.

2 A Fig. 2-16 é um gráfico da posição de uma partícula em um eixo x em função do tempo. (a) Qual é o sinal da posição da partícula no instante $t = 0$? A velocidade da partícula é positiva, negativa ou nula (b) em $t = 1$ s, (c) em $t = 2$ s e (d) em $t = 3$ s? (e) Quantas vezes a partícula passa pelo ponto $x = 0$?

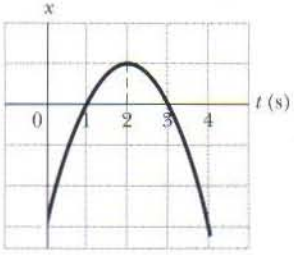


FIG. 2-16 Pergunta 2.

3 A Fig. 2-17 mostra a velocidade de uma partícula que se move em um eixo x. Determine (a) o sentido inicial e (b) o sentido final do movimento. (c) A velocidade da partícula se anula em algum instante? (d) A aceleração é positiva ou negativa? (e) A aceleração é constante ou variável?

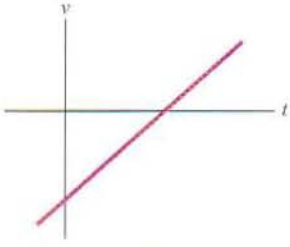


FIG. 2-17 Pergunta 3.

4 A Fig. 2-18 mostra a aceleração $a(t)$ de um chihuahua que persegue um pastor alemão sobre um eixo. Em qual dos períodos de tempo indicados o chihuahua se move com velocidade constante?

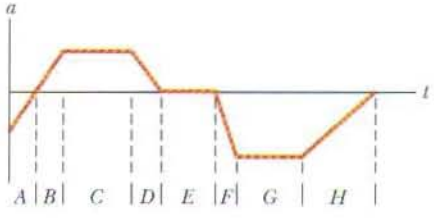


FIG. 2-18 Pergunta 4.

5 A Fig. 2-19 mostra a velocidade de uma partícula que se move em um eixo. O ponto 1 é o ponto mais alto da curva; o ponto 4 é o ponto mais baixo; os pontos 2 e 6 estão na mesma altura. Qual é o sentido do movimento (a) no instante $t = 0$ e (b) no ponto 4? (c) Em qual dos seis pontos numerados a partícula inverte o sentido de movimento? (d) Coloque os seis pontos na ordem do módulo da aceleração, começando pelo maior.

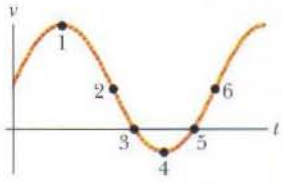


FIG. 2-19 Pergunta 5.

6 As seguintes equações fornecem a velocidade $v(t)$ de uma partícula em quatro situações: (a) $v = 3$; (b) $v = 4t^2 + 2t - 6$; (c) $v = 3t - 4$; (d) $v = 5t^2 - 3$. Em quais destas situações as equações da Tabela 2-1 podem ser aplicadas?

7 Na Fig. 2-20, uma tangerina é lançada verticalmente para cima e passa por três janelas igualmente espaçadas e de alturas iguais. Coloque as janelas na ordem decrescente (a) da velocidade escalar média da tangerina ao passar por elas, (b) do tempo que a tangerina leva para passar por elas, (c) do módulo da aceleração da tangerina ao passar por elas e (d) da variação Δv da velocidade escalar da tangerina ao passar por elas.

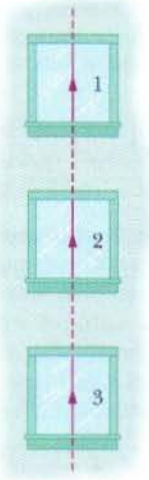


FIG. 2-20 Pergunta 7.

8 Em $t = 0$, uma partícula que se move em um eixo x está na posição $x_0 = -20$ m. Os sinais da velocidade inicial v_0 (no instante t_0) e da aceleração constante a da partícula são, respectivamente, para quatro situações: (1) +, +; (2) +, –; (3) –, +; (4) –, –. Em quais das situações a partícula (a) pára momentaneamente, (b) passa pela origem e (c) não passa pela origem?

9 Debruçado no parapeito de uma ponte, você deixa cair um ovo (com velocidade inicial nula) e atira um segundo ovo para baixo. Qual das curvas da Fig. 2-21 corresponde à velocidade $v(t)$ (a) do ovo que caiu, (b) do ovo que foi atirado? (As curvas A e B são paralelas, assim como as curvas C, D e E e as curvas F e G.)

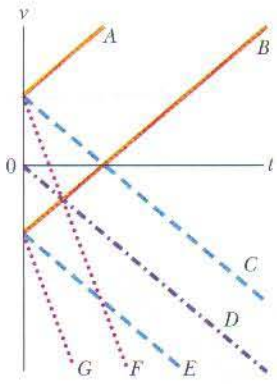


FIG. 2-21 Pergunta 9.

PROBLEMAS

• – ••• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 2-4 Velocidade Média e Velocidade Escalar Média

•1 Um automóvel viaja em uma estrada retilínea por 40 km a 30 km/h. Em seguida, continuando no mesmo sentido, percorre outros 40 km a 60 km/h. (a) Qual é a velocidade média do carro durante este percurso de 80 km? (Suponha que o carro se move no sentido positivo de x.) (b) Qual é a velocidade escalar média? (c) Trace o gráfico de x em função de t e mostre como calcular a velocidade média a partir do gráfico.

•2 Um carro sobe uma ladeira com uma velocidade constante de 40 km/h e desce a ladeira com uma velocidade constante de 60 km/h. Calcule a velocidade escalar média da viagem de ida e volta.

•3 Durante um espirro, os olhos podem se fechar por até 0,50 s. Se você está dirigindo um carro a 90 km/h e espirra, de quanto o carro pode se deslocar até você abrir novamente os olhos?

•4 Em 1992, um recorde mundial de velocidade em uma bicicleta foi estabelecido por Chris Huber. Seu tempo para percorrer um trecho de 200 m foi de apenas 6,509 s, ao final do qual ele comentou: "Cogito ergo zoom!" (Penso, logo corro!). Em 2001, Sam Whittingham quebrou o recorde de Huber em 19 km/h. Qual foi o tempo gasto por Whittingham para percorrer os 200 m?

•5 A posição de um objeto que se move ao longo de um eixo x é dada por $x = 3t - 4t^2 + t^3$, onde x está em metros e t em segundos. Determine a posição do objeto para os seguintes valores de t: (a) 1 s, (b) 2 s, (c) 3 s, (d) 4 s. (e) Qual é o deslocamento do objeto entre $t = 0$ e $t = 4$ s? (f) Qual é a velocidade média para o intervalo de tempo de $t = 2$ s a $t = 4$ s? (g) Faça o gráfico de x em função de t para $0 \leq t \leq 4$ s e indique como a resposta do item (f) pode ser determinada a partir do gráfico.

•6 Calcule a velocidade média nos dois casos seguintes: (a) você caminha 73,2 m a uma velocidade de 1,22 m/s e depois corre 73,2 m a 3,05 m/s em uma pista reta. (b) Você caminha 1,00 min com uma velocidade de 1,22 m/s e depois corre por 1,00 min a 3,05 m/s em uma pista reta. (c) Faça o gráfico de x em função de t nos dois casos e indique como a velocidade média pode ser determinada a partir do gráfico.

••7 Em uma corrida de 1 km, o corredor 1 da raia 1 (com o tempo de 2 min 27,95 s) parece ser mais rápido que o corredor 2 da raia 2 (2 min 28,15 s). Entretanto, o comprimento L_2 da raia 2 pode ser ligeiramente maior que o comprimento L_1 da raia 1. Qual é o maior valor da diferença $L_2 - L_1$ para a qual a conclusão de que o corredor 1 é mais rápido é verdadeira?

••8 Para estabelecer um recorde de velocidade em uma distância d (em linha reta), um carro deve percorrer a distância primeiro em um sentido (em um tempo t_1) e depois no sentido oposto (em um tempo t_2). (a) Para eliminar o efeito do vento e obter a velocidade do carro v_c na ausência de vento, devemos calcular a média aritmética de d/t_1 e d/t_2 (método 1) ou devemos dividir d pela média aritmética de t_1 e t_2? (b) Qual é a diferença percentual dos dois métodos se existe um vento constante na pista e a razão entre a velocidade v_v do vento e a velocidade v_c do carro é 0,0240?

••9 Você tem que dirigir em uma via expressa para se candidatar a um emprego em outra cidade, a uma distância de 300 km. A entrevista foi marcada para as 11:15 h da manhã. Você planeja dirigir a 100 km/h e parte às 8:00 h da manhã para ter algum tempo de sobra. Você dirige na velocidade planejada durante os primeiros 100 km, depois um trecho da estrada em obras o obriga a reduzir a velocidade para 40 km/h por 40 km. Qual a menor velocidade que você deve manter no resto da viagem para chegar a tempo para a entrevista?

••10 *Situação de pânico.* A Fig. 2-22 mostra uma situação na qual muitas pessoas tentam escapar por uma porta de emergência que está trancada. As pessoas se aproximam da porta com uma velocidade $v_s = 3{,}50$ m/s, têm $d = 0{,}25$ m de espessura e estão separadas por uma distância $L = 1{,}75$ m. A Fig. 2-22 mostra a posição das pessoas no instante $t = 0$. (a) Qual é a taxa média de aumento da camada de pessoas que se comprimem contra a porta? (b) Em que instante a espessura da camada chega a 5,0 m? (As respostas mostram com que rapidez uma situação desse tipo pode colocar em risco a vida das pessoas.)

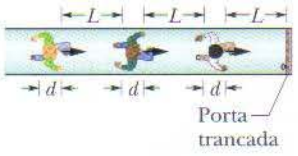


FIG. 2-22 Problema 10.

••11 Dois trens, cada um com velocidade de 30 km/h, trafegam em sentidos opostos na mesma linha férrea retilínea. Um pássaro

capaz de voar a 60 km/h parte da frente de um dos trens, quando eles estão separados por 60 km, e se dirige em linha reta para o outro trem. Ao chegar ao outro trem, o pássaro faz meia-volta e se dirige para o primeiro trem, e assim por diante. (Não temos a menor idéia da *razão* pela qual o pássaro se comporta desta forma.) Qual é a distância total que o pássaro percorre até os trens colidirem?

•••12 *Onda de choque no trânsito.* Quando o trânsito é intenso, uma redução brusca de velocidade pode se propagar como um pulso, denominado *onda de choque*, ao longo de uma fila de carros, no sentido do movimento dos carros, no sentido oposto ou permanecer estacionária. A Fig. 2-23 mostra uma fila de carros regularmente espaçados que estão se movendo a uma velocidade $v = 25{,}00$ m/s em direção a uma fila de carros mais lentos, uniformemente espaçados, que estão se movendo a uma velocidade $v_l = 5{,}00$ m/s. Suponha que cada carro mais rápido acrescenta um comprimento $L = 12{,}0$ m (comprimento do carro mais a distância mínima de segurança) à fila de carros mais lentos ao se juntar à fila, e suponha que reduz bruscamente a velocidade no último momento. (a) Para que distância d entre os carros mais rápidos a onda de choque permanece estacionária? Se a distância é duas vezes maior que este valor, quais são (b) a velocidade e (c) o sentido (o sentido do movimento dos carros ou o sentido contrário) da onda de choque?

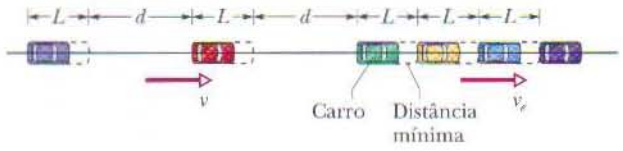


FIG. 2-23 Problema 12.

•••13 Você dirige do Rio a São Paulo metade do *tempo* a 55 km/h e a outra metade a 90 km/h. Na volta, você viaja metade da *distância* a 55 km/h e a outra metade a 90 km/h. Qual é a velocidade escalar média (a) do Rio a São Paulo, (b) de São Paulo ao Rio e (c) na viagem inteira? (d) Qual é a velocidade média na viagem inteira? (e) Plote o gráfico de x em função de t para o item (a), supondo que o movimento ocorre no sentido positivo de x. Mostre como a velocidade média pode ser determinada a partir do gráfico.

seção 2-5 Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar Instantânea

•14 A função posição $x(t)$ de uma partícula que está se movendo ao longo do eixo x é $x = 4{,}0 - 6{,}0t^2$, com x em metros e t em segundos. (a) Em que instante e (b) em que posição a partícula pára (momentaneamente)? Em que (c) instante negativo e (d) instante positivo a partícula passa pela origem? (e) Plote o gráfico de x em função de t para o intervalo de –5 s a +5 s. (f) Para deslocar a curva para a direita no gráfico, devemos acrescentar o termo $+20t$ ou o termo $-20t$ a $x(t)$? (g) Essa modificação aumenta ou diminui o valor de x para o qual a partícula pára momentaneamente?

•15 (a) Se a posição de uma partícula é dada por $x = 4 - 12t + 3t^2$ (onde t está em segundos e x em metros), qual é a velocidade da partícula em $t = 1$ s? (b) O movimento nesse instante é no sentido positivo ou negativo de x? (c) Qual é a velocidade escalar da partícula nesse instante? (d) A velocidade escalar está aumentando ou diminuindo nesse instante? (Tente responder às duas próximas perguntas sem fazer outros cálculos.) (e) Existe algum instante no qual a velocidade se anula? Caso a resposta seja afirmativa, para que valor de t isso acontece? (f) Existe algum instante após $t = 3$ s no qual a partícula está se movendo no sentido negativo de x? Caso a resposta seja afirmativa, para que valor de t isso acontece?

•16 A posição de um elétron que se move ao longo do eixo x é dada por $x = 16te^{-t}$ m, onde t está em segundos. A que distância está o elétron da origem quando pára momentaneamente?

••17 A posição de uma partícula que se move ao longo do eixo x é dada em centímetros por $x = 9{,}75 + 1{,}50t^3$, onde t está em segundos. Calcule (a) a velocidade média durante o intervalo de tempo de $t = 2{,}00$ s a $t = 3{,}00$ s; (b) a velocidade instantânea em $t = 2{,}00$ s; (c) a velocidade instantânea em $t = 3{,}00$ s; (d) a velocidade instantânea em $t = 2{,}50$ s; (e) a velocidade instantânea quando a partícula está na metade da distância entre suas posições em $t = 2{,}00$ s e $t = 3{,}00$ s. (f) Plote o gráfico de x em função de t e indique suas respostas graficamente.

seção 2-6 Aceleração

•18 (a) Se a posição de uma partícula é dada por $x = 20t - 5t^3$, onde x está em metros e t em segundos, em que instante(s) a velocidade da partícula é zero? (b) Em que instante(s) a aceleração a é zero? (c) Para que intervalo de tempo (positivo ou negativo) a aceleração a é negativa? (d) Para que intervalo de tempo (positivo ou negativo) a aceleração a é positiva? (e) Trace os gráficos de $x(t)$, $v(t)$ e $a(t)$.

•19 Em um certo instante de tempo, uma partícula tinha uma velocidade de 18 m/s no sentido positivo de x; 2,4 s depois, a velocidade era 30 m/s no sentido oposto. Qual foi a aceleração média da partícula durante este intervalo de 2,4 s?

•20 A posição de uma partícula que se move ao longo do eixo x é dada por $x = 12t^2 - 2t^3$, onde x está em metros e t em segundos. Determine (a) a posição, (b) a velocidade e (c) a aceleração da partícula em $t = 3{,}0$ s. (d) Qual é a coordenada positiva máxima alcançada pela partícula e (e) em que instante de tempo ela é alcançada? (f) Qual é a velocidade positiva máxima alcançada pela partícula e (g) em que instante de tempo ela é alcançada? (h) Qual é a aceleração da partícula no instante em que a partícula não está se movendo (além do instante $t = 0$)? (i) Determine a velocidade média da partícula entre $t = 0$ e $t = 3{,}0$ s.

••21 A posição de uma partícula que se desloca ao longo do eixo x varia com o tempo de acordo com a equação $x = ct^2 - bt^3$, onde x está em metros e t em segundos. Quais são as unidades (a) da constante c e (b) da constante b? Suponha que os valores numéricos de c e b sejam 3,0 e 2,0, respectivamente. (c) Em que instante a partícula passa pelo maior valor positivo de x? De $t = 0{,}0$ s a $t = 4{,}0$ s, (d) qual é a distância percorrida pela partícula e (e) qual é o seu deslocamento? Determine a velocidade da partícula nos instantes (f) $t = 1{,}0$ s, (g) $t = 2{,}0$ s, (h) $t = 3{,}0$ s e (i) $t = 4{,}0$ s. Determine a aceleração da partícula nos instantes (j) $t = 1{,}0$ s, (k) $t = 2{,}0$ s, (l) $t = 3{,}0$ s e (m) $t = 4{,}0$ s.

••22 De $t = 0$ a $t = 5{,}00$ min um homem fica em pé sem se mover; de $t = 5{,}00$ min a $t = 10{,}0$ min ele caminha em linha reta com uma velocidade de 2,2 m/s. Quais são (a) sua velocidade média $v_{méd}$ e (b) sua aceleração média $a_{méd}$ no intervalo de tempo de 2,00 min a 8,00 min? Quais são (c) $v_{méd}$ e (d) $a_{méd}$ no intervalo de tempo de 3,00 min a 9,00 min? (e) Plote x em função de t e v em função de t, e indique como as respostas de (a) a (d) podem ser obtidas a partir dos gráficos.

seção 2-7 Aceleração Constante: Um Caso Especial

•23 Um elétron possui uma aceleração constante de +3,2 m/s². Em um certo instante, sua velocidade é +9,6 m/s. Qual é sua velocidade (a) 2,5 s antes e (b) 2,5 s depois do instante considerado?

•24 Um múon (uma partícula elementar) penetra em uma região com uma velocidade de $5{,}00 \times 10^6$ m/s e passa a ser desacelerado a uma taxa de $1{,}25 \times 10^{14}$ m/s^2. (a) Qual é a distância percorrida pelo múon até parar? (b) Trace os gráficos de x em função de t e de v em função de t para o múon.

•25 Suponha que uma nave espacial se move com uma aceleração constante de 9,8 m/s^2, que dá aos tripulantes a ilusão de uma gravidade normal durante o vôo. (a) Se a nave parte do repouso, quanto tempo leva para atingir um décimo da velocidade da luz, que é $3{,}0 \times 10^8$ m/s? (b) Que distância a nave percorre nesse tempo?

•26 Em uma estrada seca, um carro com pneus novos é capaz de frear com uma desaceleração constante de 4,92 m/s^2. (a) Quanto tempo esse carro, inicialmente se movendo a 24,6 m/s, leva para parar? (b) Que distância o carro percorre nesse tempo? (c) Trace os gráficos de x em função de t e de v em função de t durante a desaceleração.

•27 Um elétron com velocidade inicial $v_0 = 1{,}50 \times 10^5$ m/s penetra em uma região de comprimento $L = 1{,}00$ cm, onde é eletricamente acelerado (Fig. 2-24), e sai dessa região com $v = 5{,}70 \times 10^6$ m/s. Qual é a aceleração do elétron, supondo que seja constante?

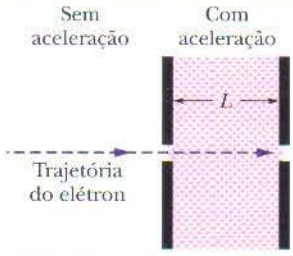


FIG. 2-24 Problema 27.

•28 *Cogumelos lançadores.* Alguns cogumelos lançam esporos usando um mecanismo de catapulta. Quando o vapor d'água do ar se condensa em um esporo preso a um cogumelo, uma gota se forma de um lado do esporo e uma película de água se forma do outro lado. O peso da gota faz o esporo se encurvar, mas, quando a película atinge a gota, a gota d'água se espalha bruscamente pelo filme, e o esporo volta tão depressa à posição original que é lançado no ar. Tipicamente, o esporo atinge uma velocidade de 1,6 m/s em um lançamento de 5,0 μm; em seguida, a velocidade é reduzida a zero em 1,00 mm pelo atrito com o ar. Usando esses dados e supondo que a aceleração é constante, determine a aceleração em unidades de g (a) durante o lançamento; (b) durante a redução de velocidade.

•29 Um veículo elétrico parte do repouso e acelera em linha reta a uma taxa de 2,0 m/s^2 até atingir a velocidade de 20 m/s. Em seguida, o veículo desacelera a uma taxa constante de 1,0 m/s^2 até parar. (a) Quanto tempo transcorre entre a partida e a parada? (b) Qual é a distância percorrida pelo veículo desde a partida até a parada?

•30 O recorde mundial de velocidade em terra foi estabelecido pelo coronel John P. Stapp em março de 1954, a bordo de um trenó-foguete que se deslocou sobre trilhos a 1020 km/h. Ele e o trenó foram freados até parar em 1,4 s. (Veja a Fig. 2-7.) Qual foi a aceleração experimentada por Stapp durante a frenagem, em unidades de g?

•31 Uma certa cabina de elevador percorre uma distância máxima de 190 m e atinge uma velocidade máxima de 305 m/min. A cabina pode acelerar a partir do repouso e desacelerar de volta ao repouso a uma taxa de 1,22 m/s^2. (a) Qual a distância percorrida pela cabina enquanto acelera a partir do repouso até a velocidade máxima? (b) Quanto tempo a cabina leva para percorrer a distância de 190 m, sem paradas, partindo do repouso e chegando com velocidade zero?

•32 Os freios do seu carro podem produzir uma desaceleração de 5,2 m/s^2. (a) Se você dirige a 137 km/h e avista um policial rodoviário, qual é o tempo mínimo necessário para que o carro atinja a velocidade máxima permitida de 90 km/h? (A resposta revela a inutilidade de frear para tentar impedir que sua alta velocidade seja detectada por um radar ou por uma pistola de laser.) (b) Trace os gráficos de x em função de t e de v *versus* t durante a desaceleração.

•33 Um carro que se move a 56,0 km/h está a 24,0 m de uma barreira quando o motorista aciona os freios. O carro bate na barreira 2,00 s depois. (a) Qual é o módulo da aceleração constante do carro antes do choque? (b) Qual é a velocidade do carro no momento do choque?

••34 Um carro se move ao longo do eixo x por uma distância de 900 m, partindo do repouso (em $x = 0$) e terminando em repouso (em $x = 900$ m). No primeiro quarto do percurso a aceleração é de +2,25 m/s^2. Nos outros três quartos a aceleração passa a ser –0,750 m/s^2. Quais são (a) o tempo necessário para percorrer os 900 m e (b) a velocidade máxima? (c) Trace os gráficos da posição x, da velocidade v e da aceleração a em função do tempo t.

••35 A Fig. 2-25 mostra o movimento de uma partícula que se move ao longo do eixo x com aceleração constante. A escala vertical do gráfico é definida por $x_s = 6{,}0$ m. Quais são (a) o módulo e (b) o sentido da aceleração da partícula?

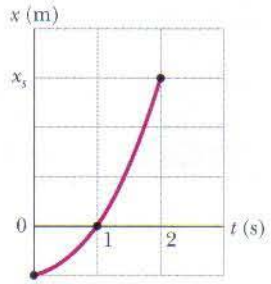


FIG. 2-25 Problema 35.

••36 (a) Se a aceleração máxima que pode ser tolerada pelos passageiros de um metrô é 1,34 m/s^2 e duas estações de metrô estão separadas por uma distância de 806 m, qual é a velocidade máxima que o metrô pode alcançar entre as estações? (b) Qual é o tempo de percurso? (c) Se o metrô pára por 20 s em cada estação, qual é a máxima velocidade escalar média do metrô de uma partida à próxima?

••37 Os carros A e B se movem no mesmo sentido em pistas vizinhas. A posição x do carro A é dada na Fig. 2-26, do instante $t = 0$ ao instante $t = 7{,}0$ s. A escala vertical do gráfico é definida por $x_s = 32{,}0$ m. Em $t = 0$, o carro B está em $x = 0$, com uma velocidade de 12 m/s e uma aceleração negativa a_B. (a) Qual deve ser o valor de a_B para que os carros estejam lado a lado (ou seja, tenham o mesmo valor de x) em $t = 4{,}0$ s? (b) Para esse valor de a_B, quantas vezes os carros ficam lado a lado? (c) Plote a posição x do carro B em função do tempo t na Fig. 2-21. Quantas vezes os carros ficariam lado a lado se o módulo da aceleração a_B fosse (d) maior do que e (e) menor do que o da resposta da parte (a)?

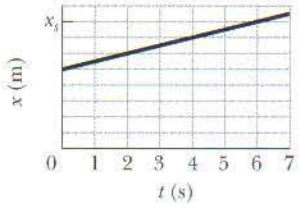


FIG. 2-26 Problema 37.

••38 Você está se aproximando de um sinal de trânsito quando ele fica amarelo. Você está dirigindo na maior velocidade permitida no local, $v_0 = 55$ km/h; o módulo da maior taxa de desaceleração de que o seu carro é capaz é $a = 5{,}18$ m/s^2, e o seu tempo de reação para começar a frear é $T = 0{,}75$ s. Para evitar que a frente do carro invada o cruzamento depois de o sinal mudar para vermelho, você deve frear até parar ou prosseguir a 55 km/h se a distância até o cruzamento e a duração da luz amarela são, respecti-