

# **FUNDAMENTOS DE FÍSICA**

# **1**

## **MECÂNICA**

**4.<sup>a</sup> EDIÇÃO**

**David Halliday**

Universidade de Pittsburgh

**Robert Resnick**

Instituto Politécnico de Rensselaer

**Jearl Walker**

Universidade Estadual de Cleveland

Tradução

**Gerson Bazo Costamilan** (Apêndices A a H)

**João Paulo Pinto dos Santos** (Cap. 10)

**Luciano Videira Monteiro** (Caps. 2, 4, 5, 6 e 11)

**Lucília Marques Pereira da Silva** (Cap. 12)

**Ronaldo Sérgio de Biasi** (Caps. 1, 3, 7, 8 e 9)

Revisão Técnica

**Gerson Bazo Costamilan** (Caps. 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10 e Apêndices A a H)

Professor de Física do Instituto Militar de Engenharia — IME

Mestre e Doutorando em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

**J. A. Souza** (Caps. 4, 6, 11 e 12)

Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense — UFF

**Vicente Roberto Dumke** (Cap. 5)

Professor Titular, Departamento de Física, Universidade Federal do Paraná — UFPR

Mestre e Doutor em Física pela Universidade de São Paulo (Campus São Carlos) — USP

**William Albuquerque** (Cap. 2)

Professor Assistente de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro — UFRJ

Mestre em Engenharia Metalúrgica pela COPPE — UFRJ

Supervisão Geral

**J. A. Souza**



## PREFÁCIO

Nos últimos anos, muito se tem avançado na compreensão das necessidades dos estudantes de Física e no seu preparo visando à carreira nas áreas de Ciência e Engenharia. Ao prepararmos esta quarta edição de *Fundamentos de Física*, deixamo-nos guiar por todas as iniciativas nesse sentido. A partir das idéias fornecidas por um novo co-autor, Jearl Walker, revimos completamente nossa abordagem e a abrangência da matéria, esperando assim que esta nova edição venha contribuir para o aprimoramento do ensino da Física.

### MUDANÇAS NA QUARTA EDIÇÃO

Embora tenhamos mantido a estrutura fundamental da terceira edição, reescrevemos muitos capítulos e muitas seções de outros capítulos. Cada um foi examinado minuciosamente para garantir maior clareza e atualidade de conteúdo, de acordo com as necessidades dos estudantes de Ciência e Engenharia. Foram feitas alterações, em particular, nos textos referentes a atrito, trabalho e energia, eletrostática e ótica.

Revimos por completo os conceitos em uso e suas derivações com o objetivo de encontrar formas melhores ou mais claras de tratá-los. Também acrescentamos mais explicações ou etapas intermediárias, além de novos exemplos a cada capítulo, com o objetivo não só de oferecê-los em maior número aos estudantes, como também de relacioná-los mais de perto com os Exercícios e Problemas de final de capítulo.

Além disso, os Questionários, Exercícios e Problemas do final de cada capítulo foram todos revistos, de modo a proporcionar maior clareza de exposição e interesse, e muitos outros foram acrescentados. No final da maioria dos capítulos também introduzimos uma nova seção, denominada "Problemas Adicionais", que não está diretamente relacionada com as seções do capítulo.

Dedicamos especial atenção às ilustrações de tópicos da Física aplicados a problemas do mundo real. O melhor exemplo é a "pergunta difícil" que abre cada capítulo. Estes exemplos de fenômenos curiosos, muitos dos quais tão comuns, foram escolhidos de modo a despertar o interesse do estudante. As explicações das perguntas difíceis são dadas dentro dos capítulos, ou na discussão de um texto, ou num dos Exemplos. Como provavelmente os estudantes verão estes fenômenos ou outros a eles relacionados após o término do curso de Física, as perguntas difíceis proporcionam um reforço a longo prazo da Física associada.

Uma vez que os diagramas que acompanham as discussões da Física são imprescindíveis para a sua compre-

ensão, revimos todos os diagramas do livro com a finalidade de torná-los mais claros e úteis. Quase todos mudaram de alguma forma, e outros, novos, foram acrescentados.

### CARACTERÍSTICAS DOS CAPÍTULOS

As características de cada capítulo foram cuidadosamente planejadas a fim de motivar os estudantes e orientar seu raciocínio.

#### Perguntas Difíceis

Cada capítulo começa com uma "pergunta difícil" sobre Física e que descreve um fenômeno curioso. O objetivo é estimular o estudante. Essas perguntas se relacionam aos respectivos capítulos, e as fotos a elas correspondentes foram especialmente escolhidas de modo a tornar a Física pertinente algo inesquecível para o estudante. As explicações vêm dentro do texto, no caso de explicações qualitativas, ou dentro de um Exemplo, no caso de explicações quantitativas. Quando a resposta vem dentro do Exemplo, a pergunta difícil tem o objetivo de preparar o estudante para os problemas mais desafiadores do final do capítulo.

#### Exemplos

Nesta edição, aumentamos o número de Exemplos, de modo a fornecer modelos de soluções de problemas para todos os aspectos de cada capítulo. Modificamos muitos Exemplos da edição anterior para relacioná-los mais estreitamente aos Exercícios e Problemas de final de capítulo. Todos os Exemplos foram cuidadosamente preparados para os estudantes obterem o máximo. Assim, mais de 50% deles podem ser considerados novos de alguma forma.

Estes Exemplos oferecem ao estudante a oportunidade de chegar, passo a passo, com a ajuda dos autores, à resposta de um problema. Assim, constituem uma ponte entre a Física do texto e os problemas de final de capítulo, e possibilitam a ordenação de conceitos, terminologia e simbolização, além de reforçar a habilidade matemática e estimular a capacidade de descobrir estratégias "diretas" de solução.

#### Táticas para a Resolução de Problemas

Uma característica da edição anterior foi o extremo cuidado em desenvolver no estudante a habilidade de resolver problemas, o que fizemos questão de manter na presente

edição, com seções intituladas para a Resolução de Problemas, onde, por meio de “táticas”, enfatizamos as técnicas consagradas de especialistas nos temas, revemos a lógica dos Exemplos e discutimos as más interpretações de terminologia e de conceitos da Física. Como na terceira edição, a maioria dessas orientações de aprendizagem aparece nos primeiros volumes da série, onde os estudantes precisam de mais ajuda, mas agora aparecem também nos últimos, quando surgem situações especialmente difíceis.

### Questionários, Exercícios e Problemas

O conjunto de Questionários, Exercícios e Problemas do final de cada capítulo é, sem dúvida alguma, mais extenso e variado que qualquer outro encontrado em textos introdutórios de Física. Revisamos os melhores conjuntos das edições anteriores, tornando-os mais claros e interessantes, e acrescentamos um número considerável de questões, exercícios e problemas conceituais. Cuidamos para atender aos diversos níveis e à abrangência da matéria que têm caracterizado nossos textos. Ao mesmo tempo, procuramos não descartar os bons problemas que por muitos anos vêm sendo discutidos em sala de aula. Aqueles que utilizam nosso texto há muitos anos certamente encontrarão seus problemas favoritos.

Para melhor ilustrar os Questionários, Exercícios e Problemas, utilizamos um número maior de figuras e fotografias.

**Questionários.** Os Questionários constituem uma característica especial de nossos livros. São usados em discussões teóricas em sala de aula e no esclarecimento dos conceitos. Agora, além de em maior número, relacionam-se ainda mais com os fenômenos cotidianos, o que serve para despertar a curiosidade e o interesse do estudante, bem como enfatizar os aspectos conceituais da Física.

**Exercícios e Problemas.** Os Exercícios, identificados pela letra E após sua numeração, envolvem um único passo ou uma simples aplicação de fórmula. Desse modo, servem para dar confiança ao estudante na resolução dos problemas. Os Problemas são identificados pela letra P; entre eles, apresentamos um pequeno número de problemas avançados, identificados por asterisco (\*).

Além disso, apresentamos os Exercícios “E” e os Problemas “P” em ordem de dificuldade e separados pelos títulos das respectivas seções. Nosso objetivo foi simplificar o processo de seleção por parte dos professores ante a grande quantidade de material agora disponível. Consequentemente, os professores podem variar a ênfase nos diversos assuntos e o nível de dificuldade de acordo com a situação, e ainda dispor de um bom número de exercícios e problemas para instruir seus alunos por muitos anos.

**Problemas Adicionais.** A pedido de muitos professores, acrescentamos no final da maioria dos capítulos uma nova seção, denominada “Problemas Adicionais”. Enquanto resolvem esses problemas, que são independentes das seções do capítulo, os estudantes devem identificar, por si mesmos, os princípios relevantes da Física.

### Aplicações e Leituras Complementares

Para enfatizar a relevância do trabalho dos físicos e motivar ainda mais os estudantes, incluímos dentro de cada capítulo numerosas aplicações da Física na Engenharia, na Tecnologia, na Medicina e nos fenômenos da vida cotidiana.

Além disso, mantivemos as leituras complementares escritas por cientistas de renome e que tratam das aplicações da Física relacionando-a a temas de interesse dos estudantes, tais como dança, esporte, efeito estufa, laser, holografia e muitos outros. (Veja o Sumário.) Dentre as leituras complementares, algumas são novas, e as demais, trazidas da terceira edição, foram revistas e atualizadas por seus autores. A maioria das leituras complementares faz referência ao assunto do capítulo em questão e contém perguntas para estimular o raciocínio do estudante.

### FÍSICA MODERNA

Como a terceira edição, esta é composta de 49 capítulos, incluindo um desenvolvimento do tema da Física quântica e suas aplicações aos átomos, sólidos, núcleos e partículas. Tais capítulos destinam-se a cursos introdutórios que tratam da Física quântica, podendo ser abordados num curso subsequente.

Nos capítulos iniciais, procuramos preparar o caminho para um estudo sistemático da Física quântica. Fizemos isso de três maneiras. (1) Chamamos a atenção, através de exemplos específicos, para o impacto das idéias quânticas sobre nosso cotidiano. (2) Demos ênfase àqueles conceitos (princípios de conservação, argumentos de simetria, sistemas de referência, papel da estética, similaridade de métodos, uso de modelos, conceitos de campo, conceito de onda, etc.) que são comuns no tratamento tanto da Física clássica como da quântica. (3) Por fim, incluímos diversas seções opcionais curtas nos últimos capítulos, onde apresentamos conceitos quânticos e relativísticos, selecionados de modo a fundamentar o tratamento detalhado e sistemático das físicas relativística, atômica, nuclear, do estado sólido e das partículas.

### FLEXIBILIDADE

Além dos capítulos de Física quântica e das seções opcionais sobre tópicos quânticos, incluímos por todo o texto numerosas seções, também opcionais, de caráter diverso: avançado, histórico, geral ou especializado.

Procuramos oferecer ao professor muito mais material do que ele na verdade tem condições de abordar, pois acreditamos que, assim como um livro-texto sozinho não pode ser considerado um curso, um curso não abrange todo um livro-texto. O processo de aprendizagem da Física e sua unidade essencial podem ser revelados por uma apresentação seletiva e criteriosa de um número menor de capítulos do que os aqui apresentados, ou por uma apresentação apenas parcial de alguns capítulos. Em vez de dar numerosos

exemplos de como fazer esta seleção corretamente, aconselhamos os professores a se deixarem guiar pelos seus próprios interesses e pelas circunstâncias, e que façam um plano de aula de modo a incluir sempre tópicos de Física relativística e de Física quântica.

## AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram para a edição desta obra. J. Richard Christman (U.S. Coast Guard Academy) mais uma vez prestou grande colaboração e enriqueceu o texto com valiosas informações. James Tanner (Georgia Institute of Technology) forneceu-nos material inovador que foi de grande auxílio na elaboração dos exercícios e problemas do texto. Albert Altman (University of Lowell, Massachusetts) e Harry Dulaney (Georgia Institute of Technology) contribuíram com muitos problemas novos. Agradecemos a John Merrill (Brigham Young University) e Edward Derrin (Wentworth Institute of Technology) por suas numerosas contribuições no passado.

Os autores das Leituras Complementares ofereceram seu *know-how* em muitas áreas da Física aplicada. Agradecemos a Charles Bean (Rensselaer Polytechnic Institute), Peter Brancazio (Brooklyn College of SUNY), Patricia Cladis (AT&T Bell Laboratories), Joseph Ford (Georgia Institute of Technology), Elsa Garmire (University of Southern California), Ivar Giaever (Rensselaer Polytechnic Institute), Tung H. Jeong (Lake Forest College), Barbara Levi (*Physics Today*), Kenneth Laws (Dickinson College), Peter Lindenfeld (State University of New Jersey-Rutgers), Suzanne Nagel (AT&T Laboratories), Sally K. Ride (University of California at San Diego), John Ridgen (American Institute of Physics), Thomas D. Rossing (Northern Illinois University) e Raymond Turner (Clemson University).

Um grupo de estudantes de pós-graduação da Johns Hopkins University conferiu cada exercício e cada problema, tarefa verdadeiramente exaustiva. Agradecemos a Anton Andreev, Kevin Fournier, Jidong Jiang, John Kordomenos, Mark May, Jason McPhate, Patrick Morrissey, Mark Sincell, Olaf Vancura, John Q. Xiao e Andrew Zwicker, nosso coordenador.

Da John Wiley, contamos com a coordenação e o suporte de Cliff Mills, nosso diretor de publicações. Ele orientou nossos trabalhos e incentivou-nos durante todo o tempo. Barbara Heaney coordenou todas as atividades relativas ao processo de elaboração da nova edição. Catherine Faduska, nossa gerente de marketing, foi incansável em seu trabalho nesta edição, assim como na edição anterior. Joan Kalkut responsabilizou-se pelo material de apoio. Anne Scargill editou as Leituras Complementares. Cathy Donovan e Julia Salisbury supervisionaram a revisão e os trâmites administrativos com admirável competência.

Agradecemos a Lucille Buonocore, nossa competente gerente de produção, por orientar-nos através do complexo processo de produção. Agradecemos também a Dawn Stanley pelo seu projeto gráfico, Deborah Herbert, por supervisionar a revisão de redação, Christina Della Bartolo-

mea, pelo copidesque, Edward Starr, pela direção de arte, Lilian Brady, por sua revisão tipográfica, e a todos os outros membros da equipe de produção.

Agradecemos a Stella Kupferberg e sua equipe de pesquisadores de fotos, em particular Charles Hamilton, Hilary Newman e Pat Cadley, por suas fotos originais e interessantes, que expressam os princípios da Física com muita beleza. Somos todos gratos ainda a Edward Millman e Irene Nunes, pela excelente diagramação, em nome da qual eles examinaram cada seção e sugeriram revisões. Em relação à equipe de arte, temos a obrigação de expressar nossa dívida de gratidão com o falecido John Balbalis, cujo estilo meticuloso e compreensão da Física se fazem presentes em cada diagrama.

Finalmente, agradecemos a Edward Millman por seu trabalho com os manuscritos. Junto conosco, ele leu cada frase, fazendo perguntas sob a ótica do estudante. Muitas dessas perguntas e as alterações sugeridas contribuíram para a clareza desta edição. Irene Nunes realizou uma última e valiosa revisão nas fases finais da produção do livro.

Nossos demais colaboradores foram admiráveis e expressamos a cada um deles nossos agradecimentos:

Professor Maris A. Abolins  
Michigan State University

Professora Barbara Andereck  
Ohio Wesleyan University

Professor Albert Bartlett  
University of Colorado

Professor Timothy J. Burns  
Leeward Community College

Professor Joseph Buschi  
Manhattan College

Professor Philip A. Casabella  
Rensselaer Polytechnic Institute

Professor Randall Caton  
Christopher Newport College

Professor Roger Clapp  
University of South Florida

Professor W. R. Conkie  
Queen's University

Professor Peter Crooker  
University of Hawaii at Manoa

Professor William P. Crummett  
Montana College of Mineral Science and Technology

Professor Robert Endorf  
University of Cincinnati

Professor F. Paul Esposito  
University of Cincinnati

Professor Jerry Finkelstein  
San Jose State University

## viii PREFÁCIO

Professor Alexander Firestone  
Iowa State University

Professor Alexander Gardner  
Howard University

Professor Andrew L. Gardner  
Brigham Young University

Professor John Gieniec  
Central Missouri State University

Professor John B. Gruber  
San Jose State University

Professora Ann Hanks  
American River College

Professor Samuel Harris  
Purdue University

Emily Haught  
Georgia Institute of Technology

Professor Laurent Hodges  
Iowa State University

Professor John Hubisz  
College of the Mainland

Professor Joey Huston  
Michigan State University

Professor Darrell Huwe  
Ohio University

Professor Claude Kacser  
University of Maryland

Professor Leonard Kleinman  
University of Texas at Austin

Professor Arthur Z. Kovacs  
Rochester Institute of Technology

Professor Kenneth Krane  
Oregon State University

Professor Sol Krasner  
University of Illinois at Chicago

Professor Robert R. Marchini  
Memphis State University

Professor David Markowitz  
University of Connecticut

Professor Howard C. McAllister  
University of Hawaii at Manoa

Professor W. Scott McCullough  
Oklahoma State University

Professor Roy Middleton  
University of Pennsylvania

Professor Irvin A. Miller  
Drexel University

Professor Eugene Mosca  
United States Naval Academy

Professor Patrick Papin  
San Diego State University

Professor Robert Pelcovits  
Brown University

Professor Oren P. Quist  
South Dakota State University

Professor Jonathan Reichen  
SUNY—Buffalo

Professor Manuel Schwartz  
University of Louisville

Professor John Spangler  
St. Norbert College

Professor Ross L. Spencer  
Brigham Young University

Professor Harold Stokes  
Brigham Young University

Professor David Toot  
Alfred University

Professor J. S. Turner  
University of Texas at Austin

Professor T. S. Venkataraman  
Drexel University

Professor Gianfranco Vidali  
Syracuse University

Professor Fred Wang  
Prairie View A & M

Professor George A. Williams  
University of Utah

Professor David Wolfe  
University of New Mexico

A origem desta nova edição remonta ao texto *Physics for Students of Science and Engineering* (John Wiley & Sons, Inc., 1960) dos mesmos autores da terceira edição. Desde aquela época, estima-se que um número superior a cinco milhões de estudantes tenha-se iniciado no aprendizado da Física com este livro e aqueles que dele se originaram, incluindo as traduções em muitas línguas. Dedicamos esta quarta edição a esses estudantes, e desejamos que ela também seja bem aceita por todos aqueles a quem se destina.

DAVID HALLIDAY

ROBERT RESNICK

JEARL WALKER

# SUMÁRIO GERAL

## Volume 1 MECÂNICA

Capítulo 1	Medição /
Capítulo 2	Movimento Retilíneo /3
Capítulo 3	Vetores em Duas e Três Dimensões 55
Capítulo 4	Movimento em Duas e Três Dimensões 55
Capítulo 5	Força e Movimento — I 81
Capítulo 6	Força e Movimento — II 109
Capítulo 7	Trabalho e Energia Cinética 131
Capítulo 8	Conservação da Energia 155
Capítulo 9	Sistemas de Partículas 187
Capítulo 10	Colisões 213
Capítulo 11	Rotação 239
Capítulo 12	Rolamento, Torque e Momento Angular 267
Apêndices 299	
Respostas dos Exercícios e Problemas 323	
Créditos das Fotos 327	
Índice 329	

## Volume 2 GRAVITAÇÃO, ONDAS E TERMODINÂMICA

Capítulo 13	Equilíbrio e Elasticidade /
Capítulo 14	Oscilações 25
Capítulo 15	Gravitação 57
Capítulo 16	Fluidos 81
Capítulo 17	Ondas — I 111
Capítulo 18	Ondas — II 137
Capítulo 19	Temperatura 169
Capítulo 20	Calor e Primeira Lei da Termodinâmica 183
Capítulo 21	A Teoria Cinética dos Gases 207
Capítulo 22	Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica 237
Apêndices 263	
Respostas dos Exercícios e Problemas 287	
Créditos das Fotos 289	
Índice 291	

## Volume 3 ELETROMAGNETISMO

Capítulo 23	Carga Elétrica /
Capítulo 24	O Campo Elétrico 17
Capítulo 25	Lei de Gauss 39
Capítulo 26	Potencial Elétrico 63
Capítulo 27	Capacitância 91
Capítulo 28	Corrente e Resistência 113
Capítulo 29	Circuito 133
Capítulo 30	O Campo Magnético 157
Capítulo 31	Lei de Ampère 183
Capítulo 32	Lei da Indução de Faraday 207
Capítulo 33	Indutância 235
Capítulo 34	O Magnetismo e a Matéria 257
Capítulo 35	Oscilações Eletromagnéticas 277
Capítulo 36	Correntes Alternadas 291
Capítulo 37	As Equações de Maxwell 309
Apêndices 319	
Respostas dos Exercícios e Problemas 343	
Créditos das Fotos 345	
Índice 349	

## Volume 4 ÓTICA E FÍSICA MODERNA

Capítulo 38	Ondas Eletromagnéticas /
Capítulo 39	Ótica Geométrica 25
Capítulo 40	Interferência 61
Capítulo 41	Difração 91
Capítulo 42	Relatividade 123
Capítulo 43	Física Quântica — I 151
Capítulo 44	Física Quântica — II 173
Capítulo 45	Modelos Atômicos 199
Capítulo 46	Condução de Eletricidade nos Sólidos 227
Capítulo 47	Física Nuclear 253
Capítulo 48	Energia Nuclear 277
Capítulo 49	Quarks, Léptons e o Big-Bang 299
Apêndices 321	
Respostas dos Exercícios e Problemas 345	
Créditos das Fotos 347	
Índice 349	

# SUMÁRIO DESTE VOLUME

## CAPÍTULO 1

### MEDIÇÃO 1

*De que modo podemos usar o pôr-do-Sol para medir o raio da Terra?*

- 1-1 Medindo Grandezas 1
- 1-2 O Sistema Internacional de Unidades 2
- 1-3 Mudanças de Unidades 2
- 1-4 Comprimento 3
- 1-5 Tempo 5
- 1-6 Massa 7
- Resumo 8
- Questionário 8
- Exercícios e Problemas 9

## CAPÍTULO 2

### MOVIMENTO RETILÍNEO 13

*Por que uma competição automobilística é tão emocionante?*

- 2-1 Movimento 13
- 2-2 Posição e Deslocamento 14
- 2-3 Velocidade Média e Velocidade Escalar Média 14
- 2-4 Velocidade Instantânea e Velocidade Escalar 17
- 2-5 Aceleração 19
- 2-6 Aceleração Constante: Um Caso Especial 20
- 2-7 Aceleração Constante: Outro Aspecto 22
- 2-8 Aceleração de Queda Livre 23
- 2-9 As Partículas da Física 25
- Resumo 27
- Questionário 28
- Exercícios e Problemas 28
- Problemas Adicionais 35

LEITURA COMPLEMENTAR 1 O TRÁFEGO NA HORA DO RUSH 36  
Jearyl Walker

## CAPÍTULO 3

### VETORES 39

*Como podemos usar os vetores na exploração de cavernas?*

- 3-1 Vetores e Escalares 39
- 3-2 Soma de Vetores: Método Gráfico 40
- 3-3 Vetores e Suas Componentes 42
- 3-4 Vetores Unitários 41

- 3-5 Somando Vetores Através das Componentes 41
- 3-6 Os Vetores e as Leis da Física 46
- 3-7 Multiplicação de Vetores 46
- Resumo 49
- Questionário 50
- Exercícios e Problemas 50
- Problemas Adicionais 54

## CAPÍTULO 4

### MOVIMENTO EM DUAS E TRÊS DIMENSÕES 55

*Como determinar o local correto da rede para o "homem-bala" lançado do canhão?*

- 4-1 Movimento em Duas ou Três Dimensões 55
- 4-2 Posição e Deslocamento 55
- 4-3 Velocidade e Velocidade Média 56
- 4-4 Aceleração e Aceleração Média 57
- 4-5 Movimento de Projéteis 60
- 4-6 Análise do Movimento de Projéteis 61
- 4-7 Movimento Circular Uniforme 65
- 4-8 Movimento Relativo em Uma Dimensão 67
- 4-9 Movimento Relativo em Duas Dimensões 68
- 4-10 Movimento Relativo para Altas Velocidades (Opcional) 70
- Resumo 71
- Questionário 72
- Exercícios e Problemas 73
- Problemas Adicionais 80

## CAPÍTULO 5

### FORÇA E MOVIMENTO — I 81

*Um homem pode puxar dois vagões de um trem de passageiros com os dentes?*

- 5-1 Por que a Velocidade de uma Partícula Varia? 81
- 5-2 Primeira Lei de Newton 82
- 5-3 Força 83
- 5-4 Massa 83
- 5-5 Segunda Lei de Newton 84
- 5-6 Algumas Forças Específicas 87
- 5-7 Terceira Lei de Newton 89
- 5-8 Aplicação das Leis de Newton 91
- Resumo 97
- Questionário 98
- Exercícios e Problemas 100
- Problemas Adicionais 106

## CAPÍTULO 6

## FORÇA E MOVIMENTO — II 109

*Por que os gatos sobrevivem melhor às quedas de grandes alturas do que às de pequenas alturas?*

- 6-1 Atrito 109
- 6-2 Propriedades do Atrito 111
- 6-3 Força de Viscosidade e Velocidade Limite 114
- 6-4 Movimento Circular Uniforme 116
- 6-5 As Forças da Natureza 120

*Resumo 121*

*Questionário 122*

*Exercícios e Problemas 123*

*Problemas Adicionais 129*

## CAPÍTULO 7

## TRABALHO E ENERGIA CINÉTICA 131

*Quanto trabalho é necessário no levantamento de grandes pesos?*

- 7-1 Um Passeio pela Mecânica Newtoniana 131
- 7-2 Trabalho: Movimento em uma Dimensão com Força Constante 131
- 7-3 Trabalho Executado por uma Força Variável 137
- 7-4 Trabalho Realizado por uma Mola 138
- 7-5 Energia Cinética 140
- 7-6 Potência 143
- 7-7 Energia Cinética a Velocidades Elevadas (Opcional) 145
- 7-8 Sistemas de Referência 146

*Resumo 147*

*Questionário 148*

*Exercícios e Problemas 149*

*Problemas Adicionais 153*

## CAPÍTULO 8

## CONSERVAÇÃO DA ENERGIA 155

*Até onde cairá um saltador amarrado por uma corda elástica?*

- 8-1 Trabalho e Energia Potencial 155
- 8-2 Energia Mecânica 156
- 8-3 Determinação da Energia Potencial 158
- 8-4 Forças Conservativas e Não-conservativas 164
- 8-5 Usando uma Curva de Energia Potencial 165
- 8-6 Conservação da Energia 167
- 8-7 Trabalho Executado por Forças de Atrito 168
- 8-8 Massa e Energia (Opcional) 170
- 8-9 Quantização da Energia (Opcional) 172

*Resumo 173*

*Questionário 174*

*Exercícios e Problemas 175*

*Problemas Adicionais 185*

## CAPÍTULO 9

## SISTEMAS DE PARTÍCULAS 187

*Como aparentemente uma bailarina “ignora” as leis de Newton?*

- 9-1 Um Ponto Especial 187
- 9-2 O Centro de Massa 187
- 9-3 A Segunda Lei de Newton para um Sistema de Partículas 192
- 9-4 Momento Linear 195
- 9-5 O Momento Linear de um Sistema de Partículas 196
- 9-6 Conservação do Momento Linear 196
- 9-7 Sistemas de Massa Variável: Um Foguete (Opcional) 200
- 9-8 Sistemas de Partículas: Variações na Energia Cinética (Opcional) 202

*Resumo 204*

*Questionário 205*

*Exercícios e Problemas 206*

*Problemas Adicionais 211*

## CAPÍTULO 10

## COLISÕES 213

*No karatê, é mais fácil quebrar uma tábua ou um bloco de concreto?*

- 10-1 O Que É uma Colisão? 213
- 10-2 Impulso e Momento Linear 214
- 10-3 Colisões Elásticas em Uma Dimensão 217
- 10-4 Colisões Inelásticas em Uma Dimensão 221
- 10-5 Colisões em Duas Dimensões 224
- 10-6 Reações e Processos de Decaimento (Opcional) 226

*Resumo 228*

*Questionário 229*

*Exercícios e Problemas 230*

*Problemas Adicionais 236*

## CAPÍTULO 11

## ROTAÇÃO 239

*Que vantagens o conhecimento de física oferece nas quedas em judô?*

- 11-1 O Movimento de uma Patinadora 239
- 11-2 As Variáveis da Rotação 239
- 11-3 Grandezas Angulares como Vetores: Uma Digressão 242
- 11-4 Rotação com Aceleração Angular Constante 244
- 11-5 As Variáveis Lineares e Angulares 245
- 11-6 Energia Cinética de Rotação 247
- 11-7 Cálculo do Momento de Inércia 248
- 11-8 Torque 251
- 11-9 A Segunda Lei de Newton para a Rotação 252
- 11-10 Trabalho, Potência e o Teorema do Trabalho-Energia Cinética 254

*Resumo 256*

*Questionário 258*

*Exercícios e Problemas 259*

*Problemas Adicionais 265*



## CAPÍTULO 12

ROLAMENTO, TORQUE E MOMENTO  
ANGULAR 267

*Por que é tão difícil realizar um salto mortal  
quádruplo em um número de trapézio?*

- 12-1 Rolamento 267
- 12-2 O loiô 272
- 12-3 Torque Revisitado 273
- 12-4 Momento Angular 274
- 12-5 Segunda Lei de Newton na Forma Angular 276
- 12-6 Momento Angular de um Sistema de Partículas 277
- 12-7 Momento Angular de um Corpo Rígido que Gira em  
Torno de um Eixo Fixo 277
- 12-8 Conservação do Momento Angular 279
- 12-9 Conservação do Momento Angular: Alguns Exemplos 279
- 12-10 Precessão de um Giroscópio (Opcional) 283
- 12-11 Quantização do Momento Angular (Opcional) 285
- Resumo 285*
- Questionário 286*
- Exercícios e Problemas 288*
- Problemas Adicionais 293*

LEITURA COMPLEMENTAR 2 A MECÂNICA DOS GIROS NA  
DANÇA 294  
*Kenneth Laws*

## APÊNDICES

- A O Sistema Internacional de Unidades (SI) 299
- B Algumas Constantes Fundamentais da Física 301
- C Alguns Dados Astronômicos 303
- D Propriedades dos Elementos 305
- E Tabela Periódica dos Elementos 307
- F Fatores de Conversão 309
- G Fórmulas Matemáticas 313
- H Laureados com o Prêmio Nobel de Física 317

RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS E PROBLEMAS 323  
CRÉDITOS DAS FOTOS 327

ÍNDICE 329

# ALGUMAS CONSTANTES FÍSICAS\*

Velocidade da luz	$c$	$3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante gravitacional	$G$	$6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
Constante de Avogadro	$N_A$	$6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante universal dos gases	$R$	$8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
Relação massa-energia	$c^2$	$8,99 \times 10^{16} \text{ J/kg}$
		$931,5 \text{ MeV/u}$
Constante de permissividade do vácuo	$\epsilon_0$	$8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Constante de permeabilidade do vácuo	$\mu_0$	$1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Constante de Planck	$h$	$6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
		$4,14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
Constante de Boltzmann	$k$	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
		$8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
Carga elementar	$e$	$1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Massa de repouso do elétron	$m_e$	$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Massa de repouso do próton	$m_p$	$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Raio de Bohr	$r_B$	$5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$
Magnéton de Bohr	$\mu_B$	$9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
		$5,79 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$

\*Para uma lista mais completa, que também mostre os melhores valores experimentais, consultar o Apêndice B.

## PREFIXOS SI

FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO	FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO
$10^{24}$	iota	Y	$10^{-1}$	deci	d
$10^{21}$	zeta	Z	$10^{-2}$	centi	c
$10^{18}$	exa	E	$10^{-3}$	mili	m
$10^{15}$	peta	P	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{12}$	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	$10^{-18}$	ato	a
$10^2$	hecto	h	$10^{-21}$	zepto	z
$10^1$	deca	da	$10^{-24}$	iocto	y

# ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICAS

**Ar** (seco, a 20°C e 1 atm)

Densidade	1,21 kg/m <sup>3</sup>
Calor molar específico a pressão constante	1.010 J/kg·K
Razão de calor molar	1,40
Velocidade do som	343 m/s
Tensão de rotura do campo elétrico	$3 \times 10^6$ V/m
Massa molar eficaz	0,0289 kg/mol

**Água**

Densidade	1.000 kg/m <sup>3</sup>
Velocidade do som	1.460 m/s
Calor específico a pressão constante	4.190 J/kg·K
Ponto de fusão (0°C)	333 kJ/kg
Ponto de ebulição (100°C)	2.260 kJ/kg
Índice de refração ( $\lambda = 589$ nm)	1,33
Massa molar	0,0180 kg/mol

**Terra**

Massa	$5,98 \times 10^{24}$ kg
Raio médio	$6,37 \times 10^6$ m
Aceleração normal da gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>
Atmosfera padrão	$1,01 \times 10^5$ Pa
Período do satélite a 100 km de altitude	86,3 min
Raio da órbita geossíncronica	42.200 km
Velocidade de escape	11,2 km/s
Momento de dipolo magnético	$8,0 \times 10^{22}$ A·m <sup>2</sup>
Campo elétrico médio na superfície	150 V/m, baixa

**Distância até a(o):**

Lua	$3,82 \times 10^8$ m
Sol	$1,50 \times 10^{11}$ m
Estrela mais próxima	$4,04 \times 10^{16}$ m
Centro da galáxia	$2,2 \times 10^{20}$ m
Galáxia Andrômeda	$2,1 \times 10^{22}$ m
Limite do universo observável	$\sim 10^{26}$ m

## ALFABETO GREGO

Alfa	Α	α	Iota	Ι	ι	Rô	Ρ	ρ
Beta	Β	β	Kapa	Κ	κ	Sigma	Σ	σ
Gama	Γ	γ	Lâmbda	Λ	λ	Tau	Τ	τ
Delta	Δ	δ	Mi	Μ	μ	Úpsilon	Υ	υ
Épsilon	Ε	ε	Ni	Ν	ν	Fi	Φ	φ, ϕ
Zeta	Ζ	ζ	Xi	Ξ	ξ	Qui	Χ	χ
Eta	Η	η	Ômicron	Ο	ο	Psi	Ψ	ψ
Teta	Θ	θ	Pi	Π	π	Ômega	Ω	ω

# CONVENÇÕES DE ALGUNS SINAIS

DESCRIÇÃO	CONVENÇÃO												
<b>Efeito Doppler</b> Seção 18-7 (Vol. 2) Seção 42-12 (Vol. 4)	Associamos o <i>aumento de frequência</i> com o sentido <i>para a frente</i> e arbitramos um sinal para isso; consideramos o efeito de cada movimento separadamente.												
<b>Termodinâmica</b> Seção 20-5 (Vol. 2)	<i>Calor</i> : Positivo quando <i>transferido</i> ao sistema. <i>Trabalho</i> : Positivo quando <i>realizado</i> pelo sistema.												
<b>Diferenças de potencial nos elementos de um circuito</b> Seção 29-3 (Vol. 3)	<i>Resistor</i> : Positiva quando atravessado pela corrente elétrica em sentido contrário à diferença de potencial. <i>fem</i> $\mathcal{E}$ : Positiva no sentido do pólo negativo para o positivo da fonte.												
<b>Correntes alternadas</b> Cap. 36 (Vol. 3)	Relações de fase entre a corrente $i$ , <i>fem</i> $\mathcal{E}$ , capacitância $C$ e indutância $L$ . $\mathcal{E}$ gera $i$ em circuitos indutivos; $i$ produz $\mathcal{E}$ em circuitos capacitivos.												
<b>Ótica geométrica</b> Cap. 39 (Vol. 4)	Para espelhos, superfícies únicas e lentes, convencionamos que a <i>imagem real</i> , o lado $R$ (do inglês <i>Right</i> ) e a <i>imagem direita</i> são positivos. Logo, são positivos: <table><tr><td><math>p</math></td><td>Objeto real</td><td><math>f</math></td><td>Foco real (no ponto focal no lado <math>R</math>)</td></tr><tr><td><math>i</math></td><td>Imagem real (no lado <math>R</math>)</td><td><math>m</math></td><td>Amplificação lateral para uma imagem direita</td></tr><tr><td><math>r</math></td><td>Centro da curvatura no lado <math>R</math></td><td></td><td></td></tr></table>	$p$	Objeto real	$f$	Foco real (no ponto focal no lado $R$ )	$i$	Imagem real (no lado $R$ )	$m$	Amplificação lateral para uma imagem direita	$r$	Centro da curvatura no lado $R$		
$p$	Objeto real	$f$	Foco real (no ponto focal no lado $R$ )										
$i$	Imagem real (no lado $R$ )	$m$	Amplificação lateral para uma imagem direita										
$r$	Centro da curvatura no lado $R$												

# ALGUNS FATORES DE CONVERSÃO\*

## Massa e Densidade

$1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g} = 6,02 \times 10^{26} \text{ u}$   
 $1 \text{ slug} = 14,6 \text{ kg}$   
 $1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
 $1 \text{ kg/m}^3 = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

## Comprimento e Volume

$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 39,4 \text{ in.} = 3,28 \text{ ft}$   
 $1 \text{ mi} = 1,61 \text{ km} = 5.280 \text{ ft}$   
 $1 \text{ in.} = 2,54 \text{ cm}$   
 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ Å}$   
 $1 \text{ ano-luz} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$   
 $1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ l} = 35,3 \text{ ft}^3 = 264 \text{ gal}$

## Tempo

$1 \text{ d} = 86.400 \text{ s}$   
 $1 \text{ ano} = 365 \frac{1}{4} \text{ d} = 3,16 \times 10^7 \text{ s}$

## Medida Angular

$1 \text{ rad} = 57,3^\circ = 0,159 \text{ rev}$   
 $\pi \text{ rad} = 180^\circ = \frac{1}{2} \text{ rev}$

## Velocidade

$1 \text{ m/s} = 3,28 \text{ ft/s} = 2,24 \text{ mi/h}$   
 $1 \text{ km/h} = 0,621 \text{ mi/h} = 0,278 \text{ m/s}$

## Força e Pressão

$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dinas} = 0,225 \text{ lb}$   
 $1 \text{ lb} = 4,45 \text{ N}$   
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dinas/cm}^2$   
 $= 1,45 \times 10^{-4} \text{ lb/in.}^2$   
 $1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa} = 14,7 \text{ lb/in.}^2$   
 $= 76 \text{ cm Hg}$

## Trabalho e Potência

$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 9,239 \text{ cal} = 0,738 \text{ ft} \cdot \text{lb}$   
 $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$   
 $1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$   
 $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 $1 \text{ cavalo vapor} = 746 \text{ W} = 550 \text{ ft} \cdot \text{lb/s}$

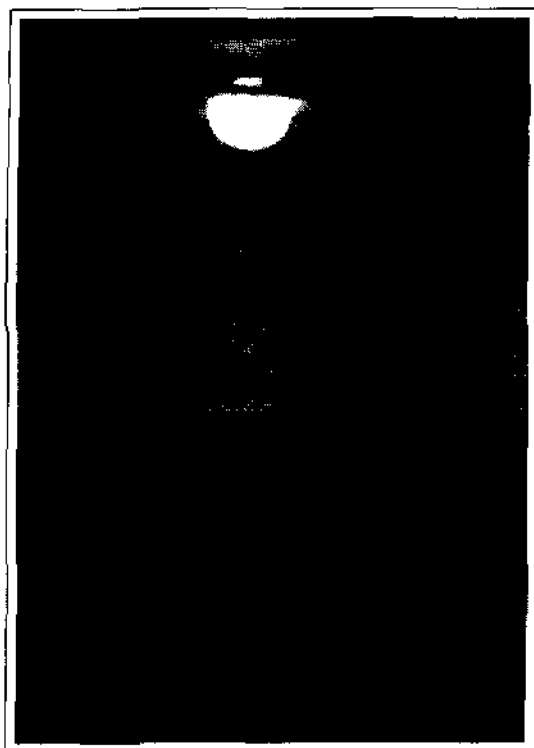
## Eletricidade e Magnetismo

$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ gauss}$

\*Ver no Apêndice F uma lista mais completa.

# MEDIÇÃO

# 1



*Você está deitado na praia e vê o sol se pôr no mar. Levantando-se, vê o sol se pôr uma segunda vez. Acredite ou não, a medição do intervalo de tempo entre os dois crepúsculos permite estimar o raio da terra. Como é possível usar uma observação tão simples para medir o tamanho da Terra?*

## 1-1 Medindo Grandezas

A física se baseia em medições. Qual é o intervalo de tempo entre dois estalidos de um contador? Qual é a temperatura do hélio líquido em um recipiente? Qual é o comprimento de onda da luz de um determinado laser? Qual é o valor da corrente elétrica em um fio? A lista é interminável.

Começamos a aprender física aprendendo a medir as grandezas que aparecem nas leis da física. Entre essas grandezas estão o comprimento, o tempo, a massa, a temperatura, a pressão e a resistência elétrica. Usamos muitas dessas palavras na linguagem corrente. Podemos dizer, por exemplo: “Só consigo concluir um *trabalho* a tempo quando estou sob *pressão*”. Em física, palavras como *trabalho* e *pressão* têm significados precisos, que não devemos confundir com seus significados usuais. Na verdade, o significado científico de trabalho e pressão não tem nada a ver com o significado dessas palavras na frase acima. Isso pode

ser um problema. Nas palavras do físico Robert Oppenheimer, “Muitas vezes o fato de que as palavras da ciência são as mesmas da linguagem comum pode confundir e, não, esclarecer”.

Para descrever uma grandeza física, primeiro definimos uma **unidade**, isto é, uma medida da grandeza cujo valor é definido como exatamente 1,0. Em seguida, definimos um **padrão**, ou seja, uma referência com a qual devem ser comparados todos os outros exemplos da grandeza. Assim, por exemplo, a unidade de comprimento é o metro, e, como veremos, o padrão para o metro é definido como a distância percorrida pela luz no vácuo durante uma certa fração do segundo. Somos livres para definir uma unidade e seu padrão da forma que quisermos; o importante é fazê-lo de tal modo que os cientistas do mundo inteiro concordem que nossas definições são práticas e razoáveis.

Depois de escolhermos um padrão, para o comprimento, digamos, devemos desenvolver métodos pelos quais qual-

quer comprimento, seja o raio de um átomo de hidrogênio, a distância entre as rodas de um *skate* ou a distância entre duas estrelas, possa ser expresso em termos do padrão. É claro que muitas das nossas comparações terão que ser indiretas. Não é possível usar uma regra, por exemplo, nem para medir o raio de um átomo nem a distância entre duas estrelas.

Existem tantas grandezas físicas que não é fácil organizá-las. Felizmente, nem todas são independentes. A velocidade, por exemplo, é a razão entre uma distância e um tempo. Assim, o que fazemos é escolher (e para isso existem conferências internacionais) um pequeno número de grandezas físicas, como comprimento e tempo, e definir padrões apenas para essas grandezas. Em seguida, definimos todas as outras grandezas físicas em termos dessas grandezas fundamentais e seus padrões. A velocidade, por exemplo, é definida em termos das grandezas fundamentais comprimento e tempo e dos respectivos padrões.

As grandezas fundamentais devem ser acessíveis e invariáveis. Se definirmos o padrão de comprimento como a distância entre o nosso nariz e a ponta do dedo indicador do braço direito esticado, certamente teremos um padrão acessível, mas que, naturalmente, variará de pessoa para pessoa. A necessidade de precisão na ciência e na engenharia nos leva exatamente à direção oposta. Nós nos preocupamos em primeiro lugar com a invariabilidade e depois fazemos o possível para distribuir duplicatas dos padrões das grandezas fundamentais a todos que tenham necessidade deles.

## 1-2 O Sistema Internacional de Unidades

Em 1971, a 14ª Conferência Geral de Pesos e Medidas escolheu sete grandezas como fundamentais, formando assim a base do Sistema Internacional de Unidades, abreviado como SI e popularmente conhecido como **sistema métrico**. A Tabela 1-1 mostra as unidades das três grandezas fundamentais (comprimento, massa e tempo) que usamos nos primeiros capítulos deste livro. As unidades foram escolhidas de modo que os valores dessas grandezas numa “escala humana” não fossem excessivamente grandes ou excessivamente pequenos.

Muitas *unidades secundárias* (ou derivadas) são definidas em termos das unidades das grandezas fundamentais. Assim, por exemplo, a unidade de potência no SI, que recebeu o nome de **watt** (a abreviação é **W**), é definida em termos das unidades de massa, comprimento e tempo. Como vamos ver no Cap. 7,

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ W} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3. \quad (1-1)$$

**Tabela 1-1**  
Algumas Unidades Fundamentais do SI

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

Para expressar os números muito grandes e muito pequenos que freqüentemente aparecem na física, usamos a chamada notação científica, que utiliza potências de 10. Nesta notação,

$$3.560.000.000 \text{ m} = 3,56 \times 10^9 \text{ m} \quad (1-2)$$

e

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

Desde o advento dos computadores, a notação científica, às vezes, é usada de forma simplificada, como em  $3,56 \text{ E}9 \text{ m}$  e  $4,92 \text{ E} - 7 \text{ s}$ , onde o E significa “expoente de dez”. A notação é ainda mais simples em algumas calculadoras, em que o E é substituído por um espaço vazio.

Para facilitar ainda mais o trabalho de quem tem que lidar com valores muito grandes e muito pequenos, usamos os prefixos que aparecem na Tabela 1-2. Quando um prefixo é combinado com uma unidade, a unidade é multiplicada pelo fator correspondente ao prefixo. Assim, por exemplo, podemos expressar um certo valor de potência elétrica como

$$1,27 \times 10^9 \text{ watts} = 1,27 \text{ gigawatts} = 1,27 \text{ GW} \quad (1-4)$$

ou um dado intervalo de tempo como

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

Você já deve conhecer alguns prefixos, como os usados em mililitro, centímetro e quilograma.

O Apêndice F mostra os fatores de conversão do SI para outros sistemas. Os Estados Unidos são um dos poucos países que ainda não adotaram oficialmente o Sistema Internacional de Unidades.

## 1-3 Mudanças de Unidades

Freqüentemente, precisamos mudar as unidades em que está expressa uma grandeza física. Para isso, usamos um método chamado de *conversão em cadeia*. Neste método, mul-

**Tabela 1-2**  
Prefixos das Unidades do SI\*

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

\*Os prefixos mais comumente usados aparecem em negrito.

tiplicamos a medida original por um **fator de conversão** (uma relação entre unidades que é igual a 1). Assim, por exemplo, como 1 min e 60 s correspondem ao mesmo intervalo de tempo, podemos escrever

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

Tal *não* é o mesmo que escrever  $1/60 = 1$  ou  $60 = 1$ ; o *número* e sua *unidade* formam um todo.

Já que a multiplicação de qualquer grandeza por 1 não muda o valor dessa grandeza, podemos introduzir esses fatores de conversão sempre que acharmos conveniente. Na conversão em cadeia, usamos os fatores de tal forma que as unidades indesejadas se cancelam. Por exemplo,

$$\begin{aligned} 2 \text{ min} &= (2 \text{ min})(1) = (2 \text{ min})\left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) \\ &= 120 \text{ s}. \end{aligned} \quad (1-6)$$

Se por acaso você introduzir o fator de conversão de tal forma que as unidades *não* se cancelem, simplesmente inverta o fator e tente outra vez. Observe que as unidades obedecem às mesmas regras que os números e as variáveis algébricas.

**EXEMPLO 1-1** O submarino de pesquisa ALVIN está mergulhando com uma velocidade de 36,5 braças por minuto.

a. Expresse esta velocidade em metros por segundo. Uma *braça* (fath) vale exatamente 6 pés (ft).

**Solução** Para calcular a velocidade em metros por segundo, escrevemos

$$\begin{aligned} 36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} &= \left(36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}}\right)\left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)\left(\frac{6 \text{ ft}}{1 \text{ fath}}\right)\left(\frac{1 \text{ m}}{3,28 \text{ ft}}\right) \\ &= 1,11 \text{ m/s}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

b. Qual é a velocidade em milhas por hora?

**Solução** Para calcular a velocidade em milhas por hora, escrevemos:

$$\begin{aligned} 36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}} &= \left(36,5 \frac{\text{fath}}{\text{min}}\right)\left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}\right)\left(\frac{6 \text{ ft}}{1 \text{ fath}}\right)\left(\frac{1 \text{ mi}}{5280 \text{ ft}}\right) \\ &= 2,49 \text{ mi/h}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

c. Qual é a velocidade em anos-luz por ano?

**Solução** Um ano-luz (al) é a distância que a luz viaja em 1 ano,  $9,46 \times 10^{12}$  km.

Partimos do resultado obtido em (a):

$$\begin{aligned} 1,11 \frac{\text{m}}{\text{s}} &= \left(1,11 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\left(\frac{1 \text{ al}}{9,46 \times 10^{12} \text{ km}}\right) \\ &\times \left(\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}\right)\left(\frac{3,16 \times 10^7 \text{ s}}{1 \text{ a}}\right) \\ &= 3,71 \times 10^{-9} \text{ al/a}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Podemos escrever este resultado na forma ainda mais incomum de  $3,71 \text{ nal/a}$ , onde “nal” é a abreviação de nanoano-luz.

Se você resolver o item (a) usando todos as casas decimais da sua calculadora, encontrará uma resposta como  $1,112804878 \text{ m/s}$ . A precisão sugerida pelas nove casas decimais da resposta é totalmente ilusória. Arredondamos (acertadamente) o resultado para  $1,11 \text{ m/s}$ , um número que equivale em precisão ao dado original. O valor original da velocidade,  $36,5 \text{ fath/min}$ , tem três dígitos, que são chamados de **algarismos significativos**. Qualquer quarto algarismo que possa existir à direita do 5 não é conhecido, de modo que o resultado na conversão não é confiável além de três dígitos ou três algarismos significativos. Os resultados dos cálculos devem sempre ser arredondados para expressar este limite de confiabilidade.\*

**EXEMPLO 1-2** Quantos centímetros quadrados tem uma área de  $6,0 \text{ km}^2$ ?

**Solução** A maneira mais simples de resolver este problema é tornar explícito o produto de  $\text{km}$  por  $\text{km}$ :

$$\begin{aligned} 6,0 \text{ km}^2 &= 6,0 (\text{km})(\text{km}) = 6,0 (\text{km})(\text{km}) \\ &\times \left(\frac{1.000 \text{ m}}{1 \text{ km}}\right)\left(\frac{1.000 \text{ m}}{1 \text{ km}}\right)\left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right) \\ &\times \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right) \\ &= 6,0 \times 10^{10} \text{ cm}^2. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

**EXEMPLO 1-3** Transforme 60 milhas/hora em pés/segundo.

**Solução** Para resolver este problema, você pode transformar milhas em pés e horas em segundos ou consultar o Apêndice F para uma conversão mais direta:

$$\begin{aligned} 60 \text{ mi/h} &= 60 \text{ mi/h} \left(\frac{3,28 \text{ ft/s}}{2,24 \text{ mi/h}}\right) \\ &= 88 \text{ ft/s}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Observe que neste caso, como nos anteriores, o fator de conversão é equivalente a 1.

## 1-4 Comprimento

Em 1792, a recém-criada República de França estabeleceu um novo sistema de pesos e medidas. Como pedra fundamental desse novo sistema, o metro foi definido como um décimo-milionésimo da distância entre o Pólo Norte e o Equador. Mais tarde, por razões de ordem prática, este padrão que usava a Terra como referência foi abandonado e o metro passou a ser definido como a distância entre duas finas linhas gravadas perto das extremidades de uma barra de platina-irídio, a **barra do metro-padrão**, que era guardada na **Bureau Internacional de Pesos e Medidas**, perto de Paris. Cópias fiéis da barra foram enviadas a laboratórios de padronização em todo o mundo. Esses **padrões secundários** foram usados para produzir outros padrões ainda mais acessíveis, de modo que, em última análise, todos os

\*Uma discussão mais completa do uso de algarismos significativos aparece nas Táticas de Resolução de Problemas do Cap. 4.

**Tabela 1-3**  
**Alguns Comprimentos**

Comprimento	Metro
Distância até o quasar mais afastado que se conhece (1990)	$2 \times 10^{26}$
Distância até a galáxia de Andrômeda	$2 \times 10^{22}$
Distância até a estrela mais próxima (Proxima Centauri)	$4 \times 10^{16}$
Distância até o planeta mais afastado (Plutão)	$6 \times 10^{12}$
Raio da Terra	$6 \times 10^6$
Altura do Monte Everest	$9 \times 10^3$
Espessura desta página	$1 \times 10^{-4}$
Comprimento de onda da luz	$5 \times 10^{-7}$
Comprimento de um vírus típico	$1 \times 10^{-8}$
Raio do átomo de hidrogênio	$5 \times 10^{-11}$
Raio de um próton	$\sim 10^{-15}$

dispositivos de medida eram derivados da barra do metro-padrão através de uma complicada série de comparações.

Em 1959, a jarda foi legalmente definida através da equação

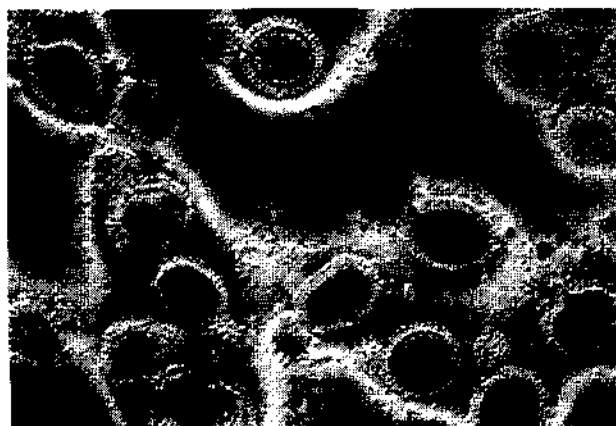
$$1 \text{ jarda} = 0,9144 \text{ metro (exatamente)}, \quad (1-7)$$

que é equivalente a

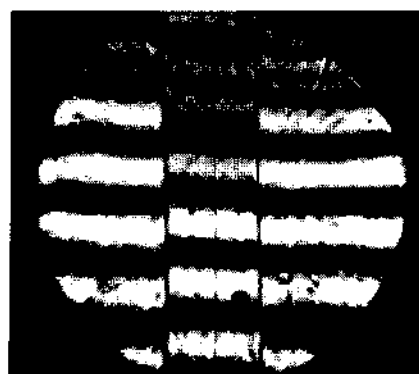
$$1 \text{ polegada} = 2,54 \text{ centímetros (exatamente)}. \quad (1-8)$$

A Tabela 1-3 mostra alguns comprimentos interessantes. Um deles se refere a um vírus como os que aparecem na Fig. 1-1.

Com o tempo, a ciência e a tecnologia modernas sentiram necessidade de um padrão mais preciso que a distância entre duas linhas em uma barra de metal. Em 1960 foi adotado um novo padrão para o metro, dessa vez baseado no comprimento de onda da luz. O metro foi definido como 1.650.763,73 comprimentos de onda de uma certa luz vermelho-alaranjada emitida por átomos de criptônio-86 em um tubo de descarga gasosa.\* Esse estranho número de



**Fig. 1-1** Uma micrografia eletrônica de partículas do vírus da gripe. As lipoproteínas obtidas do hospedeiro envolvem os núcleos. Cada partícula de vírus tem menos de 50 nm de diâmetro.



**Fig. 1-2** Um calibre (esquerda) sendo comparado com um padrão de referência (direita) através de ondas luminosas. Quando as franjas claras e escuras coincidem, os blocos têm o mesmo comprimento. A diferença de comprimento entre os dois blocos acima é de aproximadamente 25 nm, aproximadamente o tamanho do vírus que aparece na Fig. 1-1.

comprimentos de onda foi escolhido de modo que o novo padrão correspondesse, tanto quanto possível, à velha barra do metro-padrão.

Os átomos de criptônio-86 em que se baseia o padrão de comprimento estão presentes em toda parte, são idênticos e emitem luz exatamente com o mesmo comprimento de onda. Como observou Philip Morrison, do MIT, todo átomo é um reservatório de padrões naturais, mais seguro que o Bureau Internacional de Pesos e Medidas.

A Fig. 1-2 mostra como o comprimento de um calibre, usado na indústria como um padrão secundário preciso, é comparado com um padrão de referência no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST). As *franjas* escuras que atravessam a figura horizontalmente são formadas pelo cancelamento mútuo de ondas luminosas. Se as franjas dos dois blocos retangulares coincidem, é porque os calibres têm o mesmo comprimento. Se a diferença entre as franjas é de, digamos, um décimo de franja, isso significa que a diferença de comprimento entre os blocos é de um vigésimo do comprimento de onda da luz ou cerca de 30 nm.

Em 1983, a necessidade de precisão chegara a tal ponto que mesmo o padrão de criptônio-86 se tornara pouco satisfatório. Foi nesse ano que os cientistas tomaram uma decisão ousada. O metro foi redefinido como a distância percorrida pela luz num determinado intervalo de tempo. 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.

\*O número 86 na notação criptônio-86 identifica um dos cinco isótopos estáveis desse elemento. Uma notação equivalente seria  $^{86}\text{Kr}$ . Este número (86) é conhecido como *número de massa* do isótopo em questão.



Tal número foi escolhido para que a velocidade da luz,  $c$ , fosse dada exatamente por

$$c = 299.792.458 \text{ m/s.}$$

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

**EXEMPLO 1-4** Nas competições esportivas, a prova de corrida mais curta pode ser a de 100 metros (100 m) ou a de 100 jardas (100 yd).

a. Qual das duas é a mais longa?

**Solução** De acordo com a Eq. 1-7, 100 yd equivalem a 91,44 m, de modo que a corrida de 100 m é mais longa do que a de 100 yd.

b. Qual é a diferença entre as duas distâncias em metros?

**Solução** Vamos representar a diferença por  $\Delta L$ , onde  $\Delta$  é a letra grega delta maiúsculo. Nesse caso,

$$\begin{aligned}\Delta L &= 100 \text{ m} - 100 \text{ yd} \\ &= 100 \text{ m} - 91,44 \text{ m} = 8,56 \text{ m.} \quad (\text{Resposta})\end{aligned}$$

c. Qual é a diferença entre as duas distâncias em pés?

**Solução** Podemos calcular a diferença em pés usando o mesmo método do Exemplo 1-1:

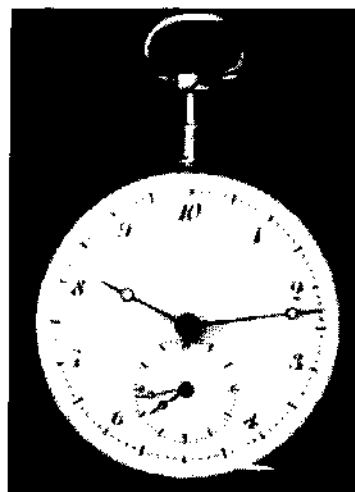
$$\Delta L = (8,56 \text{ m}) \left( \frac{3,28 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right) = 28,1 \text{ ft.} \quad (\text{Resposta})$$

## 1-5 Tempo

O tempo tem dois aspectos. Nas aplicações da vida diária e para alguns fins científicos, estamos interessados em saber a hora do dia (veja a Fig. 1-3) para podermos classificar os acontecimentos em ordem cronológica. Por outro lado, na maioria das aplicações científicas, queremos conhecer o tempo de duração de um evento. Assim qualquer padrão de tempo deve poder responder a duas perguntas: “Quando aconteceu” e “Quanto tempo durou?” A Tabela 1-4 mostra alguns intervalos de tempo.

Qualquer fenômeno periódico pode ser usado como padrão de tempo. A rotação da Terra, que determina a duração do dia, é provavelmente o mais antigo padrão de tempo da humanidade. Um relógio de quartzo, no qual um anel de quartzo vibra continuamente, pode ser calibrado em relação à rotação da Terra com o auxílio de observações astronômicas e usado para medir intervalos de tempo no laboratório. Entretanto, a calibração não pode ser executada com a exatidão exigida pela ciência e tecnologia modernas.

Para atender à necessidade de um padrão de tempo mais preciso, vários países desenvolveram os chamados relógios atômicos. A Fig. 1-4 mostra um desses relógios, baseado em uma frequência característica do isótopo céσιο-



**Fig. 1-3** Quando o sistema métrico foi proposto em 1792, a hora foi redefinida para que o dia tivesse 10 h. Entretanto, a idéia não pegou. O fabricante desse relógio de 10 horas achou prudente incluir um pequeno mostrador que marcasse o tempo da forma usual. Os dois mostradores estão indicando a mesma hora?

**Tabela 1-4**  
**Alguns Intervalos de Tempo**

<i>Intervalo de Tempo</i>	<i>Segundos</i>
Tempo de vida do próton (prevista)	$\sim 10^{31}$
Idade do universo	$5 \times 10^{17}$
Idade da pirâmide de Quéops	$1 \times 10^{11}$
Expectativa de vida de um ser humano (nos Estados Unidos)	$2 \times 10^9$
Duração de um dia	$9 \times 10^4$
Espaço de tempo entre duas batidas do coração humano	$8 \times 10^{-1}$
Tempo de vida do múon	$2 \times 10^{-6}$
Pulso de luz mais curto produzido em laboratório (1989)	$6 \times 10^{-15}$
Tempo de vida da partícula mais instável	$\sim 10^{-23}$
Tempo de Planck*	$\sim 10^{-43}$

\*Intervalo de tempo após o “Big Bang”, a partir do qual as leis da física, como as conhecemos, podem ser aplicadas.

133, instalado no NIST. Os Estados Unidos usam-no como base para o Tempo Universal Coordenado (UTC), que está disponível através de sinais de ondas curtas (estações WWV e WWVH) e também por telefone. (Para acertar um relógio com alta precisão, é preciso levar em conta o tempo de trânsito desses sinais desde as estações até o ponto onde se encontra o relógio a ser corrigido.)

A Fig. 1-5 mostra as variações da velocidade de rotação da Terra em um período de 4 anos, determinadas por comparação com um relógio de céσιο.\* Por causa da variação sazonal mostrada na Fig. 1-5, suspeitamos da rotação da Terra sempre que há uma diferença entre o tempo dado

\*Veja “The Earth’s Inconstant Rotation”, de John Wahr, em *Sky and Telescope*, junho de 1986. Veja também “Studying the Earth by Very-Long Baseline Interferometry”, de William E. Carter e Douglas S. Robertson, em *Scientific American*, novembro de 1986.

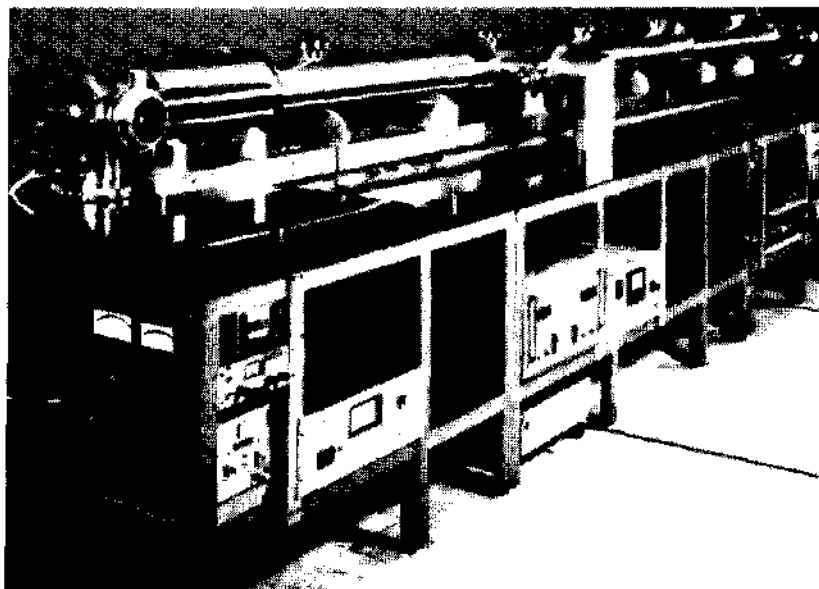


Fig. 1-4 O relógio atômico de césio do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, em Boulder, Colorado, Estados Unidos. É o padrão primário para a unidade de tempo nos Estados Unidos.

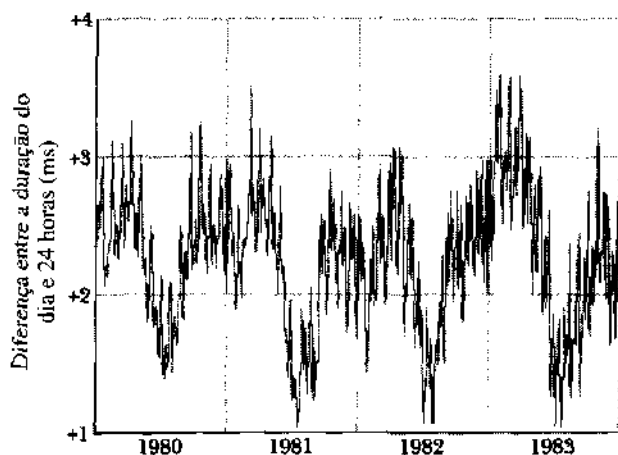


Fig. 1-5 Variação na duração do dia em um período de 4 anos. Observe que durante esse período a duração do dia não chegou a variar de 3 ms (0,003 s).

pela Terra e o tempo dado pelos átomos. A variação provavelmente se deve a efeitos de maré causados pela lua e também à influência dos ventos.

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

Um segundo é o tempo necessário para que haja 9.192.631.770 oscilações da luz (de um determinado comprimento de onda) emitida por um átomo de césio-133.

Em princípio, dois relógios de césio teriam que funcionar durante 6.000 anos para que suas leituras diferissem em mais de 1 s. Mesmo essa precisão é pequena em com-

paração com a dos relógios que estão sendo desenvolvidos atualmente; a precisão desses relógios pode chegar a 1 parte em  $10^{18}$ , isto é, 1 s em  $1 \times 10^{18}$  s (cerca de  $3 \times 10^{10}$  anos).

**EXEMPLO 1-5** Isaac Asimov propôs uma unidade de tempo baseada na maior velocidade conhecida e na menor distância que pode ser medida. É o *fermi-luz*, o tempo que a luz leva para percorrer uma distância de 1 fermi (1 fermi = 1 femtômetro =  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ). Quantos segundos tem um fermi-luz?

**Solução** Para calcular esse tempo, basta dividir a distância indicada (1 fm) por  $c$ , a velocidade da luz no vácuo ( $\approx 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Assim,

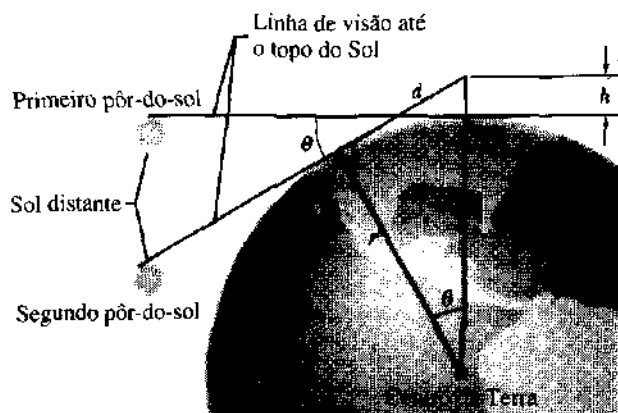
$$\begin{aligned} 1 \text{ fermi-luz} &= \frac{1 \text{ fm}}{\text{velocidade da luz}} = \frac{10^{-15} \text{ m}}{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}} \\ &= 3,33 \times 10^{-24} \text{ s.} \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

De acordo com a Tabela 1-4, a partícula elementar mais instável que se conhece tem um tempo de vida (em média) de  $10^{-23} \text{ s}$ . Podemos dizer que o seu tempo de vida é de 3 fermis-luz.

**EXEMPLO 1-6\*** Suponhamos que você esteja deitado em uma praia e observe o sol se pôr no oceano, ligando um cronômetro no momento em que ele desaparece. Em seguida, você se levanta, fazendo com que os seus olhos se movam para cima de uma distância  $h = 1,70 \text{ m}$ , e pára o cronômetro no momento em que o sol torna a desaparecer. Se o intervalo de tempo medido pelo cronômetro é  $t = 11,1 \text{ s}$ , quanto mede o raio  $r$  da Terra?

**Solução** Como se pode ver na Fig. 1-6, sua linha de visão até a parte superior do sol, quando ele desaparece pela primeira vez, é tangente à

\*Adaptado de "Doubling Your Sunsets, or How Anyone Can Measure the Earth's Size with a Wristwatch and Meter Stick", de Dennis Rawlins, *American Journal of Physics*, fev. 1979, Vol. 47, pp. 126-128. O método funciona melhor perto do Equador.



**Fig. 1-6** Exemplo 1-6. Sua linha de visão até a parte superior do sol gira de um ângulo  $\theta$  quando você se levanta, elevando seus olhos de uma distância  $h$  em relação ao ponto A. (O ângulo  $\theta$  e a distância  $h$  foram exagerados para tornar o desenho mais claro.)

superfície da Terra no ponto em que você se encontra (ponto A). A figura mostra também que sua linha de visão até a parte superior do sol quando ele desaparece pela segunda vez é tangente à superfície da Terra no ponto B. Seja  $d$  a distância entre o ponto B e o ponto em que seus olhos se encontram quando você está de pé e seja  $r$  o raio da Terra (Fig. 1-6). De acordo com o Teorema de Pitágoras, temos:

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 = r^2 + 2rh + h^2,$$

ou

$$d^2 = 2rh + h^2. \quad (1-9)$$

Como a altura  $h$  é muito menor do que o raio da Terra  $r$ , o termo  $h^2$  pode ser desprezado em comparação com o termo  $2rh$  e podemos escrever a Eq. 1-9 na forma simplificada

$$d^2 = 2rh. \quad (1-10)$$

Na Fig. 1-6, o ângulo entre os dois pontos de tangência A e B é  $\theta$ , que é também o ângulo que o sol descreve em torno da Terra durante o intervalo de tempo medido,  $t = 11,1$  s. Em um dia completo, que tem aproximadamente 24 h, o sol descreve um ângulo de  $360^\circ$  em torno da Terra. Assim, podemos escrever

$$\frac{\theta}{360^\circ} = \frac{t}{24 \text{ h}},$$

que, com  $t = 11,1$  s, nos dá

$$\theta = \frac{(360^\circ)(11,1 \text{ s})}{(24 \text{ h})(60 \text{ min/h})(60 \text{ s/min})} = 0,04625^\circ.$$

De acordo com a Fig. 1-6,  $d = r \tan \theta$ . Substituindo  $d$  por este valor na Eq. 1-10, temos:

$$r^2 \tan^2 \theta = 2rh$$

ou

$$r = \frac{2h}{\tan^2 \theta}.$$

Substituindo nesta equação  $h$  e  $\theta$  por seus valores 1,70 m e  $0,04625^\circ$ , respectivamente, temos:

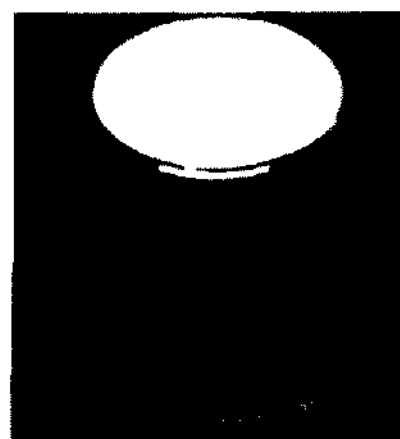
$$r = \frac{(2)(1,70 \text{ m})}{\tan^2 0,04625^\circ} = 5,22 \times 10^6 \text{ m}, \quad (\text{Resposta})$$

o que difere em menos de 20% do verdadeiro valor do raio (médio) da Terra, que é de  $6,37 \times 10^6$  m.

## 1-6 Massa

### O Quilograma Padrão

O padrão de massa do SI é um cilindro de platina-irídio (Fig. 1.7) conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, nas proximidades de Paris, ao qual foi atribuída, por convenção internacional, uma massa de 1 quilograma. Cópias fiéis desse cilindro foram enviadas a laboratórios de padronização situados em outros países e as massas



**Fig. 1-7** O padrão de massa do SI.

de outros corpos podem ser medidas por comparação com essas cópias. A Tabela 1-5 mostra as massas de alguns corpos expressas em quilogramas.

A cópia norte-americana do quilograma padrão é mantida em um cofre no NIST e retirada, não mais que uma vez por ano, para aferir cópias que são usadas em outros

**Tabela 1-5**  
Algumas Massas

Objeto	Quilogramas
Universo conhecido (1990)	$\sim 10^{51}$
Nossa galáxia	$2 \times 10^{41}$
Sol	$2 \times 10^{30}$
Lua	$7 \times 10^{22}$
Asteróide Eros	$5 \times 10^{15}$
Montanha pequena	$1 \times 10^{12}$
Navio transatlântico	$7 \times 10^7$
Elefante	$5 \times 10^3$
Uva	$3 \times 10^{-1}$
Grão de poeira	$7 \times 10^{-10}$
Molécula de penicilina	$5 \times 10^{-17}$
Átomo de urânio	$4 \times 10^{-25}$
Próton	$2 \times 10^{-27}$
Elétron	$9 \times 10^{-31}$

laboratórios. Desde 1889, ela foi levada duas vezes à França para ser comparada com o padrão primário. Provavelmente, um dia a massa padrão passará a ser a massa de um átomo, que é um padrão mais confiável e acessível.

### Um Segundo Padrão de Massa

As massas dos átomos podem ser comparadas entre si mais precisamente do que podem ser comparadas com o quilograma padrão. Por esse motivo, os cientistas adotaram um segundo padrão de massa: o átomo de carbono-12, ao qual

foi atribuída uma massa de 12 unidades de massa atômica (u). A relação entre os dois padrões é a seguinte:

$$1 \text{ u} = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}, \quad (1-11)$$

com uma incerteza de  $\pm 10$  nas duas últimas casas decimais. Com o auxílio de um espectômetro de massa, os cientistas podem determinar, com razoável precisão, as massas de outros átomos em relação à massa do carbono-12. O que nos falta no momento é um meio confiável de estender essa precisão a unidades de massas mais comuns, como um quilograma.

## RESUMO

### Medições na Física

A física se baseia na medição das grandezas físicas e das mudanças nessas grandezas físicas que ocorrem em nosso universo. Certas grandezas físicas, como o comprimento, o tempo e a massa, foram escolhidas como **grandezas fundamentais**, definidas em termos de um **padrão** e medidas por uma **unidade**, como o metro, o segundo e o quilograma. Outras grandezas físicas, como a velocidade, são definidas em termos das grandezas fundamentais e seus padrões.

### Unidades do SI

O sistema de unidades adotado neste livro é o Sistema Internacional de Unidades (SI). As três grandezas físicas que aparecem na Tabela 1-1 são as grandezas fundamentais usadas nos primeiros capítulos deste livro. Os padrões, que devem ser ao mesmo tempo acessíveis e invariáveis, definem as unidades das grandezas fundamentais e são estabelecidos por acordos internacionais. Esses padrões servem de base para todas as medições da física, tanto das grandezas fundamentais quanto das grandezas derivadas. Em muitos casos, os prefixos que aparecem na Tabela 1-2 permitem simplificar a notação.

### Conversão de Unidades

A conversão de unidades de um sistema para outro (de milhas por hora para quilômetros por segundo, por exemplo) pode ser realizada pelo

método da **conversão em cadeia**, em que as unidades são consideradas como grandezas algébricas e os dados originais são multiplicados sucessivamente por fatores de conversão equivalentes a 1, até que a grandeza seja expressa na unidade desejada. Veja os Exemplos 1-1 a 1-3.

### O Metro

O metro (unidade de comprimento) foi definido inicialmente em termos da distância entre o Pólo Norte e o Equador. Hoje em dia, é definido como a distância percorrida pela luz durante um certo intervalo de tempo.

### O Segundo

O segundo (unidade de tempo) foi definido inicialmente em termos da rotação da Terra. Hoje em dia, é definido em termos das vibrações da luz emitida por um átomo de césio-133.

### O Quilograma

O quilograma (unidade de massa) é definido em termos de um padrão de platina-irídio mantido na França. Para medições em escala atômica, é usada em geral a unidade de massa atômica, definida em termos do átomo de carbono-12.

## QUESTIONÁRIO

1. Discuta a afirmação: "Depois que um padrão é escolhido, ele se torna invariável por definição".

2. Cite uma ou mais características que você considera desejáveis em um padrão, além da facilidade de acesso e da invariabilidade.

3. Seria possível definir um sistema de unidades fundamentais como o da Tabela 1-1 em que o tempo não estivesse incluído? Explique.

4. Das três unidades fundamentais que aparecem na Tabela 1-1, apenas uma, o quilograma, tem um prefixo (veja a Tabela 1-2). Seria melhor redefinir a massa do cilindro de platina-irídio conservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas como sendo 1 g em vez de 1 kg?

5. Por que não existem unidades fundamentais no SI para área e volume?

6. O metro foi inicialmente definido como um décimo-milionésimo do comprimento de um meridiano que vai do Pólo Norte ao Equador, passando por Paris. A diferença entre o metro definido desta forma e a distância entre as linhas gravadas no metro padrão é de aproximadamente 0,023%. Isto significa que o metro padrão tem uma imprecisão deste valor? Explique.

7. Ao definir a distância entre duas linhas gravadas em uma barra como o metro padrão, é preciso especificar a temperatura da barra. O comprimento pode ser considerado como uma grandeza fundamental se outra grandeza física, como a temperatura, deve ser especificada na sua definição?

8. Ao redefinir o metro em termos da velocidade da luz, por que os participantes da Conferência Geral de Pesos e Medidas de 1983 não simplificaram as coisas definindo a velocidade da luz como sendo exatamente  $3 \times 10^8$  m/s? Na verdade, por que ela não foi definida como sendo exatamente 1 m/s? Eles podiam ter escolhido uma dessas duas possibilidades? Se a resposta for afirmativa, por que não o fizeram?

9. O que significa o prefixo "micro" na expressão "forno de microondas"? Há quem chame os alimentos irradiados com raios gama para retardar sua deterioração de "tratados com picoondas". O que significa isso?

10. Sugira uma forma de medir (a) o raio da Terra, (b) a distância entre o sol e a Terra e (c) o raio do sol.

11. Sugira uma forma de medir (a) a espessura de uma folha de papel, (b) da parede de uma bolha de sabão e (c) o diâmetro de um átomo.

12. Cite alguns fenômenos naturais periódicos que poderiam ser usados como padrões de tempo.

13. Seria possível definir "1 segundo" com o espaço de tempo entre duas batidas do coração do presidente da Sociedade Americana de Física. Galileu usou algumas vezes o seu próprio pulso para medir o tempo. Por que uma definição baseada em um relógio atômico é muito melhor?

14. Quais são os atributos que um bom relógio deve possuir?

15. Cite algumas desvantagens de se usar o período de um pêndulo como padrão de tempo.

16. Em 30 de junho de 1981, o "minuto" de 10 h 59 min a 11 h 00 min foi arbitrariamente alongado para conter 61 s. O segundo a mais foi introduzido para compensar o fato de que, conforme medido pelo nosso padrão atômico de tempo, a velocidade de rotação da Terra está diminuindo lentamente. Por que foi considerado necessário reajustar nossos relógios?

17. Por que é conveniente usarmos dois padrões de massa, o quilograma e o átomo de carbono-12?

18. O nosso atual padrão de massa é acessível e invariável? Ele pode ser comparado com facilidade com os padrões secundários? Um padrão atômico seria melhor sob algum aspecto?

19. Faça uma lista de objetos cujas massas estejam entre a de uma pequena montanha e a de um transatlântico (veja a Tabela 1-5) e estime suas massas.

20. As pessoas que se opõem à adoção do sistema métrico nos Estados Unidos usam, às vezes, argumentos como: "Em vez de comprarmos uma libra de manteiga, teríamos que comprar 0,454 quilograma". Com isso, estão querendo dizer que a vida se tornaria muito mais complicada. Como você refutaria esse tipo de argumento?

## EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

### Seção 1-2 O Sistema Internacional de Unidades

1E. Use os prefixos da Tabela 1-2 para expressar (a)  $10^6$  fones; (b)  $10^{-6}$  fones; (c)  $10^{-18}$  móveis; (d)  $10^{-2}$  mentais; (e)  $10^1$  pitados; (f)  $10^{-1}$  tares. Agora que pegou a idéia, invente expressões semelhantes.

2E. Alguns prefixos das unidades do SI são usados na linguagem coloquial. (a) Quanto ganha por semana um funcionário cujo salário anual é KR\$ 36 (36 quilorreais)? (b) O prêmio de uma loteria é de 10 megarreais, que serão pagos em parcelas mensais iguais durante vinte anos. Quantos reais o felizardo vai receber por mês?

### Seção 1-4 Comprimento

3E. Um ônibus espacial está em órbita em torno da Terra a uma altitude de 300 km. A que distância se encontra da Terra (a) em milhas e (b) em milímetros?

4E. Qual é a sua altura em pés e polegadas?

5E. O micrometro ( $10^{-6}$  m =  $1 \mu\text{m}$ ) é também chamado de *mícron*. (a) Quantos microns tem 1,0 km? (b)  $1,0 \mu\text{m}$  equivale a que fração de um centímetro? (c) Quantos microns tem uma jarda?

6E. A Terra tem a forma aproximadamente esférica, com um raio de  $6,37 \times 10^6$  m. (a) Qual é a circunferência da Terra em quilômetros? (b) Qual é a superfície da Terra em quilômetros quadrados? (c) Qual é o volume da Terra em quilômetros cúbicos?

7E. Calcule quantos quilômetros têm 20,0 mi usando apenas os seguintes fatores de conversão: 1 mi = 5.280 ft, 1 ft = 12 in., 1 in. = 2,54 cm, 1 m = 100 cm e 1 km = 1.000 m.

8E. Calcule a relação entre (a) uma jarda quadrada e um pé quadrado; (b) uma polegada quadrada e um centímetro quadrado; (c) uma milha quadrada e um quilômetro quadrado; (d) um metro cúbico e um centímetro cúbico.

9P. Uma unidade de área usada freqüentemente pelos agrimensores é o *hectare*, definido como  $10^4$  m<sup>2</sup>. Num ano, uma certa mina de carvão a céu aberto consome 75 hectares de terra até uma profundidade de 26 m. Qual o volume de terra removido durante esse período, em quilômetros cúbicos?

10P. O *cord* é um volume de madeira cortada equivalente a uma pilha de 8 ft de comprimento, 4 ft de largura e 4 ft de altura. Quantos cords tem um metro cúbico de madeira?

11P. Uma sala tem 20 ft e 2 in de comprimento e 12 ft e 5 in de largura. Qual é a área do piso em (a) pés quadrados e (b) metros quadrados? Se o teto está a 12 ft e 2,5 in do chão, qual é o volume da sala em (c) pés cúbicos e (d) metros cúbicos?

12P. A Antártica tem forma aproximadamente semicircular, com um raio de 2.000 km. A espessura média do gelo é 3.000 m. Qual o volume de gelo da Antártica, em centímetros cúbicos? (Ignore a curvatura da Terra.)

13P. Um cubo de açúcar típico tem 1 cm de lado. Se você tivesse uma caixa cúbica com um mol de cubos de açúcar, qual seria o lado da caixa? (Um mol equivale a  $6,02 \times 10^{23}$  unidades.)

14P. Os engenheiros hidráulicos às vezes usam, como unidade de volume de água, o *acre-pé*, definido como o volume de água capaz de cobrir 1 acre de terra como uma camada de água com 1 pé de profundidade. Uma tempestade faz cair 2,0 in de chuva em 30 min numa cidade com 26 km<sup>2</sup> de área. Que volume de água, em acres-pé, caiu na cidade?

15P. Os fabricantes de uma certa marca de tinta garantem que ela é capaz de cobrir 460 ft<sup>2</sup>/gal. (a) Expresse este número em metros quadrados por litro. (b) Expresse este número nas unidades fundamentais do SI (veja os Apêndices A e F). (c) Qual é o inverso da unidade original, e qual o seu significado físico?

16P. As distâncias astronômicas são tão grandes em comparação com as terrestres que os astrônomos costumam usar unidades especiais em seus cálculos. Uma *unidade astronômica* (UA) é igual à distância média entre a Terra e o sol, cerca de  $149,5 \times 10^6$  km. Um *parsec* (pc) é a distância para a qual 1 UA subtende um ângulo de exatamente 1 segundo de arco (Fig. 1-8). Um *ano-luz* (al) é a distância que a luz, viajando no vácuo com uma velocidade de 299.792 km/s, percorre em um 1,0 ano. (a) Expresse a distância entre a Terra e o Sol em parsecs e em anos-luz. (b) Expresse 1 al e 1 pc em quilômetros. Embora o "ano-luz" apareça

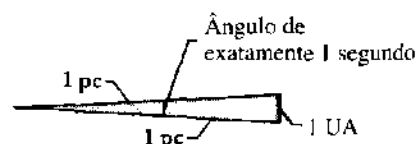


Fig. 1-8 Problema 16.

frequentemente em artigos populares, o parsec é a unidade preferida dos astrônomos.

**17P.** Durante um eclipse total, o disco da lua cobre quase perfeitamente o disco do sol. Supondo que o sol esteja 400 vezes mais distante do que a lua, (a) Calcule a razão entre o diâmetro do sol e o diâmetro da lua (b) Qual é a razão entre os volumes dos dois astros? (c) Mantendo um dos olhos fechado, afaste uma moeda do rosto até ela eclipsar totalmente a lua cheia e meça o ângulo subtendido pela moeda. Usando este resultado experimental e a distância entre a Terra e a lua ( $3,8 \times 10^5$  km, aproximadamente), dê uma estimativa para o diâmetro da lua.

**18P\*.** O quilograma padrão (veja a Fig. 1-7) tem a forma de um cilindro circular, com a altura igual ao diâmetro. Mostre que, para um cilindro circular de volume fixo, esta igualdade faz com que a superfície seja a menor possível, minimizando assim os efeitos de desgaste e contaminação da superfície.

**19P\*.** O navegador do petroleiro *Gulf Superno* usa os satélites do chamado Sistema Global de Posicionamento (GPS/NAVSTAR) para determinar a latitude e longitude do navio; veja a Fig. 1-9. Se os valores são  $43^\circ 36' 25,3''$  N e  $77^\circ 31' 48,2''$  O com uma precisão de  $\pm 0,5''$ , qual é a incerteza na posição do petroleiro medida (a) ao longo de uma linha norte-sul e (b) ao longo de uma linha leste-oeste? (c) Onde se encontra o petroleiro?

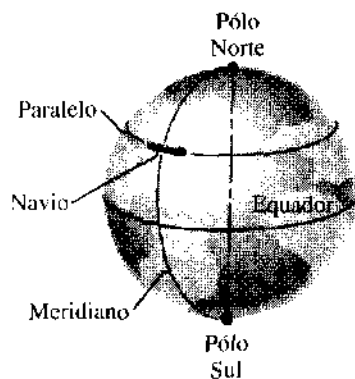


Fig. 1-9 Problema 19.

### Seção 1-5 Tempo

**20E.** Expresse a velocidade da luz,  $3,0 \times 10^8$  m/s, em (a) pés por nanossegundo e (b) milímetros por picossegundo.

**21E.** Enrico Fermi uma vez observou que um tempo de aula (50 min) é aproximadamente igual a 1 microscéculo. Qual é a duração de 1 microscéculo em minutos e qual o erro percentual da aproximação usada por Fermi?

**22E.** Um ano tem 365,25 dias. Quantos segundos tem um ano?

**23E.** Um certo relógio de pêndulo (com mostrador de 12 horas) adianta 1,0 min/dia. Depois de acertar o relógio, quanto tempo devemos esperar para que ele volte a marcar a hora correta?

**24E.** Qual é a idade do universo (veja a Tabela 1-4) em dias?

**25E.** (a) Uma unidade de tempo às vezes usada na física microscópica é o *shake*. Um shake é igual a  $10^{-8}$  s. (a) Existem mais shakes em um segundo que segundos em um ano? (b) O homem existe há cerca de  $10^6$  anos, enquanto o universo tem cerca de  $10^{10}$  anos de idade. Se a idade do universo é tomada como sendo 1 "dia", há quantos "segundos" o homem começou a existir?

**26E.** As velocidades máximas com que alguns animais conseguem correr, em milhas por hora, são aproximadamente as seguintes: (a) caracol,  $3,0 \times 10^{-2}$ ; (b) aranha, 1,2; (c) homem, 23; (d) guepardo, 70. Transforme esses números em metros por segundo. (Os quatro cálculos envolvem o mesmo fator de conversão. Será mais prático calcular primeiro esse fator e guardá-lo na memória da sua calculadora.)

**27P.** 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 aproximadamente  $3,0 \times 10^8$  m/s. Calcule a velocidade da luz em unidades astronômicas por minuto.

**28P.** Até 1883, cada cidade dos Estados Unidos tinha sua hora local. Hoje em dia, os viajantes precisam acertar o relógio apenas quando a diferença acumulada chega a 1 h. Que distância, em graus de longitude, um viajante deve percorrer para que tenha, em média, necessidade de acertar o relógio? *Sugestão:* Uma rotação da Terra equivale a  $360^\circ$  e 24 h.

**29P.** Em duas pistas diferentes, os vencedores da prova de uma milha fizeram os tempos de 3 min 58,05 s e 3 min 58,20 s. Para concluir que o corredor que fez o melhor tempo é realmente o mais rápido, qual o maior erro, em metros, que pode ser aceito ao se medirem as pistas?

**30P.** Cinco relógios estão sendo testados num laboratório. Em sete dias consecutivos, exatamente ao meio-dia, de acordo com o sinal de uma estação de rádio, as horas indicadas pelos relógios são anotadas. Os resultados aparecem na tabela, a seguir. Como você classificaria os cinco relógios em ordem de qualidade? Justifique.

Relógio	Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
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

**31P.** Supondo que a duração do dia aumenta uniformemente de 0,001 s por século, calcule o efeito cumulativo desse aumento em um período de 20 séculos. O fato de que a velocidade de rotação da Terra está diminuindo é comprovado pela observação do momento de ocorrência dos eclipses solares durante este período.

**32P\*.** O tempo necessário para que a lua volte a uma dada posição em relação às estrelas fixas é chamado de mês *sideral*. O intervalo de tempo entre fases idênticas da lua é chamado de mês *lunar*. O mês lunar dura mais tempo que o mês sideral. Por quê? De quanto tempo é a diferença?

### Seção 1-6 Massa

**33E.** Usando os dados e os fatores de conversão que aparecem neste capítulo, determine o número de átomos de hidrogênio necessário para obter 1,0 kg de hidrogênio. Um átomo de hidrogênio tem uma massa de 1,0 u.

**34E.** 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 em quilogramas de uma molécula de água? (b) Quantas moléculas de água existem nos oceanos da Terra, que possuem uma massa total estimada de  $1,4 \times 10^{21}$  kg?

**35E.** 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?

**36P.** Qual a massa de água que caiu na cidade do Problema 14 durante a tempestade? Um metro cúbico de água tem uma massa de  $10^3$  kg.

**37P.** (a) Supondo que a densidade (massa/volume) da água seja exatamente  $1 \text{ g/cm}^3$ , calcule a densidade da água em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). (b) Suponha que são necessárias 10 h para esvaziar um recipiente com  $5.700 \text{ m}^3$  de água. Com que rapidez a água está escoando, em quilogramas por segundo?

**38P.** Depois de começar uma dieta, uma pessoa passou a perder 2,3 kg por semana. Expresse esse número em miligramas por segundo.

**39P.** Os grãos de areia de uma praia da Califórnia têm um raio médio de  $50 \mu\text{m}$  e são feitos de dióxido de silício.  $1 \text{ m}^3$  do qual possui massa de 2.600 kg. Que massa de grãos de areia teria uma área superficial total igual à superfície de um cubo com 1 m de lado?

**40P.** A densidade do ferro é  $7,87 \text{ g/cm}^3$  e a massa de um átomo de ferro é  $9,27 \times 10^{-26} \text{ kg}$ . Se os átomos são esféricos e estão dispostos de forma compacta, (a) qual é o volume de um átomo de ferro e (b) qual é a distância entre os centros de dois átomos adjacentes?