

## A natureza atômica da matéria e introdução ao estudo de tensão e deformação em sólidos<sup>1</sup>

### I – A hipótese atômica

Imagine que você passe por uma experiência semelhante à de Alice no País das Maravilhas, quando ela diminui de tamanho. Imagine que se encontra de pé sobre uma cadeira, salta dela e vai caindo lentamente para o chão – e que enquanto cai, vai gradualmente diminuindo de tamanho. Enquanto está caindo em direção ao piso de madeira, você começa a se preparar para o impacto. Mas quando vai chegando bem perto do piso, tornando-se cada vez menor, você começa a observar que a superfície do piso não é tão lisa quanto lhe pareceu à primeira vista. As pequenas irregularidades encontradas em todas as madeiras mostram-se como grandes fendas. Ao cair em uma dessas fendas, que parecem cânions enquanto você continua encolhendo, você novamente se prepara para o impacto iminente apenas para descobrir que o fundo do cânion também é formado por outras fendas e frestas. Caindo em uma dessas frestas, tornando-se ainda menor, você nota que as paredes sólidas pulsam e são cheias de ondulações. As superfícies pulsantes consistem de bolhas nebulosas, a maioria com forma esférica, algumas com a forma oval, algumas maiores do que outras, e todas “escoando” lentamente umas pelas outras, formando longas cadeias de estruturas complexas. Caindo ainda mais, você de novo se prepara para o impacto enquanto se aproxima de uma dessas esferas enevoadas, mais e mais perto, cada vez encolhendo mais, até que —uau! Você entrou em um novo universo. Você acabou de cair num “mar de vazio”, onde existem “manchas” que eventualmente passam girando por

você a velocidades incrivelmente altas. Você se encontra no interior de um átomo, um vazio de matéria semelhante ao sistema solar. Exceto por partículas de matéria aqui e ali, o piso sólido no qual você penetrou é um espaço vazio. Se continuasse caindo, poderia chegar a cair vários metros através da matéria “sólida”, antes de colidir diretamente com uma dessas partículas subatômicas.

Toda matéria, não importa quão sólida ela pareça, é formada por minúsculos “tijolos”, eles mesmos sendo quase que totalmente espaços vazios. Esses minúsculos “tijolos” são os átomos – que podem ser combinados para formarem moléculas, as quais por sua vez agrupam-se para formar a matéria que vemos ao nosso redor.

### **A Hipótese Atômica**

A idéia de que a matéria é composta de átomos remonta aos gregos do quinto século a.C. Os investigadores da natureza de então se preocupavam em descobrir se a matéria era contínua ou não. Podemos quebrar uma rocha em pedaços, e os pedaços em cascalho fino. Este ainda pode ser moído até virar areia fina, que pode então ser transformada em pó. Parece talvez que houvesse um pedacinho de rocha mínimo, um “átomo” que não pudesse ser dividido ainda mais. Com a água parece ser diferente. Podemos seguir dividindo-a em gotas cada vez menores, e parece não haver razão para que esse processo não possa continuar indefinidamente. Apesar disso, esses primeiros “atomistas” acreditavam que a água também possuía um pedacinho mínimo e indivisível, um átomo de água.

Aristóteles, o mais conhecido dos antigos filósofos gregos, discordava da idéia de átomos. No quarto século a.C. ele ensinava que toda matéria é formada por diferentes combinações de quatro elementos – terra, ar, fogo e água. Essa concepção parecia razoável, pois no mundo que nos cerca a matéria é vista em apenas quatro formas: sólida (terra), gasosa (ar), líquida (água) ou no estado de labaredas (fogo). Os gregos viam o fogo como o elemento da mudança, pois observavam o fogo promover transformações nas substâncias que eram queimadas. As idéias de Aristóteles perduraram por mais de 2.000 anos.

A concepção atômica foi ressuscitada no início dos anos 1800 por um químico e professor escolar inglês, John Dalton. Ele explicava as reações químicas supondo que toda matéria fosse formada de átomos. Mas ele e outros da época não dispunham de evidência convincente da realidade dos átomos. Então em 1827 um botânico escocês, Robert Brown, notou algo muito estranho em seu microscópio. Ele estava analisando grãos de pólen em suspensão na água e viu que os grãos moviam-se e “saltavam” sem parar. No início ele pensou que os grãos fossem algum tipo de vida, porém, mais tarde, descobriu que partículas de poeira e pó de fuligem se comportavam da mesma maneira. Esse perpétuo movimento aleatório e irregular das partículas – atualmente conhecido como **movimento Browniano** – é o resultado visível das colisões entre as partículas visíveis com os átomos invisíveis. Os átomos são invisíveis porque são pequenos demais. Embora Brown não pudesse enxergar os átomos, podia ver o efeito que eles tinham sobre as partículas que ele podia enxergar. É como ver um balão gigante ser movimentado por uma multidão em um campo de futebol. Olhando a partir de um aeroplano voando alto, você não enxergaria as pessoas porque elas são pequenas, comparadas ao balão, o qual você enxergaria. Os grãos de pólen que Brown observou movem-se porque constantemente estão sendo abalroados pelos átomos (na verdade, pelas combinações de átomos chamadas de moléculas) que formam a água a seu redor.

Tudo isso foi explicado por Albert Einstein em 1905, no mesmo ano em que ele anunciou sua teoria especial da relatividade. Até a época da explicação de Einstein – que tornou possível a obtenção das massas atômicas – muitos cientistas proeminentes mantinham-se céticos quanto aos átomos. Portanto, vemos que a realidade dos átomos não foi estabelecida até os primeiros anos do século vinte.

<sup>1</sup> Textos extraídos de Hewitt, Paul G. **Física Conceitual**. Trad Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina – 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. pp. 195-230

A importância dos átomos foi salientada em 1963 pelo físico Richard Feynman, ao afirmar que se algum cataclismo destruísse todo o conhecimento científico, e apenas uma sentença pudesse ser transmitida à próxima geração, a afirmação contendo mais informação em menos palavras seria:

*“Todas as coisas são constituídas de átomos – pequenas partículas que se movem permanentemente, que se atraem mutuamente quando estão pouco afastadas, mas que se repelem quando são empurradas umas contra as outras”. Toda matéria – sapatos, navios, goma-laca, repolho e reis – qualquer material em que pensemos é constituído de átomos. Essa é a hipótese atômica, que agora fundamenta toda a ciência.*

---

### Os Elementos

Assim, a matéria que vemos ao nosso redor é formada por átomos. Poderíamos pensar que exista um número incrível de diferentes tipos de átomos para dar conta da rica variedade de substâncias que nos cercam. Mas o número deles de fato é surpreendentemente pequeno. Essa grande variedade de substâncias é o resultado não de uma enorme variedade de átomos, mas das muitas maneiras em que alguns tipos de átomos podem ser combinados – exatamente como as combinações de apenas três cores formam quase todas as cores concebíveis do espectro. Até esta data (2001), conhecemos 118 átomos diferentes, chamados de **elementos** químicos. Apenas 88 deles são encontrados na natureza; os outros são sintetizados em laboratórios, usando-se reatores nucleares e aceleradores de partículas de altas energias. Esses elementos, mais pesados, são muito instáveis (radioativos) para ocorrerem naturalmente em quantidades apreciáveis.

O hidrogênio, o mais simples dos elementos, foi o primeiro a ser formado depois do “Big Bang” e ainda constitui 90 por cento dos átomos no universo conhecido. Sua principal forma atômica consiste de um elétron solitário “zunindo” em torno de um único próton central. Os átomos de elementos mais pesados do que o hidrogênio possuem mais prótons em seus núcleos. Alguns desses elementos mais complexos são fabricados no interior das estrelas, onde as enormes temperaturas e pressões iniciam a síntese de elementos mais pesados. Isso é a fusão termonuclear (Capítulo 34). Nosso Sol é predominantemente constituído de hidrogênio, e a fusão termonuclear converte parte dele em hélio. O Sol não é suficientemente grande para fornecer a gravidade e as altas temperaturas necessárias para fundir o hélio em elementos mais complexos. Isso só ocorre em estrelas maiores. Mas mesmo as maiores estrelas não podem fundir elementos mais pesados do que o ferro. Muitos desses elementos mais pesados são formados quando estrelas gigantes explodem – o que é conhecido como supernova – e, além disso, de acordo com os cálculos recentes, quando duas estrelas de nêutrons colidem. (Uma estrela de nêutrons é o núcleo extremamente denso remanescente da explosão de uma supernova.) Assim, com exceção de alguma parte do hidrogênio e de traços de hélio, todos os elementos em nosso ambiente são remanescentes de estrelas que explodiram há muito tempo – a maioria delas antes mesmo do nascimento do sistema solar.

Esses remanescentes de estrelas são os tijolos atômicos de toda a matéria que nos rodeia. Essa matéria, seja complexa, viva ou inanimada, é alguma combinação desses elementos. Com uma despensa de aproximadamente 100 latas, cada uma delas contendo um elemento diferente, temos todos os materiais necessários para formar qualquer substância. Cerca de uma dúzia de elementos abrangem a maioria das coisas que vemos diariamente. Os seres vivos são formados principalmente por quatro elementos: hidrogênio [H], carbono [C], oxigênio [O] e nitrogênio [N]. As letras entre os colchetes são os símbolos químicos destes elementos. A maioria dos elementos não são encontrados na natureza em grande abundância, e alguns são extremamente raros.

*Os átomos são incrivelmente pequenos.* Um átomo é tantas vezes menor do que você quanto uma estrela média é maior do que você. Uma maneira adequada de expressar este fato é dizer que estamos situados entre os átomos e as estrelas. Outra maneira de enunciar a pequenez dos átomos é dizer: O diâmetro de um átomo está para o diâmetro de uma maçã assim como o diâmetro de uma maçã está para o diâmetro da Terra. Portanto, para conceber uma maçã cheia de átomos, pense na Terra com seu interior completamente preenchidos com maçãs. O número de átomos na maçã e de maçãs dentro da Terra são de mesma ordem de grandeza.

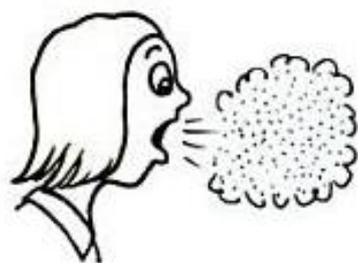
*Os átomos são numerosos.* Existem cerca de 100.000.000.000.000.000.000.000 átomos em um grama de água (cerca de um dedal de costura cheio d'água). Em notação científica, isso é igual a  $10^{23}$  átomos. Este é um número enorme, maior do que o número de gotas de água em todos os lagos e rios do mundo. Logo, existem mais átomos num dedal cheio d'água do que gotas de água nos lagos e rios do mundo todo.

*Os átomos não têm idade.* Muitos dos átomos de nosso corpo são tão antigos quanto o próprio universo, circulando e de novo circulando entre numerosos hospedeiros, tanto vivos como inanimados. Quando você respira, por exemplo, apenas alguns dos átomos que inala são exalados na expiração. Os átomos remanescentes ficam em seu corpo e tornam-se parte de você, e mais tarde deixam seu corpo de diferentes maneiras. Você não é o “proprietário” dos átomos que formam seu corpo; você apenas os toma emprestado. Todos nós compartilhamos a mesma “piscina” de átomos, enquanto eles migram eternamente ao nosso redor, para dentro de nós e entre nós. Alguns dos átomos que você arranca coçando seu nariz hoje talvez ontem tenham sido parte da orelha de seu vizinho!

\* A maior parte das substâncias comuns são formadas pela combinação de dois ou mais desses elementos mais comuns: hidrogênio [H], carbono [C], nitrogênio [N], oxigênio [O], sódio [Na], magnésio [Mg], alumínio [Al], silício [Si], fósforo [P], enxofre [S], cloro [Cl], potássio [K], cálcio [Ca] e ferro [Fe].

*Os átomos movem-se ao seu redor.* Os átomos estão num estado de movimento perpétuo. Isto fica evidente quando você põe uma gota de tinta num copo com água. Logo a tinta se espalha e acaba colorindo a água inteira do copo. Analogamente, um copo cheio de átomos de DDT, ou qualquer outro material, atirados ao oceano, espalham-se ao redor e mais tarde podem ser encontrados em todas as partes dos oceanos do mundo. O mesmo é verdadeiro para materiais liberados na atmosfera.

Na atmosfera, o oxigênio, o nitrogênio, o dióxido de carbono e outras moléculas simples zunem à nossa volta com até dez vezes a rapidez do som no ar. As moléculas difundem-se rapidamente, de modo que o oxigênio que o rodeia agora, pode ter estado do outro lado do país alguns dias atrás. É fascinante se dar conta de que há praticamente tantos átomos no ar em nossos pulmões, a qualquer momento, quanto o número de respirações completas de ar que cabem em toda a atmosfera do planeta. (Existem cerca de  $10^{22}$  átomos em um litro de ar mantido à pressão atmosférica, e cerca de  $10^{22}$  litros de ar na atmosfera inteira.) Este é um número incrivelmente grande de átomos, o mesmo número incrivelmente alto de litros que existem na atmosfera toda. Isso significa que, quando você exala o ar, expirando profundamente, o número de átomos exalados é aproximadamente equivalente ao número de respirações completas que cabem na atmosfera terrestre. Em alguns poucos anos, quando sua respiração se misturar uniformemente à atmosfera, qualquer um que inale ar, em qualquer lugar da Terra, inalará em mé-



**FIGURA 11.2** O número de átomos envolvidos numa expiração normal equivale ao número de respirações completas que cabem na atmosfera do planeta.

dia um daqueles átomos que você exalou ao respirar. Mas você aspira muitas e muitas vezes, de modo que outras pessoas inalam muitos e muitos átomos que estiveram alguma vez em seus pulmões – que uma vez fizeram parte de você. E vice-versa, é claro. Acredite ou não, mas a cada respiração que você dá, você aspira átomos que já fizeram parte de alguém que já viveu! Considerando que os átomos exalados são partes de nossos corpos (o nariz de um cachorro não tem dificuldade em nos assegurar isso), podemos genuinamente dizer que estamos respirando uns aos outros.

Assim, a origem dos átomos mais leves remonta à origem do universo, e a maior parte dos átomos mais pesados é mais antiga do que o Sol e a Terra. Há em nosso corpo átomos que existem desde os primeiros instantes do tempo, reciclando-se através do universo entre inúmeráveis formas, vivas ou inanimadas. Você é o atual zelador dos átomos que constituem o seu corpo. Existirão muitos que o seguirão.

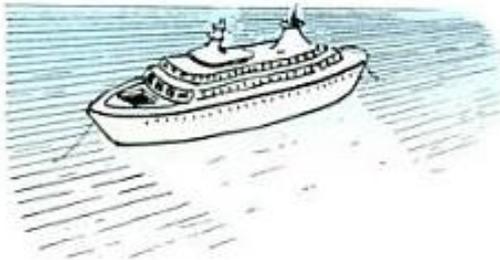
### Teste a si mesmo

1. Quais são mais antigos, os átomos no corpo de uma pessoa idosa ou aqueles que formam o corpo de um bebê?
2. A população mundial cresce a cada ano. Isto significa que a massa da Terra cresce a cada ano?
3. Nos cérebros de toda sua família há átomos que realmente já pertenceram a Einstein?

### III – Imagens atômicas

## Imagens Atômicas

Os átomos são pequenos demais para serem vistos com luz visível. Você poderia conectar uma série de microscópios ópticos, um depois do outro, e jamais conseguiria “enxergar” um átomo porque a luz é formada por ondas, e os átomos são menores do que os comprimentos de onda da luz visível. O tamanho de uma partícula visível com os maiores aumentos possíveis dos instrumentos deve ser maior do que o comprimento de onda da luz. Pode-se compreender isso melhor com o auxílio de uma analogia com ondas na água. O comprimento de onda das ondas na superfície da água é simplesmente a distância entre as cristas sucessivas das ondas. Considere o navio na Figura 11.4. Ele é muito maior do



**FIGURA 11.4** As ondas que passam por um navio fornecem informação a respeito dele, porque a distância entre as cristas sucessivas das ondas é pequena, comparada ao tamanho do navio.

que a distância crista a crista, ou comprimento de onda das ondas que nele incidem. A informação sobre o navio é facilmente revelada pela influência dele sobre as ondas que passam por ele. Considere agora as folhas do capim, numa situação em que ondulações produzidas pelo vento estão percorrendo um capinzal. Como as folhas do capim são muito mais estreitas do que o comprimento de onda, as ondas passam pelas folhas como se elas não estivessem ali. Apenas se as folhas fossem mais largas – ou seja, com larguras maiores do que a distância entre as cristas da onda – é que a onda poderia transmitir informação sobre os detalhes do capim. Da mesma maneira, as ondas de luz visível são grosseiras demais, comparadas ao tamanho de um átomo, para que possam revelar detalhes do tamanho e da forma dos mesmos. Eles são incrivelmente pequenos.

Todavia, na Figura 11.6 vemos uma foto de átomos – a imagem histórica de 1970 de cadeias de átomos individuais de tório. A fotografia não foi obtida com luz, mas com um estreito feixe eletrônico, no interior de um microscópio eletrônico desenvolvido por Albert Crewe, do Instituto Enrico Fermi, da Universidade de Chicago. Um feixe de elétrons, tal como aquele que constrói a imagem sobre a tela de uma televisão comum, é um fluxo de partículas que possuem propriedades ondulatórias. O comprimento de onda dos elétrons do feixe eletrônico é muito menor do que os comprimentos de onda da luz visível. De modo que os átomos são maiores do que o minúsculo comprimento de onda de um feixe eletrônico. A foto de Crewe é a primeira imagem de alta resolução de átomos individuais.

Um sucessor mais recente do microscópio de varredura eletrônica é um dispositivo mais simples chamado de mi-



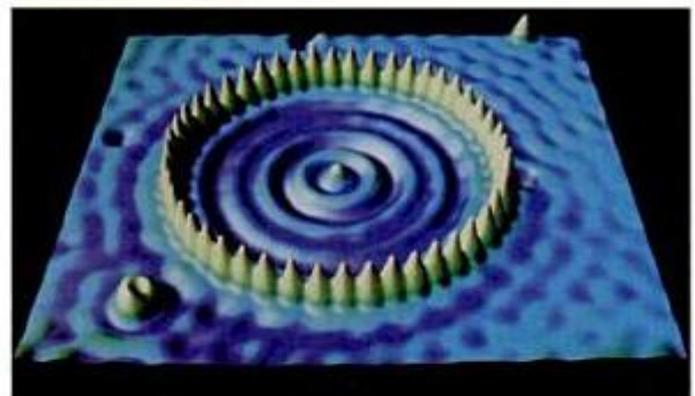
**FIGURA 11.5** Nenhuma informação sobre as folhas do capim é revelada por ondas que percorrem o campo, pois a distância entre as cristas da onda é maior do que o tamanho das folhas do capim.



**FIGURA 11.6** A primeira foto de átomos individuais, feita em 1970 usando-se um microscópio de varredura eletrônica desenvolvido por pesquisadores do Instituto Enrico Fermi, da Universidade de Chicago. As seqüências de pontos são cadeias de átomos de tório.

croscópio de *tunelamento* ou STM<sup>\*</sup>. Ele emprega uma agulha microscópica que esquadrinha uma superfície a uma distância de alguns poucos diâmetros atômicos ponto a ponto e linha por linha. Em cada ponto, mede-se a corrente elétrica microscópica que passa entre a superfície e a agulha, a chamada corrente de tunelamento. As variações do valor dessa corrente revelam a topologia da superfície. A imagem da Figura 11.7 mostra maravilhosamente a posição de um anel de átomos. As ondulações que aparecem no interior do anel revelam a natureza ondulatória da matéria. Essa imagem, entre muitas outras, realça a encantadora interação entre arte e ciência.

O que as imagens ainda não conseguem mostrar são os detalhes das partículas subatômicas que compõem os átomos. Eles diferem entre si no número de partículas subatô-



**FIGURA 11.7** Uma imagem de 48 átomos de ferro posicionados, formando um anel circular que serve de “curral” para os elétrons da superfície de um cristal de cobre, tirada com um microscópio de varredura por tunelamento no Laboratório Almaden da IBM em San Jose, Califórnia, EUA.

<sup>\*</sup> N. de T. do inglês “Scanning Tunneling Microscope”.

micas que contêm. As mais massivas dessas partículas estão ligadas na parte central do átomo, formando o *núcleo* atômico. Ao redor do núcleo estão partículas menores, os elétrons. Estas são as partículas que formam uma corrente elétrica. Vamos investigar as descobertas dos elétrons e de outras partículas internas aos átomos.

## IV – Moléculas

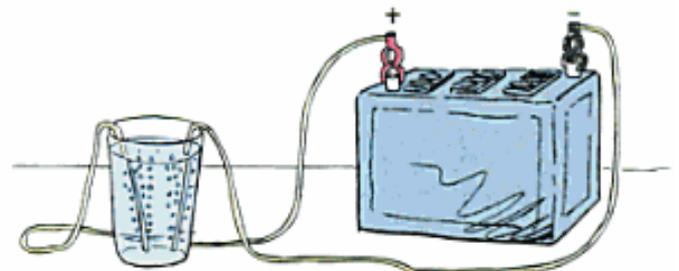
### Moléculas

Muitos compostos, mas não todos, são formados por *moléculas*. Uma **molécula** é a menor unidade de uma substância, sendo formada por dois ou mais átomos mantidos juntos pelo compartilhamento de elétrons. (Dizemos que esses átomos estão *ligados covalentemente*.) Uma molécula pode ser tão simples como a combinação de dois átomos de oxigênio ( $O_2$ ), ou de nitrogênio ( $N_2$ ), os quais formam a maior parte do ar que respiramos. Dois átomos de hidrogênio se combinam com um único átomo de oxigênio para produzir uma molécula de água ( $H_2O$ ). Substitua o oxigênio pelo nitrogênio e acrescente mais um átomo de hidrogênio e temos amônia ( $NH_3$ ). Mudar um átomo numa molécula pode fazer uma grande diferença. Na clorofila, por exemplo, existe um anel de átomos de hidrogênio, carbono e oxigênio rodeando um único átomo de magnésio. Substitua o átomo de magnésio por um de ferro e o anel se rearranjará até tornar-se o anel semelhante que existe na hemoglobina (uma proteína em nosso sangue). Assim, um átomo pode representar a diferença entre uma molécula que uma planta usa e outra que uma pessoa usa.

Uma molécula pode ser dividida em átomos que possuem suas próprias propriedades químicas. O experimento de fácil realização da Figura 11.19 mostra isso. Coloque dentro de um copo com água dois fios condutores ligados aos terminais de uma bateria comum – com um pouco de ácido sulfúrico para aumentar a condutividade elétrica. Posicione os fios em lados opostos do copo, de modo que não se toquem, e você notará bolhas de gás se formando sobre os fios. Se você conseguir recolher esses gases, descobrirá que eles possuem propriedades químicas completamente diferentes das do vapor d'água. Um deles é o hidrogênio, e o outro o oxigênio. Se os gases forem novamente misturados, e inflamados por um palito de fósforo, resultará um fogo rápido, ou explosão. A explosão é a combinação violenta do hidrogênio com o oxigênio, formando novamente água. Questão de verificação: Como se compara a quantidade de energia subitamente liberada, na explosão, com aquela que foi gradualmente retirada da bateria, para separar os gases? Está certo – as quantidades são iguais. A conservação da energia sempre reina!

Mais coisas podem queimar além daquelas que contêm carbono e hidrogênio. O ferro também “queima” (oxida). Isso é o processo de enferrujamento – a lenta combinação dos átomos de oxigênio com os do ferro, liberando energia. Acelerando-se a oxidação do ferro, pode-se fabricar práticos aquecedores de mãos para esquiadores e excursionistas de inverno. Qualquer processo em que os átomos se rearranjam para formar novas moléculas pode ser chamado de *reação química*.

A energia é necessária para romper as moléculas. Podemos compreender isso considerando a analogia com um par de ímãs unidos pela atração magnética. Assim como alguma “energia muscular” é necessária para separar esses ímãs, a quebra de moléculas também requer energia. A energia que rompe as moléculas do  $CO_2$  atmosférico, nas folhas das árvores, é fornecida pela luz solar. Essa energia é armazenada nas moléculas de carboidratos da árvore. Ela permanece ali armazenada até que a árvore seja oxidada, seja lentamente pelo apodrecimento, ou rapidamente pela queima. Quando isso acontece, a quantidade de energia liberada é igual à que foi originalmente suprida pelo Sol. Assim, o lento aquecimento resultante da decomposição em um composto de adubo, ou o rápido aquecimento produzido por uma fogueira, é na realidade um aquecimento produzido pela energia solar armazenada!

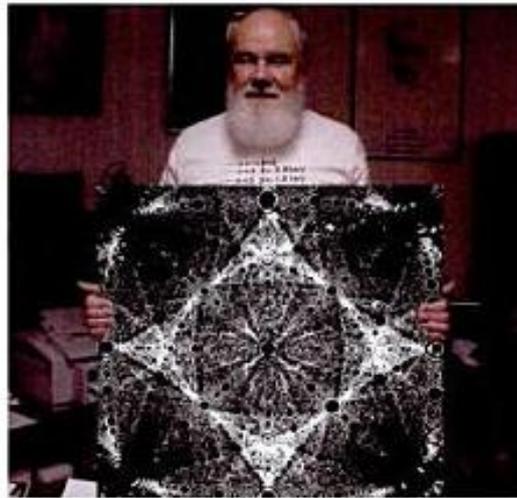


**FIGURA 11.19** Quando uma corrente elétrica passa através da água salgada, bolhas de oxigênio formam-se sobre o fio da esquerda, enquanto bolhas de hidrogênio formam-se sobre o fio da direita.

Quando a madeira ou qualquer outro combustível se oxida, o oxigênio se recombina com o carbono, ocorrendo a liberação de energia e a produção de dióxido de carbono. Este processo é chamado de *combustão*, a recombinação de oxigênio com carbono para formar dióxido de carbono. Ela ocorre lentamente na digestão, e rapidamente nas chamas. Se a combustão é muito rápida, como nos cilindros dos motores a gasolina, então ocorre também a produção de monóxido de carbono.

Nosso sentido de olfato é sensível a quantidades extremamente pequenas de moléculas. Nossos órgãos olfativos discernem claramente gases nocivos, tais como o dióxido de enxofre (que cheira como ovo podre), amônia e éter. A fragrância de perfume resulta das moléculas que rapidamente evaporaram e se espalharam em todas as direções através do ar, até que algumas delas chegassem próximo o suficiente para serem inaladas pelo nariz. Elas são apenas algumas dos bilhões de moléculas sacolejantes que, movimentando-se ao acaso, acabaram indo parar dentro do nariz. Você pode ter uma idéia da rapidez da difusão molecular no ar quando, estando em seu quarto, sente o cheiro da comida logo após a porta do forno ter sido aberta na cozinha.

## V – Estrutura cristalina dos sólidos



O presidente da Associação Americana de Professores de Física, John Hubisz, mostra uma imagem ampliada obtida com o famoso micrográfico inventado por Erwin Müller em 1958.

Os seres humanos têm utilizado os materiais sólidos por milhares de anos. As denominações Idade da Pedra, Idade do Bronze e Idade do Ferro nos revelam a importância dos materiais sólidos no desenvolvimento da civilização. A madeira e a argila também foram importantes para os povos primitivos, e pedras preciosas foram usadas para arte e decoração. O número e os usos dos materiais se multiplicaram com o decorrer dos séculos, ainda que tenha existido pouco progresso na compreensão da natureza dos sólidos. Essa compreensão teve que esperar pelas descobertas sobre os átomos, ocorridas no século vinte. Armados com o conhecimento acerca do átomo, químicos, metalúrgicos e cientistas de materiais de hoje inventam novos materiais diariamente. Os físicos do estado sólido exploram os semicondutores e outros materiais sólidos, e os confeccionam para atender às demandas da nossa era da informação.

### O Micrográfico de Müller

Um exemplo impressionante da estrutura da matéria sólida é mostrado acima. A imagem foi obtida com um micrográfico inventado em 1958 por Erwin Müller. Dr. Müller usou uma agulha extremamente fina de platina, com uma ponta na forma de um hemisfério com 40 milionésimos de centímetro de diâmetro. A agulha era confinada a um tubo com

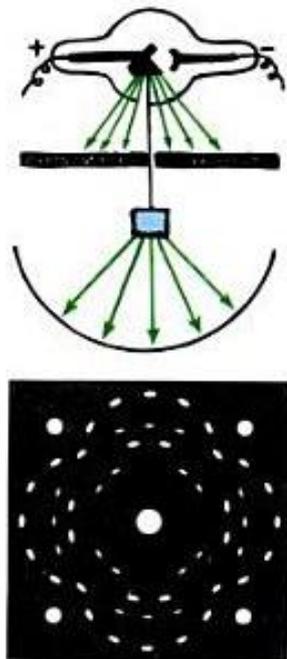
hélio rarefeito e sujeita a uma voltagem positiva muito alta (25.000 volts). Essa voltagem originava uma força elétrica tão intensa que quaisquer átomos de hélio que se “estabelecessem” sobre os átomos da ponta da agulha eram despidos de elétrons, tornando-se íons (átomos eletricamente carregados). Os íons de hélio positivamente carregados, então, eram rapidamente impulsionados para longe da ponta da agulha, em direções praticamente perpendiculares à superfície da mesma, em cada ponto. Os íons, então, atingiam uma tela fluorescente, produzindo esta imagem da ponta da agulha, onde o espaçamento entre os átomos aparece ampliado em quase 750.000 vezes. Pode-se ver claramente que a platina é cristalina, com os átomos arranjados de maneira semelhante à forma como as laranjas são arrumadas na banca de uma quitanda de frutas. Embora a imagem não mostre os próprios átomos, ela mostra as posições dos mesmos e revela a micro arquitetura de um dos sólidos que forma o nosso mundo.

### Estrutura Cristalina

Os sólidos são classificados em cristalinos ou amorfos. Metais, sais e a maioria dos minerais – os materiais da Terra – são cristalinos. As pessoas conheciam cristais tais como o sal e o quartzo há séculos, mas foi apenas no século vinte que

eles foram interpretados como arranjos regulares de átomos. Os raios X foram utilizados em 1912 para confirmar que todo cristal é um arranjo ordenado e tridimensional – uma rede cristalina de átomos. As medidas mostraram que os átomos de um cristal estavam muito próximos uns dos outros, com a distância entre eles aproximadamente igual ao comprimento de onda dos raios X. O físico alemão Max von Laue descobriu que um feixe de raios X direcionado para um cristal sofre difração, ou seja, é separado em feixes, produzindo um padrão característico (Figura 12.1). Os *padrões de difração* de raios X impressos em filme mostram que os cristais são como mosaicos bem definidos de átomos situados sobre redes regulares, como se fossem tabuleiros de xadrez tridimensionais. Metais como o ferro, o cobre e o ouro possuem estruturas cristalinas relativamente simples. O estanho e o cobalto apresentam estruturas um pouco mais complexas. Todos os metais contêm uma mixórdia de inúmeros pequenos cristais, cada qual praticamente perfeito, e cada um possuindo a mesma rede regular, mas com orientação diferente em relação ao cristal adjacente. Esses cristais metálicos podem ser vistos quando uma superfície metálica é *cauterizada*, ou limpa, com ácido. Você pode ver as estruturas cristalinas sobre a superfície do ferro galvanizado exposta ao clima, ou sobre as maçanetas de bronze expostas ao suor de muitas mãos.

As fotografias de von Laue dos padrões de difração fascinaram os cientistas ingleses William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg. Eles desenvolveram uma fórmula matemática que mostrou exatamente como os raios X deveriam se espalhar a partir das várias camadas atômicas regularmente espaçadas dentro de um cristal. Com essa fórmula,



**FIGURA 12.1** A determinação da estrutura cristalina através de raios X. A fotografia do sal é o resultado da difração de raios X. Os raios vindos do tubo de raios X são bloqueados por uma chapa de chumbo, exceto para um feixe estreito que incide sobre o cristal de cloreto de sódio (o sal de cozinha comum). A radiação que penetrou no cristal e alcançou o filme fotográfico formou o padrão mostrado. A mancha branca central é o feixe original não espalhado de raios X. Os tamanhos e o arranjo das outras manchas resultam da estrutura em forma de rede formada pelos íons de sódio e de cloro do cristal. Cada estrutura cristalina tem sua própria imagem de difração de raios X. Um cristal de cloreto de sódio produz sempre esse mesmo desenho. (Adaptado da obra Matter, Life Science Library, 1965.)

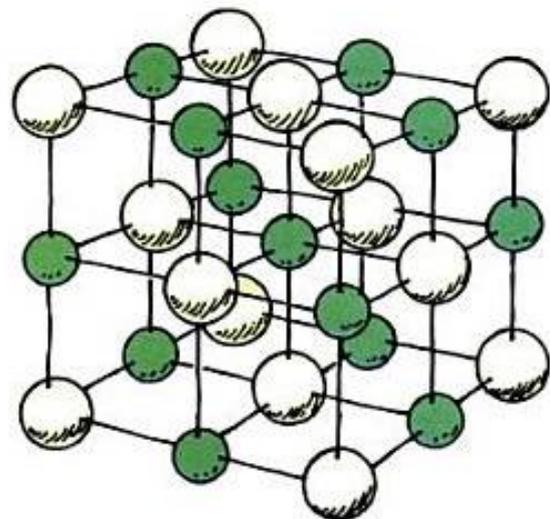
e uma análise do padrão de manchas claras da difração, eles conseguiram determinar as distâncias entre os átomos de um cristal.

No estado *amorfo*, os átomos e as moléculas de um sólido estão distribuídas aleatoriamente. Borracha, vidro e plástico estão entre os materiais para os quais falta um arranjo ordenado e repetitivo de suas partículas básicas. Em muitos sólidos amorfos, as partículas possuem alguma liberdade para vagar pelo material. Isso é evidenciado na elasticidade da borracha, e na tendência do vidro de fluir quando sujeito a tensões por longos períodos de tempo.

Não importando se os átomos estão num estado amorfo ou num estado cristalino, eles vibram em torno de sua própria posição de equilíbrio. Eles se mantêm juntos pelas forças elétricas de ligação. Não iremos abordar as *ligações atômicas* agora, a não ser para mencionar que existem quatro diferentes tipos delas nos sólidos: a ligação iônica, a covalente, a metálica e a mais fraca de todas, a de Van der Waals. Algumas das propriedades de um sólido são determinadas pelos tipos de ligações que ele possui. Mais informação a respeito pode ser encontrada em praticamente qualquer texto de química.



**FIGURA 12.2** Cristais de prata.



**FIGURA 12.3** O cristal de cloreto de sódio: as esferas maiores representam os átomos de cloro (que realmente são íons).

## VI – Elasticidade

### Elasticidade

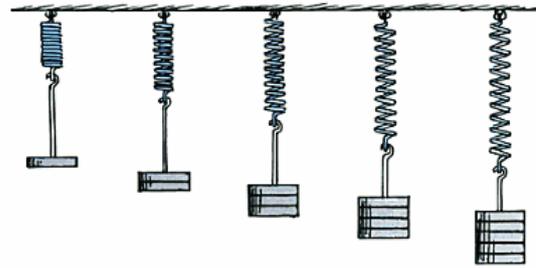
Quando um objeto está sujeito a forças externas, ele sofre alterações em tamanho, forma ou em ambos. As alterações dependem dos arranjos dos átomos e do tipo de ligação entre eles no material.

Uma mola distende-se quando um peso é pendurado nela. Um peso adicional a estica ainda mais. Se o peso é retirado, a mola volta a ter o mesmo comprimento original. Dizemos que a mola é *elástica*. Quando um rebatedor de beisebol atinge uma bola com o bastão, ela muda temporariamente sua forma. Para atirar uma flecha, um arqueiro arqueia mais o arco, o qual retorna à forma original quando a flecha é liberada. A mola, a bola de beisebol e o arco são alguns exemplos de objetos elásticos. A **elasticidade** é a propriedade pela qual a forma se altera quando uma força deformante atua sobre o objeto, o qual retorna à forma original quando a força deformante é retirada. Nem todos os materiais retornam à forma original quando a força deformante que foi aplicada for retirada. Os materiais que não re assumem sua forma original após terem sido deformados são chamados de *inelásticos*. Argila, massa de vidraceiro e massa de farinha de trigo são materiais inelásticos. O chumbo também é inelástico, pois é muito fácil deformá-lo permanentemente.

Quando um peso é pendurado a uma mola, uma força (a gravidade) atua sobre ele. A distensão sofrida é diretamente proporcional à força aplicada (Figura 12.6). Analogamente, quando você sobe na cama, a compressão das molas é diretamente proporcional ao peso aplicado. Essa relação, já observada pelo físico britânico contemporâneo de Newton, Robert Hooke, em meados do século dezessete, é chamada de **lei de Hooke**. O valor da distensão ou da compressão



**FIGURA 12.5** Uma bola de beisebol é elástica



**FIGURA 12.6** A distensão da mola é diretamente proporcional à força aplicada. Se o peso é dobrado, a mola se distende duas vezes mais.

(variação do comprimento),  $\Delta x$ , é diretamente proporcional à força aplicada  $F$ . Em notação matemática,

$$F \sim \Delta x$$

Se um material elástico for distendido ou comprimido além de um certo valor, ele não mais retornará ao seu estado original e ficará distendido. A distância além da qual se produzem deformações permanentes é chamada de *limite elástico*. A lei de Hooke é válida somente enquanto a força aplicada não distender ou comprimir o material além de seu limite elástico.

### Desafie a si mesmo

1. Uma carga de 2 kg é pendurada na extremidade de uma mola. A mola, então, se distende uma distância igual a 10 cm. Se, em vez disso, uma carga de 4 kg for pendurada à mesma mola, quanto esta se distenderá? E se uma carga de 6 kg fosse pendurada a essa mola? (Considere que nenhuma dessas cargas distenda a mola além de seu limite elástico.)
2. Se uma força de 10 N distende em 4 cm uma certa mola, que distensão ocorrerá para uma força aplicada de 15 N?

## VII – Tensão e compressão

### Tensão e Compressão

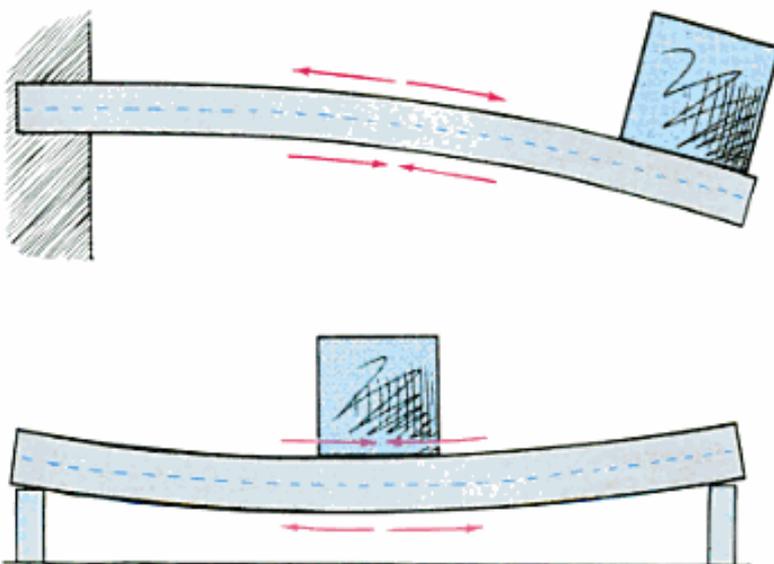
Quando alguma coisa é puxada (distendida), dizemos que ela está submetida a uma *tensão*. Quando ela é empurrada para dentro de si (esmagada), dizemos que está sofrendo uma *compressão*. Quando você curva uma régua, ou uma vara qualquer, o lado externo da parte curva da régua está sob tensão. A parte curva interna está sendo empurrada, sofrendo compressão, portanto. A compressão faz as coisas tornarem-se mais curtas e largas, enquanto a tensão as torna mais compridas e estreitas. Isso não é óbvio para a maioria dos materiais rígidos, no entanto, porque o encurtamento ou o alongamento é muito pequeno.

O aço é um excelente material elástico, pois pode resistir a grandes forças aplicadas e depois retornar à sua forma e ao seu tamanho originais. Por causa dessas propriedades de elasticidade e de resistência, ele é usado não apenas para fabricar molas, mas também vigas para construções. As vigas verticais de aço usadas na construção de edifícios altos sofrem apenas uma ligeira compressão. Uma viga vertical típica, com 25 metros de comprimento (uma coluna), utilizada em construções altas, é comprimida em cerca de 1 milímetro quando suporta uma carga de 10 toneladas. Isso pode ser aumentado. Um edifício de 60 a 70 andares pode ter comprimido suas enormes colunas de aço em cerca de 2,5 centímetros (uma polegada) ao final da construção..

Deformação ainda maior ocorre quando as vigas são usadas horizontalmente, quando tendem a vergar-se sob cargas pesadas. Quando uma viga horizontal é sustentada por uma ou por ambas extremidades, ela se encontra tanto sob tensão como sob compressão, devido à carga que ela sustenta e ao seu próprio peso. Considere a viga horizontal sustentada por uma das extremidades na Figura 12.7 (conhecida como “viga em balanço” ou “viga cantiléver”). Ela verga devido ao próprio peso e ao peso da carga que ela sustenta na extremidade livre. Basta pensar um pouco para perceber que o lado superior da viga está sendo distendido. Seus átomos foram afastados além do normal. O lado superior é um pouco mais comprido do que o lado inferior, pois está sob tensão. Seguindo o raciocínio, percebe-se que o lado inferior da viga está sob compressão. Seus átomos foram aproximados uns dos outros além do normal. Ela é um pouco mais curta no lado de baixo do que no lado de cima devido à maneira como foi vergada. A parte superior está sob tensão e a parte inferior sob compressão. Você consegue perceber que entre o lado superior e o inferior existe uma região onde não existem esforços no interior do material, nem tensão nem compressão? Essa região é denominada *camada neutra*.

A viga horizontal mostrada na Figura 12.8, conhecida como “viga simples”, é sustentada por ambas as extremidades e suporta o peso de uma carga situada no meio. Nesta situação, existe compressão no lado superior da viga, e tensão no lado inferior da mesma. De novo, existe uma camada neutra ao longo da parte central da espessura da barra, ao longo de todo seu comprimento.

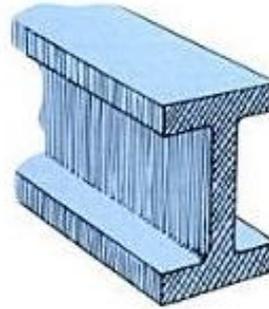
Com a camada neutra em mente, podemos compreender a razão para que a seção transversal de vigas de aço tenham o formato da letra I (Figura 12.9). A maioria do material nestas vigas com seção transversal em “I” está concentrada nas bordas do topo e do fundo da seção transversal; o peda-



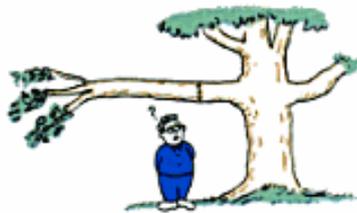
**FIGURA 12.7** O lado superior da viga está distendido e o lado inferior está comprimido. O que acontece com a parte do meio, entre o lado inferior e o superior?

**FIGURA 12.8** O lado superior da viga está comprimido e o lado inferior está distendido. Onde está a camada neutra (a parte que não está nem distendida nem comprimida)?

ço de material que une as duas bordas, denominado *alma de viga*, contendo a camada neutra, pode ser muito menos largo do que as bordas. Assim, quando a viga é usada horizontalmente numa construção, o esforço está concentrado nas bordas superior e inferior da viga – e não na parte central. Uma borda é comprimida enquanto a outra é distendida. Entre as bordas superior e inferior está uma região relativamente livre de esforços, cuja função principal é manter juntas aquelas bordas. Para esta finalidade, é necessário comparativamente pouco material. As bordas suportam praticamente todos os esforços no interior da viga. Uma viga com seção transversal em “I” é praticamente tão forte quante uma viga de seção retangular, com as mesmas dimensões globais, porém com um peso consideravelmente menor. Uma viga de aço de uma certa extensão, com seção retangular, poderia colapsar sob seu próprio peso, ao passo que uma viga com seção transversal em “I” da mesma extensão poderia suportar mais carga adicional.



**FIGURA 12.9** Uma viga em “I” é como uma barra sólida em que uma parte do aço foi “escavada” na sua região central, onde era menos necessário. A viga obtida é, portanto, mais leve e tem a mesma resistência.



### Teste a si mesmo

1. Quando você caminha sobre um piso de madeira cujas tábuas se vergam sob seu peso, onde se encontra a camada neutra delas?
2. Suponha que você perfure um buraco horizontal através do galho da árvore, como mostrado na ilustração. Onde a perfuração enfraqueceria menos o galho – na porção superior, no meio ou na porção inferior do galho?

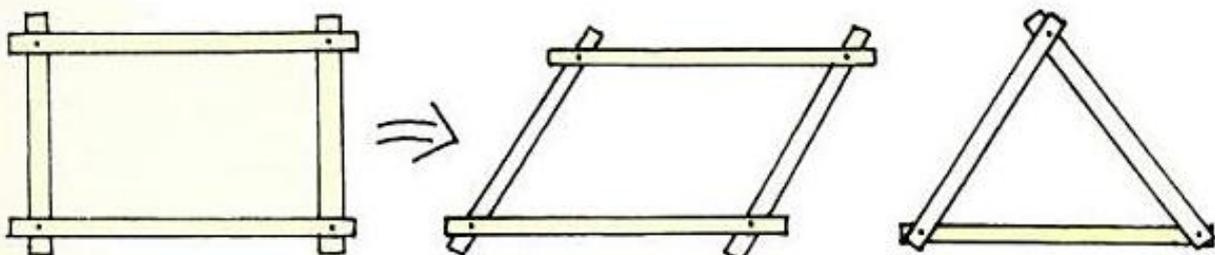


**FIGURA 12.10** A metade superior do galho está sob tensão devido ao seu próprio peso, enquanto a metade inferior está sob compressão. Em que região a madeira não está distendida nem comprimida?

### Praticando Física

Se você fixa com pregos quatro régua de madeira, o retângulo assim formado pode facilmente ser deformado e se transformar num paralelogramo. Mas se você fixar da mesma maneira somente três dessas régua, o triângulo obtido não pode ser deformado sem que de fato as régua se rompam ou que algum dos pregos seja de-

salojado. O triângulo é a mais resistente de todas as figuras geométricas, motivo pelo qual você vê formas triangulares em pontes. Experimente e comprove, e então passe a observar os triângulos sendo usados para reforçar muitos tipos de estruturas.



## VIII – Arcos

### Arcos

As rochas quebram mais facilmente quando submetidas à tensão do que à compressão. Os tetos das estruturas de rocha erigidas pelos egípcios durante a época das pirâmides eram construídos com muitas lajes horizontais de rocha.

Devido à fraqueza dessas lajes sob as forças de tensão produzidas pela gravidade, muitas colunas verticais tiveram que ser erguidas para sustentar os tetos dessas estruturas. O mesmo aconteceu com os templos da Grécia antiga. Até que surgiram os arcos – e com isso, menos colunas verticais.

Observe a parte superior das janelas dos edifícios antigos de tijolos. Provavelmente eles são arqueados. A mesma coisa com respeito à forma das antigas pontes de pedra. Quando uma carga é localizada sobre uma estrutura adequa-

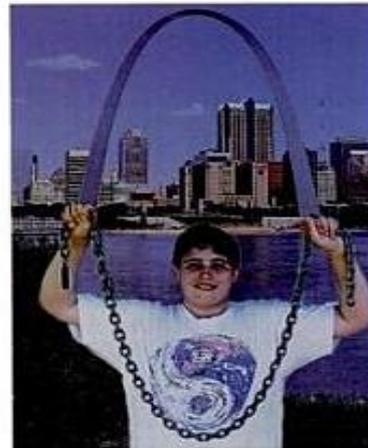


**FIGURA 12.14** O peso da cúpula produz compressão, não tensão, de modo que não são necessárias colunas de sustentação na parte central do prédio.

**FIGURA 12.11** As lajes horizontais de rocha do teto não podem resistir por muito tempo, pois a rocha rompe facilmente sob tensão. Eis a razão da necessidade de tantas colunas para sustentar o teto.



**FIGURA 12.12** Arcos de pedra comuns semicirculares, que têm se mantido por séculos.



**FIGURA 12.13** Tanto a forma assumida por uma corrente vergada sob seu próprio peso, como o arco da cidade de Saint Louis, são catenárias.

damente arqueada, a compressão acaba reforçando a estrutura, ao invés de enfraquecê-la. As pedras são empurradas mais firmemente, umas contra as outras, mantidas juntas pelas forças de compressão. Com a forma correta do arco, as pedras nem mesmo precisam de cimento para se manterem juntas. Quando a carga a ser sustentada é horizontalmente uniforme, como com uma ponte, a forma apropriada do arco é uma parábola, a mesma curva que é percorrida por uma pedra lançada no ar. Os cabos de sustentação principais de uma ponte pênsil constituem exemplos de arco parabólicos “virados para baixo”. Se, por outro lado, o arco está suportando apenas seu próprio peso, a curva que lhe dá mais resistência é conhecida como *catenária*. Uma catenária é uma curva formada por uma corda ou corrente pendurada pelas extremidades em dois pontos fixos. A tensão em cada parte da corda ou corrente é paralela à curva. De modo que quando um arco de pedras sem cimento toma a forma de uma catenária invertida, a compressão interna às pedras é paralela ao arco em todos os lugares, da mesma maneira que a tensão entre os elos adjacentes de uma corrente arqueada sob seu

próprio peso é paralela à corrente em qualquer lugar. O arco que enfeita a cidade de Saint Louis, EUA, é uma catenária (Figura 12.13).

Se você rodar um arco até completar uma volta ao redor de um eixo vertical, obterá uma cúpula. O peso da cúpula, como o de um arco, produz compressão. Cúpulas modernas, tais como a do *Astrodome* de Houston, Texas, EUA, são catenárias tridimensionais, e podem cobrir grandes áreas sem haver a interrupção da visão por colunas. Existem cúpulas baixas (como a do Monumento a Jefferson) e altas (como a do Capitólio dos Estados Unidos). E antes dessas existiram os iglus no Ártico.

**Teste a si mesmo** Por que é mais fácil para um pintinho dentro do ovo romper a casca de dentro para fora, do que para um pintinho do lado de fora penetrar no ovo, rompendo a casca de fora para dentro?

## Mudanças de Escala\*

Você já notou como uma formiga é forte para o seu tamanho? Uma formiga consegue carregar em suas costas um peso equivalente a várias formigas, ao passo que um elefante forte enfrenta grandes dificuldades para carregar um único elefante. Quão forte seria uma formiga se mudássemos sua escala, de modo que seu tamanho fosse igual ao de um elefante? Esta “superformiga” seria de fato muito mais forte do que um elefante? Surpreendentemente, a resposta é negativa. Uma formiga como essa não seria capaz de erguer seu próprio peso do chão. Suas pernas seriam finas demais para sustentar seu peso aumentado e provavelmente quebrariam.

Existe uma razão para que as pernas de uma formiga sejam finas e as de um elefante sejam grossas. À medida que o tamanho de alguma coisa aumenta, seu peso aumenta mais rapidamente do que sua resistência. Você pode segurar um palito de dente horizontalmente pelas extremidades sem notar qualquer vergadura nele. Mas sustente uma árvore da mesma madeira, horizontalmente pelas extremidades, e vo-

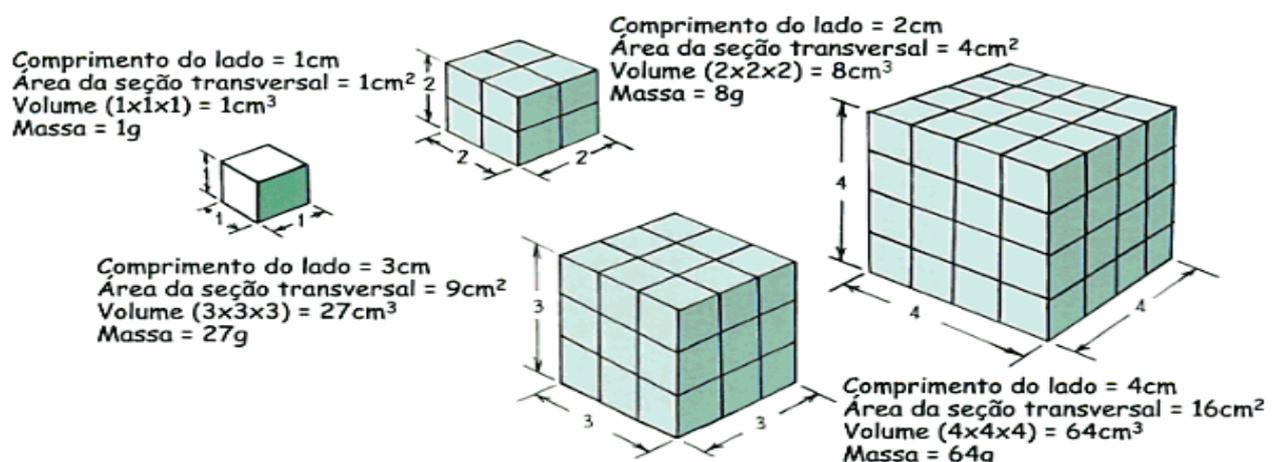
\* Mudança de escala foi estudada por Galileu, que diferenciou os diversos tamanhos dos ossos de várias criaturas. O material desta seção é baseado em dois deliciosos ensaios instrutivos: “On Being the Right Size”, por J. B. S. Haldane, e “On Magnitude”, por Sir D’Arcy Wentworth Thompson, ambos encontrados em *The World of Mathematics*, volume II, New York: Simon and Schuster, 1956.

cê perceberá uma considerável vergadura dela. Com respeito ao seu próprio peso, o palito de fósforo é muito mais resistente do que a árvore. **Mudança de escala** é o estudo de como o volume e a forma (tamanho) de um objeto qualquer afetam a relação entre seu peso, resistência e área superficial.

A *resistência* depende da área da seção transversal (que é bidimensional e medida em centímetros *quadrados*), enquanto o peso depende do volume (que é tridimensional e medido em centímetros *cúbicos*). Para compreender esses tipos de relação quadrada e cúbica, considere o caso mais simples de um cubo de matéria sólida, com 1 centímetro de lado – um cubo de açúcar, digamos. Qualquer cubo desse tipo possui uma seção transversal de 1 centímetro quadrado. Ou seja, se ele fosse fatiado paralelamente a uma de suas faces, a área da fatia seria de 1 centímetro quadrado. Compare isso com um cubo que tem o dobro das dimensões lineares do anterior – um cubo com aresta de 2 centímetros. Como mostra o desenho, a área de sua seção transversal será de  $2 \times 2$ , ou 4, centímetros quadrados, e seu volume será de  $2 \times 2 \times 2$ , ou 8, centímetros cúbicos. Portanto, este segundo cubo será quatro vezes mais resistente do que o primeiro, porém oito vezes mais pesado. Uma inspeção cuidadosa da Figura 12.15 mostra que para acréscimos nas dimensões lineares, a área da seção transversal (bem como a área total) cresce com o quadrado da dimensão linear, ao passo que o volume cresce com o cubo da dimensão linear.

### Teste a si mesmo

1. Considere um cubo com 1 centímetro cúbico ampliado até tornar-se um cubo com arestas de 10 centímetros de comprimento.
  - (a) Qual seria o volume do cubo ampliado?
  - (b) Qual seria a área de sua seção transversal?
  - (c) Qual seria sua área superficial total?
2. Se, de alguma maneira, você fosse ampliado e passasse a ter um tamanho duas vezes maior, preservando suas proporções atuais, você ficaria mais forte ou mais fraco? Explique seu raciocínio.



**FIGURA 12.15** Quando as dimensões lineares de um objeto variam por um certo fator, a área da seção transversal varia com o quadrado deste fator, enquanto o volume (e daí o peso) varia com o cubo do fator. Vemos que quando as dimensões lineares são dobradas (fator = 2), a área cresce em  $2^2 = 4$  vezes, e o volume cresce em  $2^3 = 8$  vezes.

## X – Mudanças de Escala – Parte II

O volume (e daí o peso) cresce bem mais rápido do que o correspondente crescimento das áreas de suas seções transversais. Embora o exemplo acima ilustre isso para o caso simples de um cubo, o princípio se aplica a qualquer objeto de forma arbitrária. Considere um atleta que consegue fazer um grande número daqueles exercícios denominados apoios. Imagine que ele pudesse ser ampliado a um tamanho duas vezes maior, ou seja, duas vezes mais alto e duas vezes mais largo, com o quê, seus ossos seriam duas vezes mais largos e cada uma de suas dimensões lineares seria aumentada por um fator igual a dois. Seria ele duas vezes mais forte, e capaz de erguer carga igual a si mesmo com duas vezes mais facilidade? A resposta é não. Embora seus braços, duas vezes mais largos, tenham áreas de seções transversais quatro vezes maiores e sejam quatro vezes mais fortes, ele seria oito vezes mais pesado agora do que antes. Com esforço comparável, ele seria capaz de erguer apenas a metade de seu novo peso. Em relação ao seu novo peso, ele seria mais fraco do que antes.

Comprova-se na natureza que os grandes animais possuem pernas desproporcionalmente grossas quando comparadas com as dos animais pequenos. Isso se deve à relação entre o volume e a área, ao fato de que o volume (e o peso) cresce com o cubo do fator pelo qual as dimensões lineares dos animais aumentam, enquanto a resistência (e a área) cresce com o quadrado daquele fator. Assim vemos o porquê das pernas finas de pernilongos, veados e antílopes, e das pernas grossas de rinocerontes, hipopótamos e elefantes.

Assim a grande resistência atribuída a King Kong e outros gigantes fictícios não pode ser considerada seriamente. O fato de que as consequências de mudanças de escala são convenientemente omitidas é uma das diferenças entre ciência e ficção científica.

É importante também comparar a área superficial total com o volume (Figura 12.16). A área superficial total, da mesma maneira que a área de uma seção transversal, cresce proporcionalmente ao quadrado do aumento nas dimensões lineares de um objeto, enquanto o volume cresce em proporção ao cubo do aumento linear. De maneira que, quando um objeto cresce, sua área superficial e seu volume crescem por fatores diferentes, resultando na *diminuição* da razão entre a área superficial e o volume. Em outras palavras, tanto a área superficial como o volume crescem quando um determinado objeto é ampliado, mas a ampliação correspondente da área superficial é menor *com respeito* à ampliação ocorrida no volume do objeto. Poucas pessoas realmente compreendem este conceito. Os exemplos seguintes podem servir de ajuda.

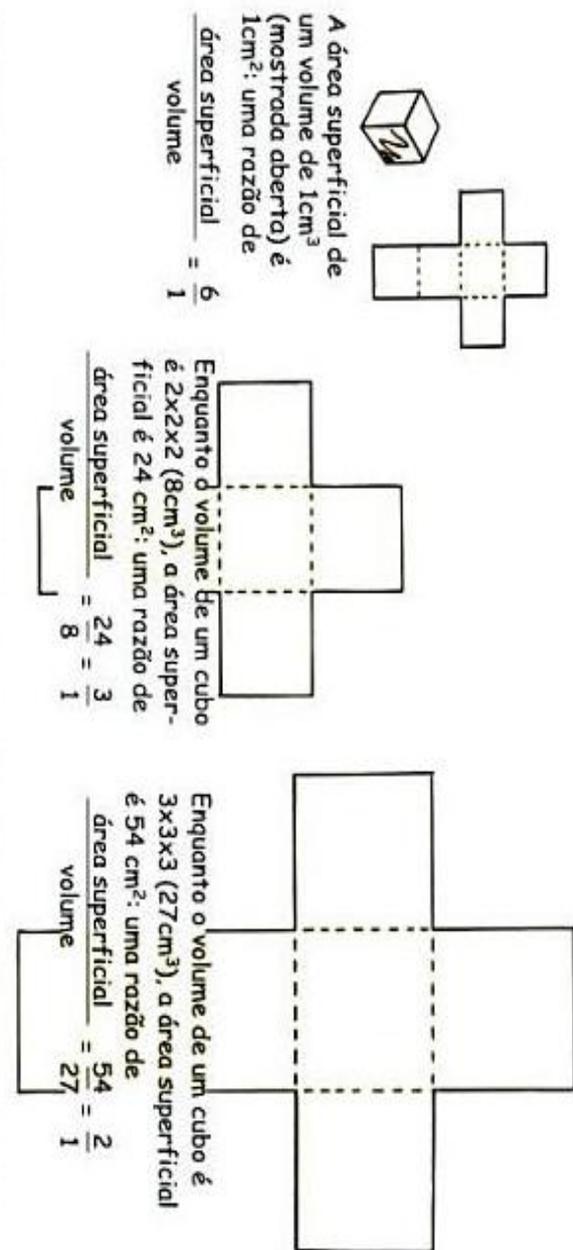


FIGURA 12.16 Quando o tamanho de um objeto aumenta, o volume cresce por um fator maior do que o fator de crescimento da área superficial; com isso, diminui a razão da área superficial pelo volume do objeto.



**FIGURA 12.17** A longa cauda de um macaco não apenas serve para ele se equilibrar, mas também para irradiar calor com eficiência.

As grandes orelhas dos elefantes africanos são a maneira de a natureza compensar a pequena razão entre a área superficial e o volume dessas grandes criaturas. As grandes orelhas não apenas servem para ouvir melhor, mas principalmente para resfriar seu corpo. A taxa de calor que a criatura dissipa é proporcional a sua área superficial. Se um elefante não tivesse as orelhas grandes, ele não possuiria uma área superficial suficientemente grande para resfriar sua enorme massa corporal. As grandes orelhas aumentam con-



**FIGURA 12.18** O elefante africano tem uma área superficial menor, comparada ao seu peso, do que outros animais. Isso é compensado pelas grandes orelhas que possui, que aumentam a superfície total de irradiação e promovem o resfriamento do corpo.

sideravelmente a área superficial global, o que facilita o resfriamento em climas quentes.

Ao nível microscópico, as células vivas têm de competir com o fato de que o aumento do volume é mais rápido do que o da área superficial, quando muda-se de escala. As células alimentam-se por difusão, através de suas superfícies. Quando as células crescem, suas áreas superficiais crescem também, mas não rápido o suficiente para acompanhar o crescimento do volume. Por exemplo, se a área superficial aumenta em quatro vezes, o volume correspondente aumenta em oito vezes. Massa oito vezes maior deve, portanto, ser mantida com apenas quatro vezes mais alimentos. Além de um determinado tamanho, a área superficial não é suficientemente grande para que a quantidade de alimentos absorvidos através da superfície seja suficiente para manter a célula viva, o que impõe um limite máximo para o tamanho que as células podem ter. Assim, a célula se divide, e a vida existe como a conhecemos. E isso é ótimo.

Não tão agradável é o destino de grandes criaturas quando elas sofrem quedas. O lema "Quanto maior, pior a queda" mantém-se valendo, o que é uma consequência da pequena razão da área superficial para o peso. A resistência oferecida pelo ar ao movimento através dele é proporcional à área superficial do objeto em movimento. Se você cair de uma árvore, ainda que na presença da atmosfera, você cairá com praticamente 1 g de aceleração. Você não possui área suficiente em relação a seu peso para freá-lo até uma rapidez de queda segura – a menos que disponha de um pára-quedas. As pequenas criaturas, por outro lado, não precisam de pára-quedas. Elas têm uma fartura de área superficial em relação a seus pesos pequenos. Um inseto pode cair do topo de uma árvore até o chão sem nada sofrer. A razão da área superficial pelo peso está a favor do inseto, pois o inseto, efetivamente, *é seu próprio pára-quedas*.

As consequências opostas de uma queda são apenas uma ilustração das diversas relações que os grandes e pequenos organismos têm com o meio ambiente físico. Para insetos, a força da gravidade é minúscula comparada com as forças de coesão (aderência) entre suas patas e a superfície sobre a qual caminham. Eis por que uma mosca consegue subir andando uma parede vertical, ou andar no teto, ignorando completamente a gravidade. Seres humanos e elefantes não conseguem fazê-lo. As vidas das pequenas criaturas são comandada não pela gravidade, mas por forças tais como tensão superficial, coesão e capilaridade, das quais trataremos no próximo capítulo.

A regra segundo a qual coisas pequenas possuem áreas relativamente grandes para seus volumes, massas e pesos, fica evidente numa cozinha. Um cozinheiro sabe que sempre se obtém mais cascas quando se descasca 5 quilogramas de batatas pequenas do que quando se descasca 5 quilogramas de batatas grandes. Objetos pequenos possuem mais área superficial por quilograma. O gelo picado esfriará uma bebida mais rápido do que um único cubo de gelo com mesma massa porque o gelo picado apresenta mais área superfi-

cial à bebida. Uma palha de aço enferruja completamente numa pia, enquanto facas de aço enferrujam muito mais lentamente. O enferrujamento é um fenômeno de oxidação superficial. O ferro oxida quando exposto ao ar, mas seu enferrujamento é muito mais rápido, até ser completamente consumido, quando se apresenta na forma de filamentos ou limalha.

Pedaços de carvão mineral queimam, ao passo que pó de carvão mineral explode quando aceso. Batatas cortadas em tiras finas fritam mais rápido no óleo do que quando são cortadas em tiras mais grossas. Hambúrgueres achatados cozinham mais rápido do que almôndegas esféricas de carne com mesma massa. Gotas de chuva grossa caem mais rápido do que gotas de chuva fina, e peixes grandes nadam mais rápido do que peixes pequenos. Todas essas são consequências do fato de que o volume e a área não são diretamente proporcionais entre si.

É interessante observar que a taxa de batimento cardíaco em um mamífero está relacionada com o tamanho do animal. O coração de um pequeno esquilo bate cerca de vinte vezes mais rápido do que o de um elefante. Em geral, mamíferos pequenos vivem agitadamente e morrem cedo; animais maiores vivem num ritmo mais vagaroso e vivem mais tempo. Você não precisa sentir pena de um porquinho-da-índia de estimação que não viveu tanto quanto um cachorro. Todos os animais de sangue quente têm aproximadamente a mesma duração de vida – não em termos de anos, mas em termos do número de batimentos cardíacos (cerca de 800 milhões). Os seres humanos são a exceção: nós vivemos em média duas a três vezes mais do que os outros mamíferos de nosso tamanho.

Os pesquisadores estão descobrindo que quando algo diminui bastante de tamanho, seja ele um circuito eletrônico, motor, película de óleo lubrificante, um particular metal ou um cristal de cerâmica, ele deixa de ser simplesmente como uma versão em miniatura de seu similar maior, e começa a se comportar de maneira nova e diferente. O metal Paládio, por exemplo, que é normalmente composto de grãos com cerca de 1.000 nanômetros de tamanho, é cinco vezes mais forte quando formado por grãos de 5 nanômetros. Mudança de escala é um assunto imensamente importante quando cada vez mais dispositivos estão sendo miniaturizados.