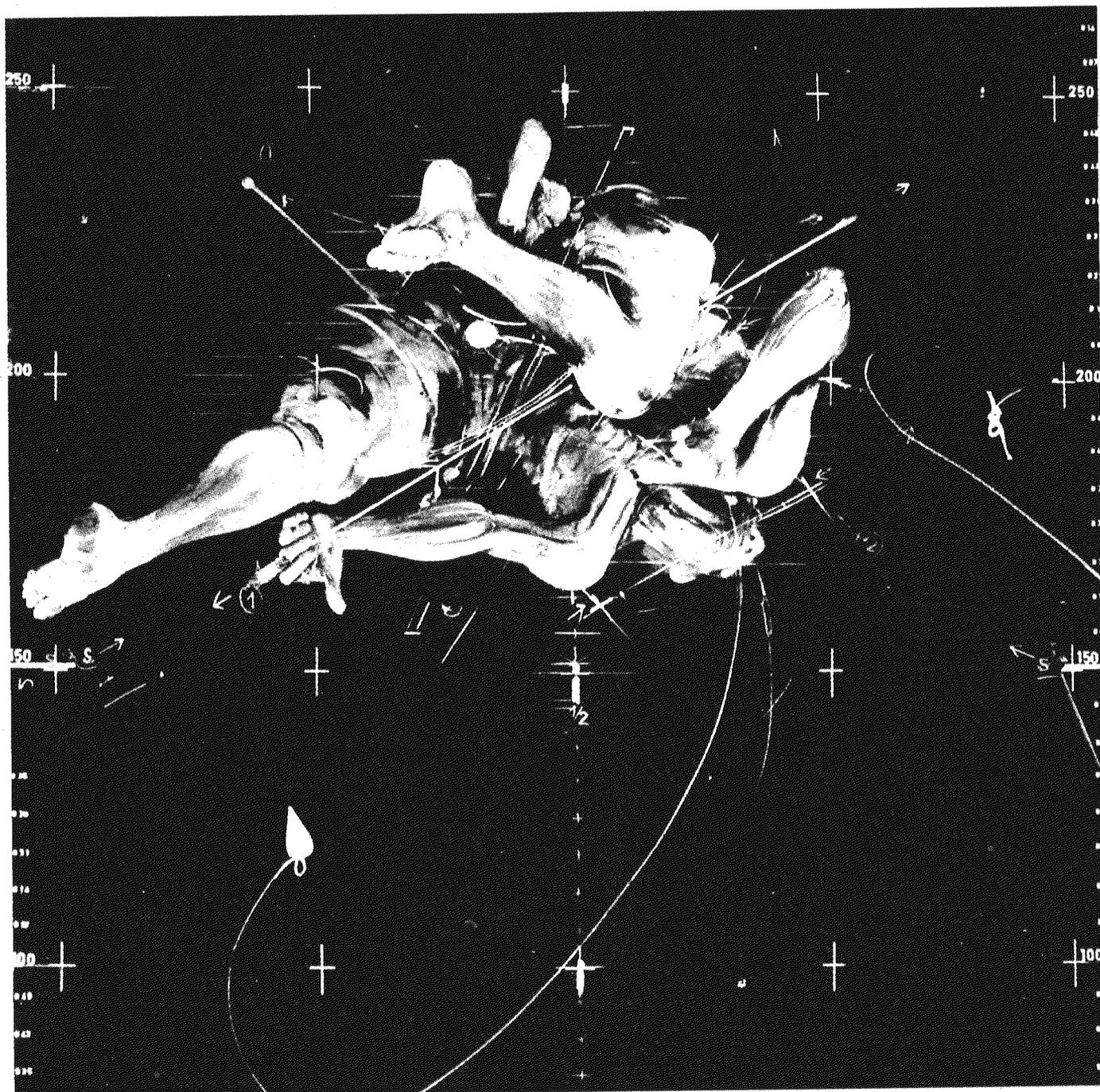


PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA
IFUSP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FAE /PREMEN

11

Conservação de energia

Mecânica



MEC/FAE/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2.º Grau, foi planejado e elaborado pela equipe técnica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) mediante convênios com a FAE e o PREMEN.

Coordenação

Ernst Wolfgang Hamburger
Giorgio Moscati

Mecânica

Antonia Rodrigues
Antonio Geraldo Violin
Diomar da Rocha Santos Bittencourt
Hideya Nakano
Luiz Muryllo Mantovani
Paulo Alves de Lima
Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Elettricidade

Eliseu Gabriel de Pieri
José de Pinto Alves Filho
Judite Fernandes de Almeida

Eletromagnetismo

Jesuína Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Programação Visual

Carlos Egidio Alonso
Carlos Roberto Monteiro de Andrade
Ettore Michele di San Fili Bottini
João Baptista Novelli Júnior

Fotografia e Reproduções

José Augusto Machado Cali
Washington Mazzola Racy

Secretaria e Datilografia

Carlos Eduardo Franco de Siqueira
Janete Vieira Garcia Novo

Linguagem

Claudio Renato Weber Abramo
Maria Nair Moreira Rebello

Construção de Protótipos

José Ferreira
Voanerges do Espírito Santo Brites

Desenho Industrial

Alessandro Ventura

Colaboraram o pessoal da Secretaria, Oficina Gráfica, Administração, Oficina Mecânica e Oficina Eletrônica do IFUSP.

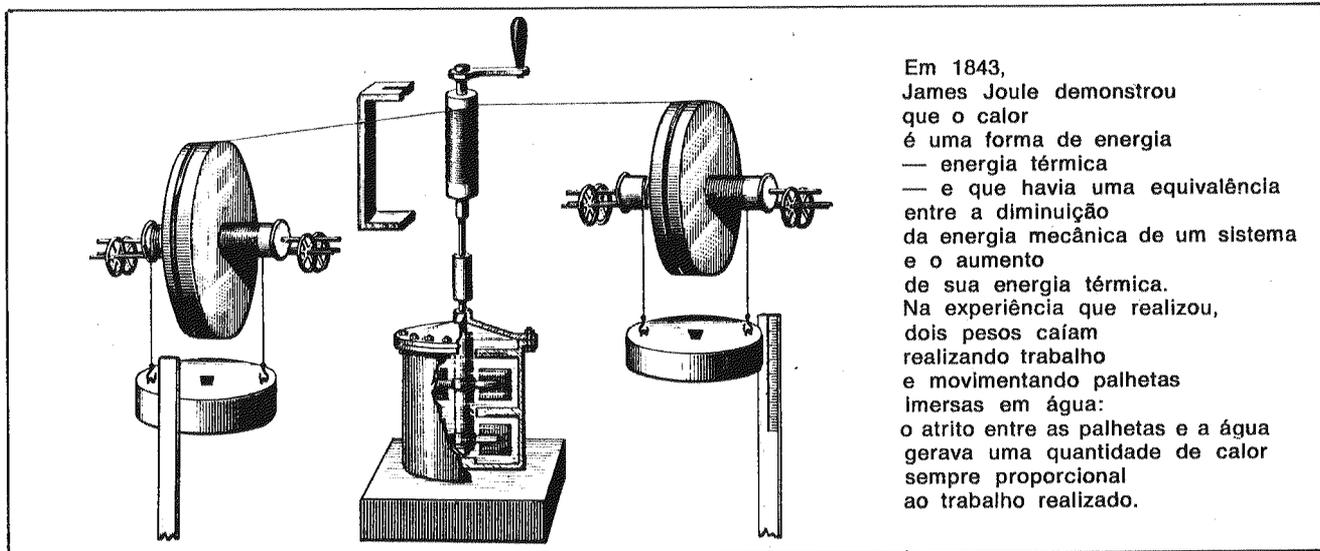
IFUSP: Caixa Postal 8 219, São Paulo — SP

CAPA

As primeiras idéias sobre energia foram formuladas por Gottfried Leibniz (1646-1716), filósofo e matemático nascido em Leipzig. Leibniz acreditava que na natureza a grandeza mv^2 , que ele chamava "vis viva" (força viva), é uma grandeza que se conserva; essa grandeza hoje pode ser identificada como o dobro da energia cinética de um corpo. Segundo Leibniz, um corpo lançado verticalmente para cima possuía "força" (ou seja, energia) em qualquer instante, mesmo no ponto mais alto da trajetória — onde a velocidade é nula —, tanto que, ao cair, a velocidade do corpo aumenta e a "força" se torna novamente evidente como "força viva". Um cálculo simples permitia estabelecer a relação entre a "força viva" de um corpo de massa m que cai com a aceleração g de uma altura h e atinge o solo com velocidade v : $mv^2 = 2mgh$ — resultado que Leibniz chamava de "conservação da força viva", na verdade, uma formulação primitiva da lei de conservação da energia mecânica. Com o conhecimento crescente de leis, como esta, o homem consegue cada vez mais entender e controlar a natureza, e descobrir os limites de suas possibilidades. O detalhe de **Obstáculo**, 1972, de Veličkovic, reproduzido na capa, representa o esforço do homem ao atingir o ápice de um salto; os diagramas, as mediadas mecânicas de espaço e tempo, os cálculos predeterminam a altura a ser atingida, em contraposição ao desejo humano de "atingir o limite".

SUMÁRIO

Conservação de energia	
1. Energia potencial de uma mola	11-2
2. Trabalho e energia potencial	11-4
3. Energia potencial gravitacional	11-6
4. Energia mecânica	11-9
5. Exercícios de aplicação	11-12
6. Energia térmica	11-14
7. Teoria cinética dos gases	11-16
Leitura Suplementar	
O sentido do tempo	11-19



Em 1843, James Joule demonstrou que o calor é uma forma de energia — energia térmica — e que havia uma equivalência entre a diminuição da energia mecânica de um sistema e o aumento de sua energia térmica. Na experiência que realizou, dois pesos caíam realizando trabalho e movimentando palhetas imersas em água: o atrito entre as palhetas e a água gerava uma quantidade de calor sempre proporcional ao trabalho realizado.

Conservação de energia

No início do século passado, a natureza era dividida, por alguns cientistas, em duas grandes categorias: **matéria** — sobre a qual se sabia muita coisa — e **energia** — sobre a qual se sabia muito pouco. Na verdade, nem o próprio termo energia era utilizado: usava-se **força**, não no sentido utilizado na mecânica, mas significando **poder, capacidade**. A palavra **energia** — como é entendida hoje — data de meados do século passado.

No decorrer da História, o progresso das ciências físicas levou à descoberta de diferentes formas de energia: mecânica, térmica, luminosa, elétrica, química, atômica, nuclear etc.

Quando se consideram todas as formas em que ela se apresenta, **a energia total de um sistema isolado*** é constante. Esta é a "lei de conservação de energia", um dos princípios básicos da ciência moderna, enunciada independentemente por Joule, Mayer e Helmholtz, por volta de 1850.

Segundo esse princípio, a energia total do Universo é constante; nos processos que

ocorrem na natureza existe uma grandeza — a energia — que não diminui nem aumenta, sendo apenas transferida de um corpo para outro.

Para ilustrar essa idéia, Richard Feynman, Prêmio Nobel em 1964, afirmou numa aula para seus alunos, estudantes de Física de primeiro ano de faculdade:

"Há um fato, ou, se quisermos, uma lei, chamada lei de conservação de energia, que rege todos os fenômenos conhecidos até o presente. Essa lei não tem nenhuma exceção conhecida — ao que sabemos é exata. Ela afirma que há uma certa grandeza, chamada energia, que não se altera mesmo que a natureza sofra diversas mudanças. Como essa é uma idéia muito abstrata, vamos ilustrar seu significado por uma analogia.

Imagine uma criança, por exemplo, a Mônica, dona de 28 blocos absolutamente indestrutíveis e indivisíveis, todos eles idênticos.

Sua mãe a deixa brincando com os 28 blocos numa sala; no fim do dia, sendo de natureza curiosa, conta os blocos cuidadosamente e descobre uma lei espetacular — independente do que Mônica fez, ela sempre encontra os mesmos 28 blocos.

Entretanto, certo dia são encontrados inicialmente apenas 27 blocos; depois de uma procura rápida o bloco faltante é encontrado embaixo do tapete — ela percebe que deve procurar em todos os lugares para ter certeza que o número de blocos não mudou.

* Entende-se por **sistema isolado** todo sistema que não interage com o exterior; isto é, não sofre forças devidas a corpos externos a ele e não troca matéria nem energia (luz, calor etc.) com o exterior.

Outro dia, parece que o número mudou novamente — há somente 26 blocos. Uma investigação cuidadosa mostra que a janela estava aberta e que os outros dois blocos tinham sido jogados fora.

Um outro dia a contagem indica 30 blocos! Isto causa uma confusão considerável até ela lembrar que Cebolinha veio visitá-los, trazendo os blocos dele, e que deveria ter deixado alguns com Mônica.

Qual a analogia com a conservação de energia?"

Ela consiste em que, como para os blocos, o aumento ou diminuição da energia de um sistema é sempre resultante de trocas com o exterior: se a energia de um sistema diminui, é porque houve perdas para o exterior; se ela aumenta, houve ganho do exterior.

Entretanto, é importante ressaltar que a energia **não** é constituída por "blocos", apresentando-se em diferentes formas: energia gravitacional, energia cinética, energia elástica, energia elétrica, energia nuclear etc. Quando, em **um sistema isolado**, ocorrem transformações de um tipo de energia em outro, é a **energia total** que se conserva e não cada tipo separadamente.

1. Energia potencial de uma mola

Na figura 1 está representada a colisão de **um disco** que se moveu horizontalmente sobre uma mesa lisa e de **uma mola** presa na borda da mesa.

Nesse caso, observa-se que após a colisão o disco readquiriu praticamente a mesma velocidade — e portanto a mesma energia cinética — que possuía antes da colisão; entretanto, **durante a colisão**, a energia cinética do disco diminuiu.*

Em uma dessas experiências, o disco tinha massa de 1,000kg.

* Na realidade, o disco não readquire a energia cinética inicial. Sempre ocorrem transformações, mesmo que pequenas, de energia cinética em energia térmica, sonora e, às vezes, luminosa e elétrica (quando solta uma faísca). Vamos considerar, entretanto, a situação ideal em que não ocorram essas transformações.

A velocidade v do disco e a correspondente variação de comprimento da mola foram anotados na tabela 1.

Q1 — Calcule a energia cinética do disco nos vários instantes e preencha a 3.^a coluna da tabela 1.

Q2 — A energia cinética inicial do disco é igual à final?

Q3 — A energia se conservou nessa experiência?

A energia se conservou nessa experiência, pois ao fim da colisão foi devolvida totalmente ao disco; a mola voltou ao mesmo estado inicial e o disco readquiriu a mesma energia cinética inicial.

Q4 — A energia cinética do disco se conservou **durante** a colisão?

Durante a colisão a energia cinética do disco diminuiu; depois da colisão, voltou ao mesmo valor inicial. Assim, durante a colisão a mola armazenou energia, não em forma de energia cinética, mas em outra forma, a chamada **energia potencial elástica**.

Sempre que uma mola for comprimida (ou distendida) até um determinado ponto, ela possuirá a mesma energia potencial elástica. A energia armazenada em uma mola não depende do modo como ela foi comprimida. Pode-se comprimi-la rápida ou lentamente, ou ainda antes distendê-la e depois comprimi-la; se a deformação final for a mesma, a energia potencial será a mesma. Isso pode ser verificado soltando-a sempre da mesma posição, de forma que ela empurre objetos diferentes; repetindo-se várias vezes a experiência, observa-se que os objetos adquirem sempre a mesma energia cinética.

Q5 — Calcule a energia potencial da mola em cada posição representada na figura 1, ela corresponde à variação de energia cinética do disco. Utilize os dados da tabela 1 e preencha a 4.^a coluna dessa tabela.

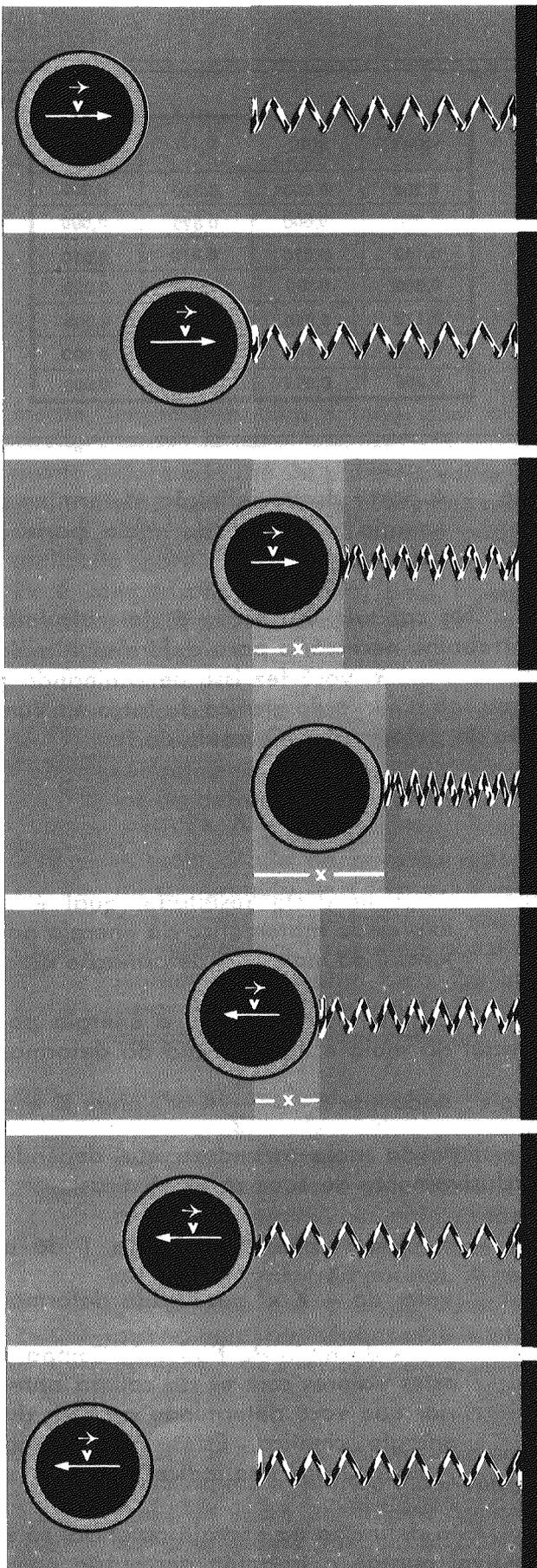


figura 1

$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$	$E_c(\text{J})$	$E_p(\text{J})$	$\frac{1}{2} k x^2$
0,200	0,000			0,000
0,200	0,000			0,000
0,142	0,070			0,010
0,000	0,100			0,020
0,173	0,050			0,005
0,200	0,000			0,000
0,200	0,000			0,000

tabela 1

RESPOSTAS

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R1 — Vide 3ª coluna da tabela ao lado.

R2 — Sim.

R3 — Sim.

R4 — Não.

R5 — Vide 4ª coluna da tabela ao lado.

v(m/s)	x(m)	E _c (J)	E _p (J)
0,200	0,000	0,020	0,000
0,200	0,000	0,020	0,000
0,142	0,070	0,010	0,010
0,000	0,100	0,000	0,020
0,173	0,050	0,015	0,005
0,200	0,000	0,020	0,000
0,200	0,000	0,020	0,000

2. Trabalho e energia potencial

Você obteve os valores da energia potencial da mola para diferentes deformações a partir da análise da figura 1, para isso supôs que a energia total do sistema é constante, isto é, que a soma da energia cinética e da energia potencial é sempre a mesma. Pode-se determinar a expressão matemática da energia potencial da mola lembrando que a diminuição da energia cinética do disco é igual ao trabalho realizado pela mola para freá-lo:

$$\frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_f^2 = T$$

onde T é o trabalho que a mola realiza sobre o disco e v_i e v_f são, respectivamente, as velocidades inicial e final do disco.

Ora, esta diminuição da energia cinética é justamente a energia potencial armazenada, E_p :

$$E_p = \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_f^2$$

Então, a energia potencial da mola é igual ao trabalho realizado sobre a mola para comprimi-la: $E_p = T$.

Vamos adotar esta relação como definição da energia potencial da mola: "Energia potencial da mola em uma certa deformação x é o trabalho realizado sobre a mola para deformá-la desde a posição normal (deformação nula) até a deformação x ."

11-4

Q6 — A partir desta definição, determine a energia potencial da mola para a deformação $x = 0$.

No capítulo 10, seção 6, foi calculado o trabalho necessário para deformar a mola de zero até x ; você fez isso determinando a área sob a curva do gráfico da força em função da deformação. O resultado foi:

$$T = \frac{1}{2} K x^2.$$

Q7 — A partir deste resultado, qual é a expressão matemática da energia potencial da mola com deformação x ?

Você viu, portanto, que a energia potencial da mola é uma função da deformação x , dada por $E_p = \frac{1}{2} K x^2$, onde K é a constante da mola (grandeza que depende exclusivamente de suas características).

Q8 — A última coluna da tabela 1 dá o valor de $\frac{1}{2} K x^2$ para cada deformação x da mola da figura 1. Compare estes valores com os da coluna anterior que você determinou a partir da energia cinética. Estes valores são iguais? O que isso indica?

Esta definição da energia potencial só é possível porque o trabalho necessário para deformar a mola de 0 até x não depende de como fazemos a deformação: se rapida-

mente, lentamente, com a mão, com o pé, com um motor. Mesmo se a mola for inicialmente deformada até $2x$ e depois voltar até x , o trabalho total realizado pela mola ainda será o mesmo. De fato, o trabalho positivo realizado sobre a mola para passar de x até $2x$ é compensado, na volta, pelo trabalho negativo quando a deformação da mola diminui de $2x$ até x .

Q9 — Uma mola de comprimento normal 15cm é comprimida até alcançar um comprimento de 14cm. Qual é o valor da deformação x neste caso?

Q10 — A mola citada na questão anterior foi comprimida de 15cm a 14cm de dois modos diferentes: uma vez rapidamente, em 1 segundo; outra vez lentamente, em uma hora. Em qual caso a energia potencial da mola comprimida até 14cm é maior?

Q11 — A mesma mola é comprimida até 14cm e depois um corpo de massa 0,2kg é encostado a ela. O corpo pode deslizar sobre uma mesa, com atrito desprezível. A mola então é solta, empurrando o corpo ao voltar ao seu comprimento normal. A energia cinética que o corpo adquire é maior, igual ou menor que a energia potencial que estava armazenada na mola?

Q12 — Qual é a energia potencial armazenada na mola quando ela é comprimida de 15cm por 14cm? Suponha que a constante da mola é 100N/m.

Voltemos à experiência representada na figura 1. Na posição de compressão má-

RESPOSTAS

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R6 — Para $x = 0$ vale $E_p = 0$.

$$R7 — E_p = \frac{1}{2} k x^2.$$

R8 — Eles são iguais, o que mostra que a expressão $\frac{1}{2} k x^2$ realmente dá a energia potencial da mola.

$$R9 — x = 15 - 14 = 1\text{cm}.$$

R10 — A energia potencial da mola é a mesma nos dois casos.

R11 — É igual, se não houver perdas de energia devidas ao atrito ou à não elasticidade perfeita da mola. Se houver tais perdas, a energia cinética é menor que a potencial.

$$R12 — \frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} 100 (0,01)^2 = 0,005\text{J}.$$

xima, x_{\max} , o disco está parado: nessa posição toda a energia do sistema disco-mola é po-

tencial, valendo $\frac{1}{2} K x_{\max}^2$. Por outro lado,

antes de o disco tocar a mola, esta não está comprimida e tem energia potencial zero: nesta situação toda a energia do sistema é cinética.

Q13 — Depois que a mola se descomprimiu, empurrando o disco, em que forma está a energia do sistema?

Nos instantes intermediários, o sistema possui simultaneamente energia potencial e energia cinética. A soma das duas é sempre a mesma, e é a energia mecânica total E do sistema:

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} K x^2 = \text{constante}.$$

Q14 — Se o disco tem massa 1,0kg e incide sobre a mola com velocidade inicial 2,0m/s, qual é a energia mecânica total do sistema?

Q15 — No mesmo caso da questão anterior, qual será a compressão máxima (x_{\max}) da mola se a constante K vale 100N/m?

Podemos falar em energia potencial para outros tipos de interação entre corpos.

A expressão matemática da energia potencial é diferente para cada caso, dependendo da força de interação.

Na seção seguinte você estudará a energia potencial associada à força-peso próxima à superfície da Terra.

3. Energia potencial gravitacional

Devido à interação gravitacional existente entre a Terra e os outros corpos podemos falar em **energia potencial gravitacional**. Vejamos então como se define a energia potencial devida ao peso dos corpos, a força com que a Terra os atrai. Nos limitaremos ao caso em que os corpos estão próximos à superfície da Terra, onde seus pesos podem ser considerados constantes, mesmo que as alturas em que se encontram variem.

O movimento de um corpo lançado verticalmente para cima é inicialmente desacelerado; o módulo da velocidade do corpo diminui até se anular no ponto mais alto. Em seguida, o corpo cai acelerado (figura 2).

Q16 — Quanto vale a energia cinética do corpo no ponto mais alto?

Q17 — Como varia a energia cinética do corpo durante o movimento?

A energia cinética não se conserva durante esse movimento. Quando o corpo está em sua mão, ele tem velocidade zero. Depois, a mão executa um trabalho sobre ele, acelerando-o para cima; como consequência, ele adquire energia cinética e se move para cima. À medida que sobe, sua velocidade diminui, e portanto sua energia cinética também diminui, até anular-se no ponto mais alto da trajetória. Em seguida, a velocidade volta a aumentar, mas agora dirigida para baixo, e a energia cinética aumenta novamente.

Q18 — Qual a força responsável pela desaceleração durante a subida? E pela aceleração na descida?

Não há, neste caso, armazenamento de energia em molas que são distendidas ou comprimidas. Entretanto, se o corpo é levado

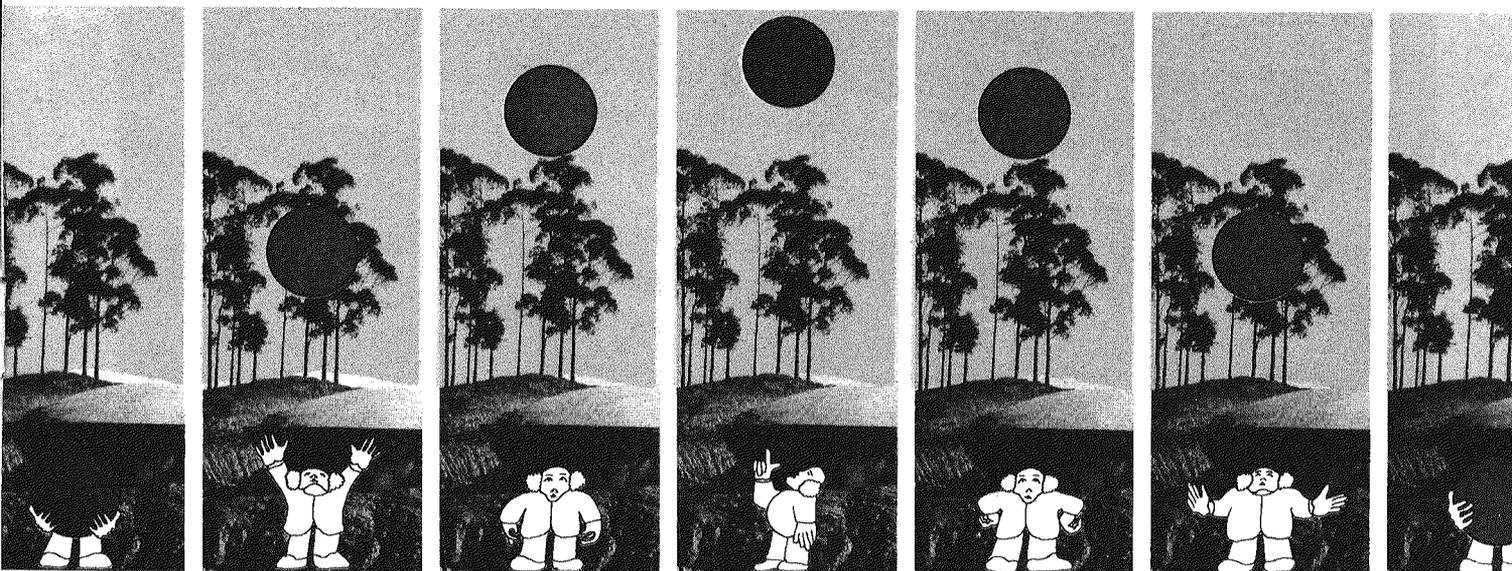


figura 2

para o alto e abandonado, verifica-se que ele adquire energia cinética. É a força-peso que puxa o corpo para baixo, como se entre a Terra e o corpo houvesse uma mola distendida. Há então uma energia potencial que é armazenada quando o corpo é levado para o alto, seja jogando-o, seja levantando-o.

Essa forma de energia é chamada **energia potencial gravitacional**, pois é devida à força de atração gravitacional.

A energia potencial depende da posição de um corpo em relação a outro. No caso de um corpo elevado à altura h , a energia potencial depende dessa altura, e, portanto, depende da posição do corpo em relação à Terra.

Se soltarmos o corpo, sua energia potencial diminui — pois a altura em que se encontra é cada vez menor — e sua energia cinética aumenta. Há uma transformação de energia potencial em cinética. Essa transformação ocorre porque a força de atração gravitacional — o peso do corpo — executa um trabalho ao puxar o corpo para baixo.

Se o corpo cai até o solo, a distância que ele percorre é a altura h e o trabalho realizado pelo peso será: $T = P \times h$ (força \times distância).

Q19 — Qual é o trabalho realizado quando uma moeda de peso 2N cai de uma altura de 3m?

Q20 — Qual é a variação de sua energia cinética?

RESPOSTAS

R₁₃ -

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R₁₈ -

R₁₉ -

R₂₀ -

R13 — Em forma de energia cinética do disco, pois a mola já voltou ao seu comprimento normal.

R14 — A energia total é constante durante o movimento; inicialmente, $E_p = 0$, e portanto

$$E = E_c = \frac{1}{2} mv^2 = 2J.$$

R15 — Na posição de compressão máxima, vale

$$E_c = 0, E_p = E = 2J. \therefore \frac{1}{2} kx_{\max}^2 = 2J \text{ ou } x_{\max} = 0,2m$$

R16 — Zero, pois a velocidade é nula nesse ponto.

R17 — Durante a subida, a energia cinética diminui até anular-se; durante a descida, aumenta.

R18 — A força-peso, nos dois casos.

R19 — $T = P \times h = 2 \times 3 = 6J.$

R20 — $\Delta E_c = T = 6J.$

A energia cinética, que aumenta quando a moeda cai, provém da transformação da energia potencial armazenada no sistema moeda-terra em energia cinética.

Quando o corpo atinge o solo, a energia potencial do sistema é nula, pois a altura é igual a zero. Isto significa que toda a energia potencial foi transformada em energia cinética. Portanto, o trabalho realizado pela força-peso corresponde à energia potencial que o sistema possuía antes de cair. Então,

$$E_p = T = P \times h.$$

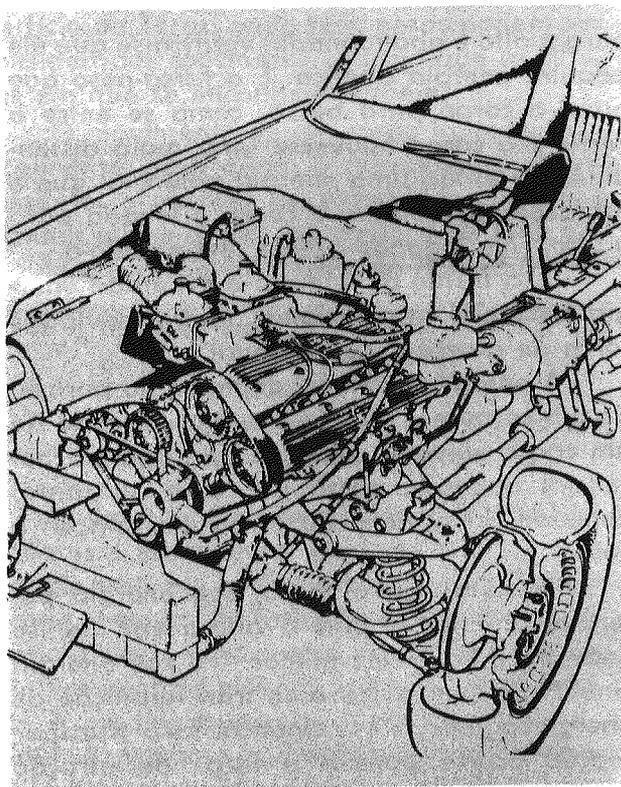
Lembrando que $P = mg$ (peso = massa \times aceleração da gravidade), resulta $E_p = mgh$.

Q21 — Quanto vale a energia potencial de uma moeda de peso 2N colocada a uma altura de 3m?

Ao deduzirmos a fórmula $E_p = P \times h$, consideramos P constante, o que vale apenas para variações de altura não superiores a alguns quilômetros. Para variações de milhares de quilômetros, como no caso de um satélite em órbita, é necessário considerar a variação do peso. Esse assunto será visto no capítulo 12.

Q22 — Qual a energia potencial de um corpo de massa 2kg que se encontra a uma altura de 10 metros? Considere $g = 10m/s^2$.

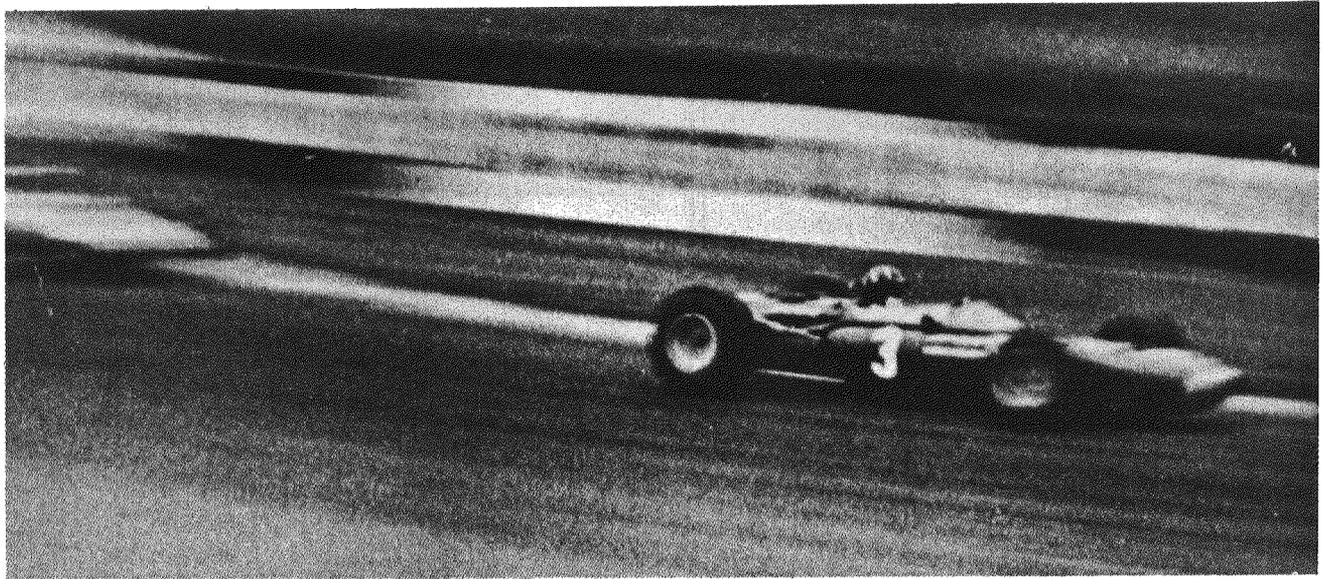
O objetivo da lubrificação de um motor de automóvel é diminuir o atrito entre suas partes móveis e, com isso, evitar desgastes e aquecimentos excessivos. Entretanto, nem sempre o atrito é indesejável e precisa ser eliminado. O próprio automóvel, para se movimentar e breicar, necessita que haja atrito entre suas rodas e o chão.



Q23 — Se abandonarmos este corpo, qual será o trabalho realizado pela força-peso durante a queda?

Q24 — Qual é a energia potencial do corpo quando ele passa pela altura de 4 metros?

Q25 — Qual é a variação da energia potencial do sistema enquanto o corpo passa da altura de 10 metros para a de 4 metros?



4. Energia mecânica

Costuma-se chamar de **energia mecânica** de um corpo a soma de sua energia cinética com sua energia potencial (a energia potencial pode ser elástica, como para uma mola, ou gravitacional, como de um satélite).

Se um sistema for isolado, sua energia total se conserva. Se, além de ser isolado, não ocorre transformação de energia mecânica em outras formas de energia, então a energia mecânica do sistema se conserva, permanecendo constante. A rigor isto nunca acontece para sistemas macroscópicos: sempre há perdas de energia mecânica por transformação em energia térmica. Nesse caso, o que é constante é a soma das energias mecânica e térmica. O principal processo de transformação de energia mecânica em térmica no movimento dos corpos é o **atrito**.

Verifique que o movimento com o atrito aquece os corpos. Envolve um lápis com um pedaço de papel, segure-o bem apertado com apenas dois dedos e desloque o lápis para a frente e para trás, esfregando-o no papel.

Q26 — O aumento da temperatura do papel é facilmente notado?

RESPOSTAS

R₂₁ -

R₂₂ -

R₂₃ -

R₂₄ -

R₂₅ -

R₂₆ -

R21 — 6J.

R22 — 200 joules.

R23 — 200 joules.

R24 — 80 joules.

R25 — 120 joules.

R26 — Sim.

Nessa experiência, a energia que você despendeu para movimentar o lápis foi transferida aos átomos do papel e do lápis, que assim se aqueceram.

Q27 — A energia cinética de um corpo pode ser transformada em energia térmica?

Às vezes, os efeitos do atrito são pequenos e podem ser desprezados; então há conservação de energia mecânica. Por exemplo, no movimento de uma pedra jogada para cima pode-se, em primeira aproximação, desprezar a resistência do ar, que é uma forma de atrito. A conservação da energia fornece então um modo fácil de calcular a velocidade da pedra em qualquer posição.

Q28 — Um tijolo de massa 1,0kg cai a partir do repouso de uma altura de 4m. Qual é sua velocidade ao atingir o solo? Considere $g = 10\text{m/s}^2$.

Q29 — O mesmo tijolo é atirado verticalmente para cima com velocidade inicial 5m/s. Qual é sua velocidade depois de ter subido 1m?

Q30 — Que altura máxima atingirá o tijolo citado na questão anterior?

O movimento de um tijolo lançado para cima é rápido demais para ser facilmente observável. Você pode observar um movimento semelhante na sua calha, lançando a bolinha de baixo para cima. A bolinha

RESPOSTAS

R₂₇ -

R₂₈ -

R₂₉ -

R₃₀ -

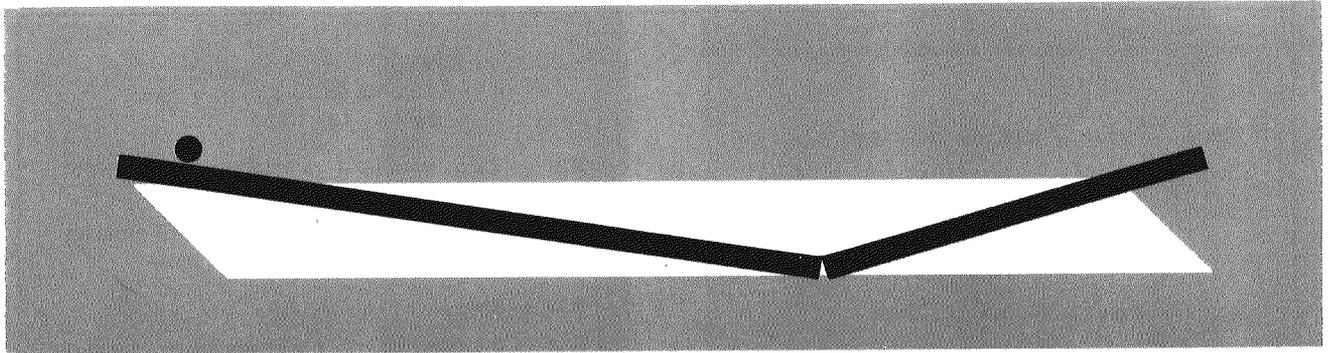


figura 3

sobe, chega até uma altura máxima na calha e desce de novo.

Q31 — Qual é a energia cinética no ponto mais alto que a bolinha atinge na calha?

Q32 — Onde a energia potencial é máxima e onde é mínima?

Há outra experiência interessante que pode ser feita com a calha. Retire o pino da extremidade da parte mais longa da calha e incline também essa parte. As duas partes da pista formam agora uma letra V, como mostra a figura 3.

Solte agora a bola de uma extremidade da pista e observe o seu movimento. Ela desce por uma pista e sobe pela outra, depois inverte o movimento, voltando quase até o ponto inicial.

Q33 — Se não houvesse nenhum atrito, a bola voltaria exatamente até a sua posição inicial?

A bola não volta à altura inicial porque perde energia mecânica por atrito durante o movimento. Quando pista e bola estão bem lisos e limpos, a perda de energia por atrito é pequena, e a bola continua em movimento, indo e voltando na pista, com amplitude lentamente decrescente, durante vários minutos.

Q34 — Descreva a variação da energia potencial e da energia cinética durante uma ida e volta da bola na pista.

RESPOSTAS

R₃₁ -

R₃₂ -

R₃₃ -

R₃₄ -

R27 — Sim.

$$\begin{aligned} \text{R28} \quad & \frac{1}{2} mv^2 = mgh \text{ ou } v^2 = 2gh = \\ & = 2 \times 10 \times 4 = 80(\text{m/s})^2 \text{ ou } v = \\ & \sqrt{80} \cong 9\text{m/s. Note que a resposta não} \\ & \text{depende da massa do tijolo.} \end{aligned}$$

$$\text{R29} \quad \frac{1}{2} mv_i^2 - \frac{1}{2} mv_f^2 = mgh;$$

$$\frac{1}{2} v_i^2 = \frac{1}{2} v_f^2 + gh$$

$$v_f^2 = v_i^2 - 2gh = 25 - 2 \times 10 \times 1 =$$

$$= 5\text{m}^2/\text{s}^2; v_f = \sqrt{5} = 2,2\text{m/s.}$$

$$\text{R30} \quad \frac{1}{2} mv_i^2 = mgh$$

$$h = \frac{v_i^2}{2gh} = \frac{25}{2 \times 10 \times 1} = 1,25\text{m.}$$

R31 — Zero, porque a velocidade é nula neste ponto.

R32 — E_p é máxima no ponto de altura máxima e E_c é mínima no ponto mais baixo.

R33 — Sim.

R34 — Inicialmente, no ponto mais alto, a energia cinética é nula e a energia potencial mgh é máxima. À medida que a bola desce, perde energia potencial e ganha energia cinética, até atingir o ponto mais baixo, onde a energia potencial é nula e a cinética, máxima. Quando a bola sobe no outro lado da pista, sua energia cinética diminui e sua energia potencial aumenta até o ponto mais alto. Se as perdas por atrito forem pequenas, a altura atingida h é igual à inicial; note que o importante para a energia potencial é a altura vertical h , e não o comprimento percorrido ao longo da pista. Na volta, o movimento é semelhante.

5. Exercícios de aplicação

E1 — Uma mola de constante $K = 10,0\text{N/m}$ foi distendida de $0,3\text{m}$.

- Qual é o valor máximo da força aplicada?
- Qual é o trabalho realizado?
- Qual é a energia potencial da mola?

E2 — Uma mola de constante 10N/m , comprimida inicialmente de 3cm , empurra um corpo de massa 10g sobre uma mesa lisa. Quais são a energia cinética e a velocidade final adquiridas pelo corpo?

E3 — Uma mola de 10cm de comprimento foi comprimida de 4cm . Ao ser solta, empurrou um disco de massa $0,10\text{kg}$, que atingiu a velocidade de $2,0\text{m/s}$. Qual é a constante K da mola?

E4 — Uma mola de constante 50N/m acelera um corpo de massa 100g . Num determinado instante, a velocidade do corpo era de 2m/s e a compressão da mola de 20cm .

a) Qual é a energia cinética final adquirida pelo corpo?

b) Qual foi a compressão máxima da mola?

E5 — Um bloco é abandonado em um plano inclinado como indica a figura 4 e nele desliza sem atrito. Determinar a velocidade com que o bloco atinge a parte horizontal.

E6 — Um pêndulo de massa 10g é empurrado, adquirindo uma energia cinética de $0,10\text{J}$ no ponto mais baixo de sua trajetória. Determine a altura máxima que o pêndulo atinge (figura 5).

E7 — Uma pedra de peso 100N é lançada verticalmente para cima, com uma energia cinética inicial de 400J . Determinar a altura que ela atinge.

E8 — Uma lâmpada, cuja massa é $0,1\text{kg}$, cai do alto de um prédio; após 25m de queda ela atinge a velocidade de 20m/s . Qual foi a perda de energia mecânica, devida ao atrito com o ar?

E9 — Compare o trabalho realizado para erguer um objeto de $6,0\text{kg}$ à altura

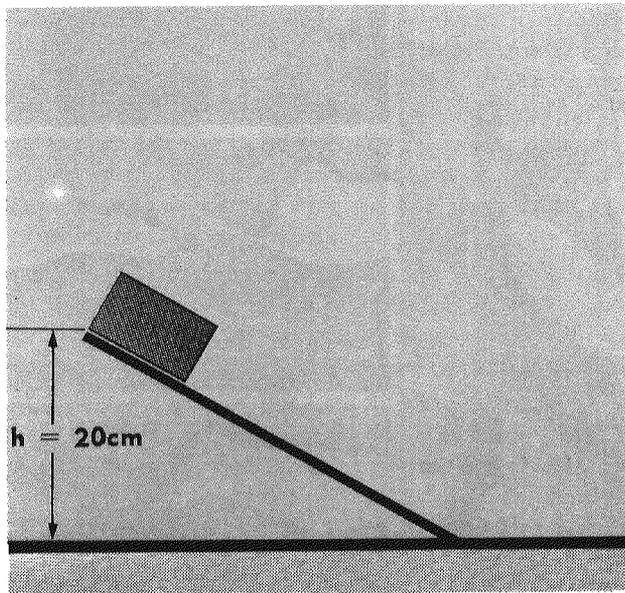


figura 4

de 20m com a energia cinética adquirida pelo mesmo corpo, quando ele chega ao solo depois de cair da mesma altura a partir do repouso.

E10 — Um corpo de massa m é abandonado de um ponto **A**, a uma altura h acima do solo, e cai verticalmente. Despreze a resistência do ar.

- Qual será sua energia potencial ao passar por **B**, cuja altura é $h/4$? E sua energia cinética nesse ponto?
- Qual é a energia mecânica total do corpo durante o movimento?

E11 — Um foguete destinado a realizar medidas meteorológicas (temperatura, pressão e umidade do ar a várias altitudes) move-se verticalmente para cima. Seu motor funciona até ele atingir uma altura de 50km quando então possui uma velocidade de 3 600 m/s. Depois disso, ele continua subindo sob ação da gravidade que o freia até que pare. Suponha desprezível a resistência do ar. Utilize o conceito de conservação da energia mecânica para determinar a altura máxima que o foguete vai alcançar.

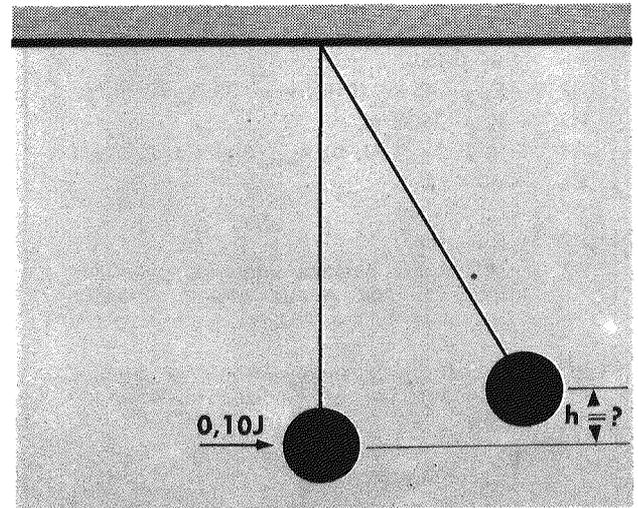


figura 5

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁ - a)

b)

c)

R₂ -

R₃ -

R₄ - a)

b)

R₅ -

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

R₁₀ - a)

b)

c)

R₁₁ -

R1 — a) $F_{\max} = 3,0\text{N}$; b) $T = 0,45\text{J}$; c) $E_p = 0,45\text{J}$.

R2 — $E_c = 45 \times 10^{-4}\text{J}$; $v = 93 \times 10^{-2}\text{m/s}$.

R3 — $K = 250\text{N/m}$.

R4 — a) $E_c = 1,2\text{J}$; b) x_{\max} é cerca de 22cm.

R5 — $v = 2\text{m/s}$.

R6 — $h = 1,0\text{m}$.

R7 — $h = 4\text{m}$.

R8 — A energia cinética adquirida pela lâmpada foi 20J. A sua energia potencial inicialmente era 25J, portanto a perda foi de 5J.

R9 — Trabalho realizado = energia cinética adquirida (se resistência do ar desprezível).

R10 — a) $E_p = 1/4mgh$, $E_c = 3/4mgh$; b) $E = mgh$.

R11 — Depois de desligado o motor, a energia mecânica $E_p + E_c$ é constante. A 50km vale $E_p = 0$ e $E_c = \frac{1}{2}mv_0^2$, na altura máxima h vale $E_p = mgh$ e $E_c = 0$.

Segue $h = \frac{v_0^2}{2g} = 648 \cdot 10^3$, altura total $(648+50) \times 10^3$ metros.

6. Energia térmica

Cinco séculos antes da era cristã, alguns filósofos gregos — Demócrito, Leucipo e outros —, preocupados em entender a natureza, formularam a hipótese de que a matéria é eterna — não podendo ser criada do nada, nem ser transformada em nada — e formada de minúsculas partículas indivisíveis chamadas átomos, separadas pelo espaço vazio.

A idéia de átomo — que significa indivisível em grego — permaneceu até o século 18 apenas como uma hipótese filosófica; as primeiras demonstrações experimentais da existência real dos átomos ocorreram no início do século 19 com as experiências de John Dalton sobre a combinação de elementos em proporções definidas de massa e de Gay-Lussac sobre combinação de gases em proporções definidas de volume.

Hoje sabe-se que o átomo pode ser subdividido em partículas menores, **prótons, nêutrons e elétrons**, e que átomos de um elemento podem, por meio de reações nucleares, ser transformados em átomos de outro elemento. Toda matéria é formada de átomos e cada elemento químico é constituído de átomos idênticos. Os átomos podem se agrupar, formando moléculas — que podem ter de alguns até milhares de átomos — ou conjuntos maiores, como os cristais. Os átomos não estão em repouso. Nos gases e líquidos movem-se incessantemente, descrevendo trajetó-

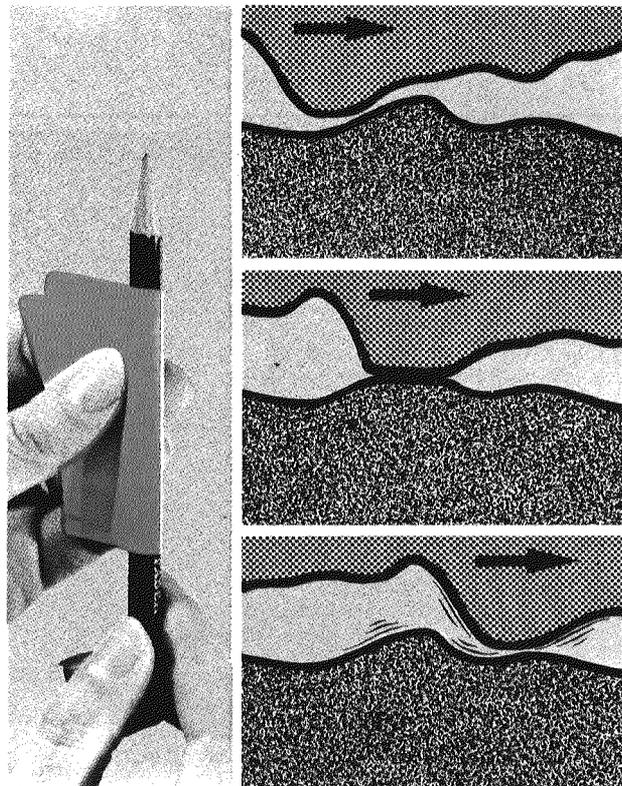


figura 6

rias irregulares e complicadas; mesmo nos corpos sólidos estão em permanente e desordenado movimento de vibração. A **energia térmica** de um corpo é a energia cinética do movimento desordenado de seus átomos ou moléculas.

Quando há transferência de energia térmica de um corpo para outro, isto é, quando há troca de calor entre os corpos, os átomos do corpo que se aquece passam a se mover mais rapidamente, ao passo que os átomos do corpo que esfria se movem mais lentamente, com menor energia cinética.

A **temperatura** de um corpo depende da energia cinética do movimento desordenado dos átomos do corpo. Se a temperatura do corpo subiu, é porque os seus átomos estão se movendo com maior energia cinética.

Q35 — Uma panela de água é aquecida, isto é, recebe energia térmica. O que você pode concluir sobre o movimento das moléculas de água?

Q36 — Duas panelas contêm água. Na primeira as moléculas têm energia cinética maior do que na segunda. Qual temperatura maior?

Considere uma panela com água, em cima da pia. Apesar de a água como um todo estar parada e não ter energia cinética, os seus átomos estão em movimento desordenado e incessante e têm energia cinética, cujo total dá a energia térmica da água. Podemos agora deslocar a panela, por exemplo, levando-a da pia ao fogão. Durante o movimento macroscópico da panela, cada um dos átomos da água tem, sobreposto ao seu movimento desordenado, um movimento ordenado.

À energia do movimento ao acaso (energia térmica) sobrepõe-se a energia cinética macroscópica da água como um todo. Note que a energia cinética macroscópica não é energia térmica e não corresponde a um aumento de temperatura.

Entretanto, pode haver transformação de energia cinética macroscópica em energia térmica: o processo mais comum em que se dá esta transformação é o **atrito**.

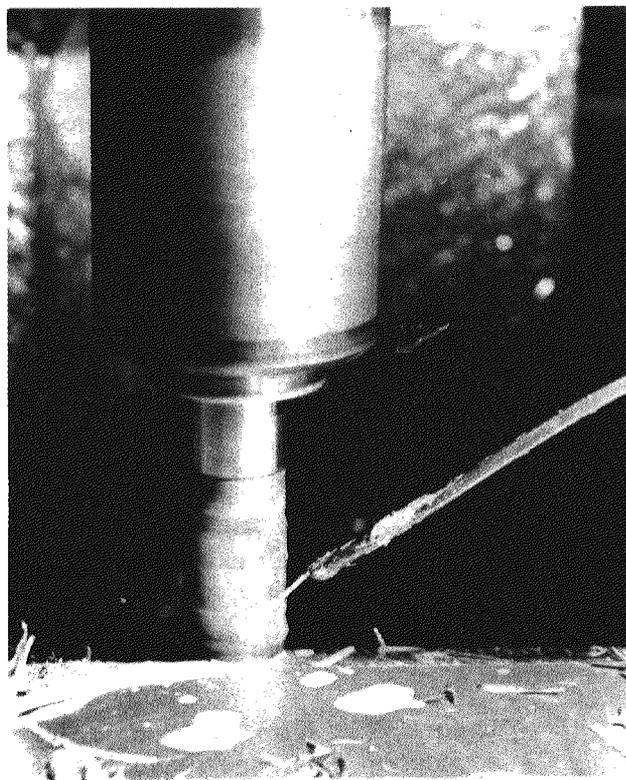
Considere a experiência de atritar o papel e o lápis descrita na página 9. Todas as superfícies, mesmo as mais lisas, são, em nível microscópico, muito irregulares, apresentando pontas, buracos e ondulações.

Quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra, as saliências e depressões de uma tendem a se enganchar nas da outra, provocando o aparecimento de uma força de atrito que se opõe ao movimento. Se uma saliência da superfície do papel encaixa numa depressão da superfície do lápis e depois é arrancada de lá pelo movimento, esta saliência é deformada: a distância entre seus átomos é alterada; por exemplo, a saliência é comprimida e a distância entre os átomos é diminuída. Depois de passar pela depressão, a saliência volta ao seu tamanho normal e os átomos entram em movimento, afastando-se uns dos outros. Este movimento empurra os átomos vizinhos e aos poucos o movimento se transmite a todos os átomos do papel, elevando a temperatura do papel um pouquinho (figura 6).

Processos semelhantes ocorrem em muitos pontos da superfície e é o efeito global de todos eles que aquece o papel e o lápis. O seu dedo sente a elevação da temperatura porque os átomos do papel em movimento vibratório mais intenso batem nos átomos do dedo, fazendo que estes também comecem a se movimentar mais depressa. O conseqüente aumento de temperatura da pele chega até os nervos do dedo e é transmitido ao cérebro.

Quando energia cinética se transforma em energia potencial podemos sempre recuperar a energia cinética fazendo o sistema voltar à posição inicial. Assim, no caso da mola comprimida pelo disco, discutido na seção 1, o disco recupera a energia cinética quando a mola volta ao comprimento inicial. Uma pedra jogada para cima inicialmente perde energia cinética e adquire energia potencial; na queda, esta energia potencial é transformada de volta em cinética. A energia potencial se caracteriza sempre por esta **reversibilidade**.

Os fenômenos de atrito entretanto são sempre **irreversíveis**. O trabalho da força de atrito transforma energia cinética em energia térmica e este processo é irreversível. Na experiência que você realizou, atritando o lápis com o papel, não é possível inverter o processo, fazendo o lápis e o



Somente no século passado foi reconhecido que o calor é devido à energia do movimento desordenado dos átomos, por Joule, Mayer e outros. Antes disso, acreditava-se que existia um fluido especial — o **calórico** — que provocava os fenômenos térmicos. Por exemplo, quando um corpo quente está junto de um corpo frio, passa calórico do quente para o frio, provocando o aumento de temperatura deste. Sempre que a temperatura de um corpo aumentava, acredita-se que ele estava recebendo calórico. Entretanto, a hipótese do calórico não explicava os fatos observados e foi abandonada. Um dos fatos que a teoria do calórico não explicou satisfatoriamente foi o contínuo aquecimento de uma broca ou de outra ferramenta quando fura uma peça. Aclma vemos uma fresa desbastar uma chapa metálica. É necessário resfriar a fresa com um jato de óleo para evitar que estrague. Enquanto a ferramenta se move em contato com a peça, há produção de calor, indefinidamente. Seria necessário supor que a ferramenta estava ligada a um reservatório infinito do fluido calórico. Hoje explicamos facilmente o que ocorre: o trabalho realizado pela força de atrito sobre a peça e sobre a fresa transfere energia cinética aos átomos destes corpos de modo que seus movimentos de vibração aumentam.

RESPOSTAS

R₃₅ -

R₃₆ -

papel produzirem movimento no lápis enquanto se esfriam.

A irreversibilidade é característica de todos os fenômenos térmicos e é devida ao fato de os movimentos térmicos dos átomos serem **desordenados**. A energia térmica está distribuída entre bilhões de átomos do corpo, cada um se movendo ao acaso; cada átomo colide freqüentemente com outros átomos vizinhos, o que provoca uma variação em sua velocidade, tanto em direção como em valor. Entretanto a soma da energia cinética de todos os átomos de um corpo é constante enquanto a sua temperatura for constante. No movimento desordenado dos átomos de um corpo há transferência de energia de um para outro nas colisões, mas não há criação nem destruição de energia; por isso a soma da energia dos átomos de um corpo é constante, a menos que o corpo receba energia de fora: por exemplo, se for atritado com outro corpo. Neste caso, a energia total do movimento desordenado dos átomos do corpo aumenta, acarretando um aumento de sua temperatura.

Q37 — Um prego de ferro aquecido ao rubro é jogado em uma panela com água fria. Explique como se modificam os movimentos dos átomos do ferro e da água.

Q38 — Que transformação de energia há em um movimento em que há atrito?

7. Teoria cinética dos gases

A realidade é muito complexa. Para compreendê-la o homem imagina modelos simplificados que apresentam algumas características da realidade. Partindo da idéia de átomo, os cientistas imaginaram **modelos** teóricos para tentar explicar as propriedades dos sólidos, dos líquidos e dos gases.

O mais simples e o primeiro a ser elaborado foi o dos gases; o sucesso desse modelo, chamado **Teoria Cinética dos Gases**, em prever as propriedades dos gases foi importante para convencer os cientistas do século passado sobre a existência dos átomos. Hoje conhecemos tantos fenômenos que podem ser explicados utilizando o conceito de átomo, que não há dúvidas de sua existência.

A teoria cinética estabelece que:

- 1) Todo gás é composto de partículas chamadas moléculas. Cada molécula pode ser constituída por um só átomo ou por conjuntos de alguns átomos que se atraem muito fortemente, formando uma estrutura rígida e estável.
- 2) O movimento das partículas é desordenado.

3) As leis de Newton são aplicáveis ao movimento dessas partículas.

4) Se as partículas estivessem paradas e agrupadas, teriam um volume que seria uma pequeníssima fração do volume ocupado pelo gás.

5) Exceto durante uma colisão, as forças entre as partículas são de intensidade muito pequena.

6) As colisões entre partículas são elásticas e de curta duração (uma colisão é elástica quando não há diminuição de energia mecânica).

Um gás consiste então de bilhões de moléculas em movimento rápido e incessante, que colidem entre si e com as superfícies dos corpos que estão em contato com o gás, inclusive com as paredes do recipiente.

A **pressão** que o gás exerce em um dado intervalo de tempo sobre as paredes é devida às colisões de moléculas com essas paredes nesse intervalo de tempo. Cada molécula que colide com a parede exerce durante a colisão uma força sobre a mesma. Há bilhões de colisões e o efeito global de todas elas é uma pressão aparentemente constante. Somente quando o gás é muito rarefeito, quando há muito poucas moléculas, é possível observar flutuações na pressão.

Com esse modelo pode-se calcular a pressão exercida pelo gás sobre as paredes. Essa pressão depende da energia cinética das moléculas.

Se um gás for constituído de **N** partículas de massa **m** e velocidade **v**, confinadas em um volume **V**, sua pressão será:

$$P = \frac{1}{3} \frac{mv^2 N}{V}$$

Como $\frac{1}{2} mv^2$ é a energia cinética de cada partícula, isto é,

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2,$$

a pressão de um gás pode ser determinada, também, por:

$$P = \frac{2}{3} E_c \frac{N}{V}$$

Pode-se mostrar que a temperatura de um gás é proporcional à energia cinética **E_c** das partículas do gás.

Observa-se experimentalmente que os gases não muito densos, em temperaturas muito acima da de condensação, obedecem as chamadas "leis dos gases perfeitos":

- 1) a temperatura constante, a pressão **p** de uma certa massa de gás (isto é, a força exercida pelo gás sobre uma parede, por unidade de área da parede) é inversamente proporcional ao seu volume **V** (lei de Boyle-Mariotte);
- 2) a volume constante, a pressão **P** de uma certa massa de gás é proporcional à sua temperatura **T**.

RESPOSTAS

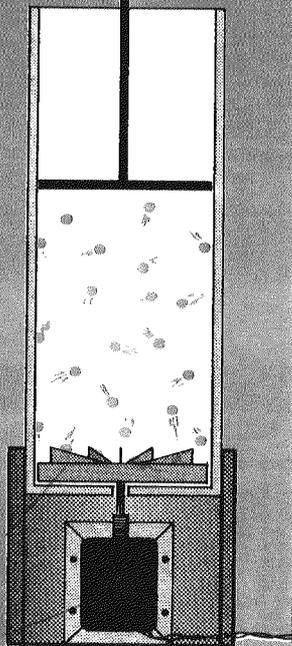
PISTÃO

CILINDRO

Aparelho para simular macroscopicamente a teoria cinética dos gases. As partículas (por exemplo, contas de colar) têm diâmetro de alguns milímetros e recebem energia das palhetas rotatórias impulsionadas pelo motor. Movem-se desordenadamente dentro do cilindro de plástico transparente e forçam a subida do pistão: os sucessivos choques de partículas com o pistão exercem uma pressão sobre o pistão.

PALHETAS

MOTOR



Essas duas leis podem ser resumidas em uma única equação:

$$\frac{PV}{T} = N \cdot k,$$

onde k é a constante de Boltzmann, valendo $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ joules por Kelvin, e T é a temperatura absoluta em Kelvin (antigamente chamado graus Kelvin).

O valor de T é determinado acrescentando-se 273,18 à temperatura medida em graus centígrados. As expressões

$$P = \frac{2}{3} E_c \frac{N}{V} \text{ e } \frac{PV}{T} = Nk$$

podem ser relacionadas, obtendo-se:

$$PV = \frac{2}{3} E_c N = NkT.$$

Assim, a energia cinética de cada partícula do gás vale:

$$E_c = \frac{3}{2} kT.$$

Se o gás for constituído de N partículas, a energia cinética total será:

$$E_{c \text{ total}} = \frac{3}{2} NkT.$$

Segundo a teoria cinética, o aumento de pressão quando o volume diminui é devido ao maior número de colisões que cada molécula tem, por segundo, com as paredes. Por outro lado, o aumento de pressão quando a temperatura aumenta a volume constante é devido ao aumento

R₃₇ -

R₃₈ -

R₃₉ - a)
b)
c)
d)

de velocidade das moléculas, o que aumenta o número de colisões, assim como a força exercida durante cada colisão.

Q39 — Uma molécula-grama de gás oxigênio (32g) possui 6×10^{23} moléculas (o número de Avogadro).

- Se o gás estiver à temperatura de 27°C (isto é, 300 Kelvin), qual a energia cinética total que possui?
- Qual é a energia cinética de cada molécula de oxigênio, em média?
- Qual é a velocidade média de cada molécula a essa temperatura?
- Se a temperatura absoluta duplicar, passando a 600K, o que ocorre com a velocidade média das moléculas de oxigênio?

ENERGIA SOLAR E A TERRA

Reações nucleares no Sol produzem 4×10^{26} joules de energia, por segundo.

Dessa energia, 8×10^{17} J atingem a Terra sob a forma de energia radiante, sendo $5/8$ imediatamente refletidos principalmente pelos oceanos e nuvens. Efetivamente, a Terra recebe 3×10^{17} J, dos quais aproximadamente...

2×10^{17} J evaporam água dos oceanos e rios;	$0,7 \times 10^{17}$ J aquecem os solos;	4×10^{14} J são usados por plantas marinhas na fotossíntese;	5×10^{13} J são usados por plantas terrestres na fotossíntese;	$0,3 \times 10^{17}$ J aquecem o ar, produzindo ventos.
--	--	---	---	---

Antigas plantas verdes — hoje na forma de petróleo, gás e carvão — constituem uma reserva de energia solar de 5×10^{22} J. Por segundo, dessa reserva são utilizados 4×10^{13} J, dos quais...

Grande parte dessa energia é recuperada quando chove, sendo 3×10^{10} J transformados em energia elétrica em hidrelétricas.

... fornecendo 3×10^{11} J por segundo como alimento para o homem e os animais.

3×10^{13} J em aquecimento, nas indústrias e nas casas;	10^{12} J permanecem na matéria-prima de plásticos e produtos químicos;	10^{12} J na geração de energia elétrica em termelétricas;	10^{13} J como combustível de motores a explosão.
--	---	--	---

ENERGIA MECÂNICA
ELETROQUÍMICA
ILUMINAÇÃO
COMUNICAÇÃO

ENERGIA MECÂNICA
ELETROQUÍMICA
ILUMINAÇÃO
COMUNICAÇÃO

R35 — O movimento desordenado das moléculas passa a ter maior energia cinética.

R36 — A primeira.

R37 — Os átomos do ferro rubro estão em violento movimento de vibração em torno de suas posições de equilíbrio antes de o prego ser jogado na água. Na água os átomos da superfície do prego colidem com as moléculas de água, que estão em movimento mais lento. Nas colisões, os átomos do ferro perdem energia para as moléculas da água. Aos poucos, depois de muitas colisões, a energia cinética de vibração dos átomos do ferro diminui e a energia cinética do movimento desordenado das moléculas

de água aumenta, até se atingir uma situação de equilíbrio, em que as temperaturas do prego e da água são iguais.

R38 — Energia cinética do movimento macroscópico é transformada em calor, isto é, em energia cinética do movimento ao acaso dos átomos e moléculas dos corpos entre os quais age o atrito.

R39 — a) $E_{c, total} = 3.726 \text{ J}$.

b) $E_c = 621 \times 10^{-23} \text{ J}$.

c) $V \cong 2 \times 10^{-11} \text{ m/s}$.

d) A velocidade média das moléculas também aumentará, mas não duplicará.

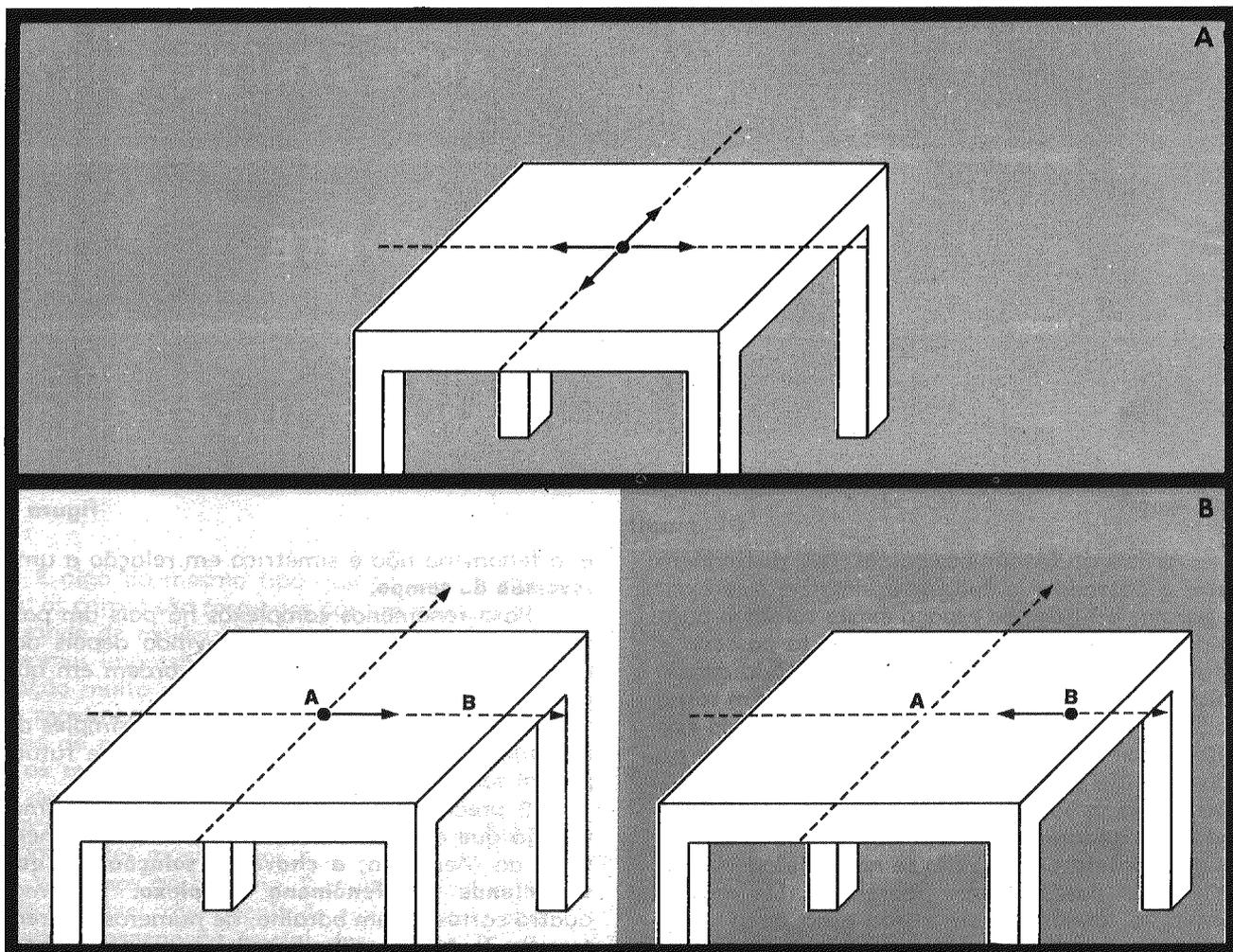


figura 7

Leitura Suplementar

O sentido do tempo

Consideremos uma bolinha de gude colocada exatamente no centro de uma mesa bem lisa; com um piparote, podemos fazer com que esta bolinha se movimente em qualquer sentido sobre a mesa: para a esquerda, para a direita, para a frente ou para trás. Qualquer que seja o sentido escolhido, o mesmo piparote dará origem ao mesmo movimento: todos os sentidos sobre a mesa são iguais (ou equivalentes) do ponto de vista da bolinha. Em outras palavras, para este movimento há simetria em relação aos diferentes sentidos, sobre a mesa (fig. 7a).

Suponhamos agora que a bolinha seja lançada ao longo do eixo dos x , de **A** para **B**, e que é parada quando atinge o ponto **B**. Para lançá-la é necessário aplicar inicialmente um piparote (uma força) na direção **AB**. Quando parada em **B**, se aplicarmos um piparote igual ao primeiro, mas

no sentido de **B** para **A**, a bolinha percorrerá o mesmo caminho **AB**, no sentido contrário: os dois movimentos ocorrem da mesma forma; dizemos que são reversíveis. Basta inverter o sentido da força responsável pelo movimento para que a bolinha percorra o mesmo caminho, mas no sentido contrário: **não existe direção ou sentido privilegiado no espaço** (figura 7b).

Não há dúvida porém de que o tempo para nós avança sempre num mesmo sentido: o passado e o futuro são muito diferentes; o passado é a certeza e o futuro são conjeturas; o que ocorreu ontem não tornará a se repetir jamais da mesma maneira e nada no mundo nos fará voltar ao que éramos há 10 anos.

O tempo e o espaço parecem por isso coisas muito diferentes: para o espaço, em cada direção, existem sempre dois sentidos possíveis (para a frente ou para trás, para cima ou para baixo, para a esquerda ou para a direita), enquanto que o tempo avança sempre no mesmo sentido — para o futuro.

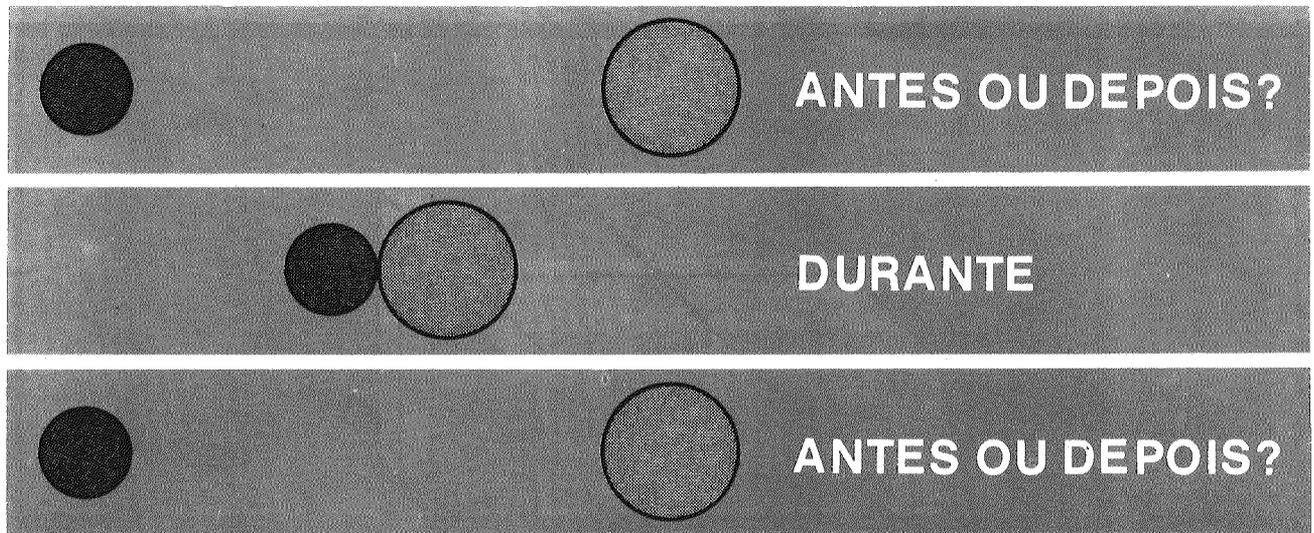


figura 8

As leis da Mecânica, porém, não distinguem entre o passado e o futuro; a simetria que existe para os sentidos do espaço existe também para os dois sentidos possíveis do tempo (o passado e o futuro). Se um habitante de uma estrela conseguisse filmar o movimento dos planetas em torno do Sol e se por engano projetasse o filme do fim para o começo, o movimento que observaria na tela não lhe pareceria nada de extraordinário e obedeceria às leis da Mecânica: os planetas, por exemplo, andariam na tela no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio se na realidade giram no sentido dos ponteiros do relógio. Da mesma forma, se lançarmos um corpo para cima e filmarmos sua subida e depois a descida, e se projetarmos o filme do fim para o começo, isto é, se **invertêssemos** o sentido em que o tempo flui, o movimento que se observaria seria **indistinguível** do real; se mostrarmos duas fotografias de 2 bolinhas colidindo (antes e depois da colisão), seria impossível dizer, olhando para elas, qual foi tirada antes. Para estes movimentos, que são bastante simples, envolvendo poucos corpos, parece haver perfeita simetria entre passado e futuro (figura 8).

A observação de muitos fenômenos **complexos** mostra porém que para eles não existe simetria em relação ao sentido do tempo. Se filmarmos a colisão de dois automóveis e depois mostrarmos o filme do fim para o começo, vendo-os primeiro totalmente amassados e destruídos e depois separando-se lentamente e se tornando perfeitos ao se separarem, qualquer pessoa dirá que isso é um truque fotográfico e que **jamaís** este fenômeno poderá ocorrer: Se mostrarmos 2 fotografias, uma de um ovo inteiro e outra do mesmo ovo partido, qualquer pessoa dirá qual fotografia foi tirada antes (figura 9).

Este é o caso também quando se mistura leite com café; o fenômeno inverso (separação espontânea do leite depois da mistura feita) não ocorre **nunca**. O tempo não corre para trás, isto

é, o fenômeno não é simétrico em relação a uma **inversão do tempo**.

Para fenômenos complexos há pois um passado e um futuro, este último vindo depois daquele e sendo impossível trocar a ordem em que os fenômenos ocorrem.

Este não é o caso dos fenômenos simples da Mecânica, como vimos, em que passado e futuro podem ser alternados.

É preciso procurar a origem desta assimetria, já que ela não se encontra nas leis elementares da Mecânica; **a chave da solução é o que se entende por fenômeno complexo**. Tomemos quatro cartas de um baralho, de números diferentes, 2, 3, 4 e 5, e embaralhemos estas quatro cartas antes de olhar a ordem em que elas aparecem; é fácil verificar que poucas vezes elas aparecerão em ordem crescente (figura 10).

Se embaralharmos agora o baralho todo de 52 cartas, verificaremos que praticamente **nunca** obteremos todas as cartas separadas por naipes e em ordem crescente.

Com um número grande de cartas também é grande o número de ordenações possíveis. É possível colocar as 52 cartas de um baralho em 8×10^{67} (oito seguido de sessenta e sete zeros!) ordens diferentes*. Assim é muito pouco provável que, em uma qualquer embalagem, obtenhamos uma certa ordenação prefixada (a probabilidade de isto ocorrer é de uma parte em 8×10^{67}). Mesmo partindo do baralho todo em ordem crescente, a probabilidade de voltar a esta ordenação quando embaralharmos ao acaso é tão pequena que podemos dizer que isto nunca ocorre.

O fenômeno, embaralhar as cartas e obtê-las em ordem crescente, fica cada vez mais complexo à medida que o número de cartas aumenta.

* O número de ordenações possíveis de 52 cartas é o número de permutações de 52 objetos distintos, que é 52 fatorial (52!) ou aproximadamente 8×10^{67} .

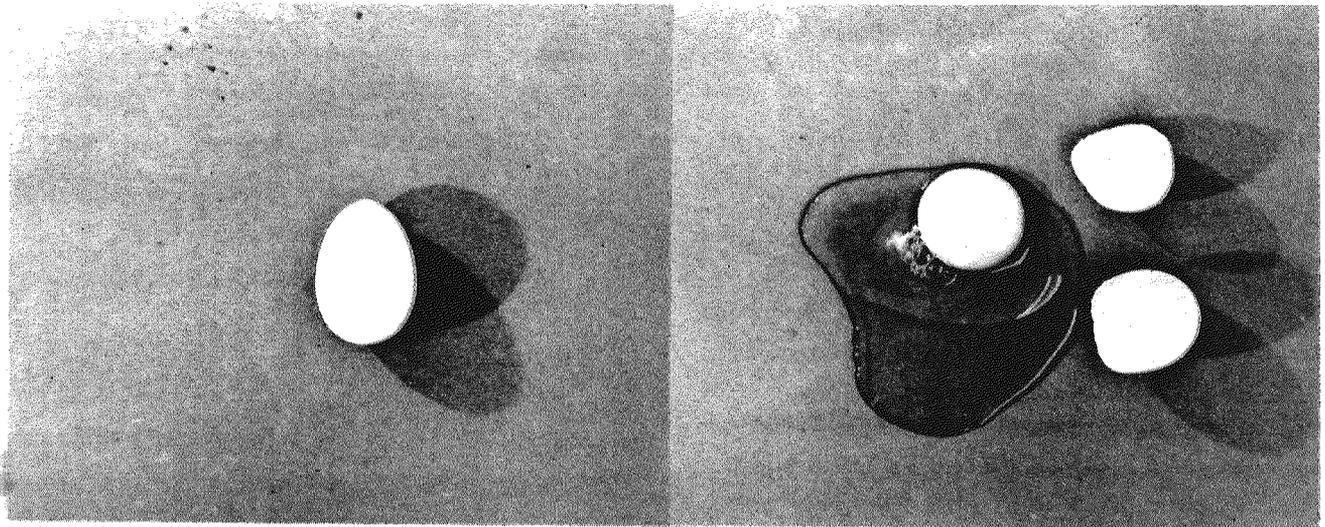


figura 9

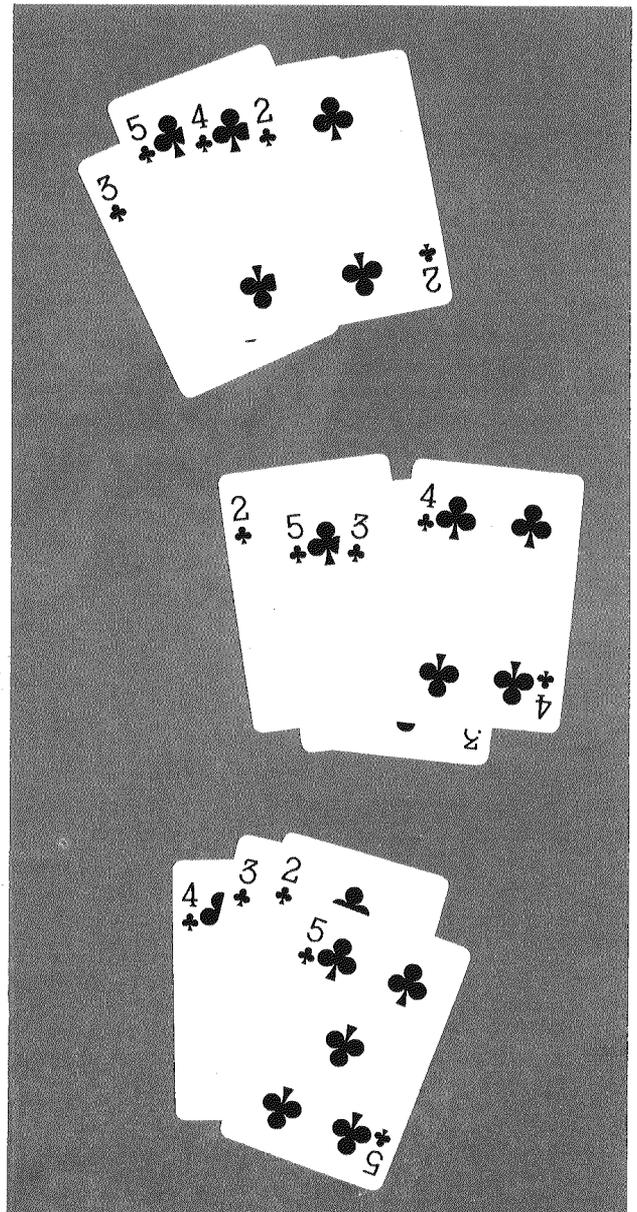
figura 10

É algo do mesmo tipo que ocorre na natureza; os corpos são formados por um número muito grande de moléculas e os fenômenos que consideramos impossíveis de ocorrer exigem uma ordenação muito especial dessas moléculas ou dos seus movimentos: o leite não se separa do café depois de misturado porque isto exigiria que todas as moléculas do leite realizassem um certo tipo de movimento ao mesmo tempo, o que não ocorrerá facilmente havendo tantas possibilidades para estes movimentos.

Voltemos ao baralho. É muito difícil, muito pouco provável, que depois de embaralhado obtenhamos a ordenação inicial das cartas. É mais provável que as cartas estejam fora de ordem, em **desordem**. A seqüência mais provável das cartas é de completa desordem. Pode-se definir uma grandeza matemática que mede a desordem de um sistema complexo qualquer: é a **entropia**. O que dissemos acima se traduz então como uma das leis fundamentais da Física: a segunda lei da termodinâmica ou lei do aumento da entropia.

Para fenômenos complexos, podemos então dizer que existem passado e futuro. O sentido do tempo é o sentido em que a entropia aumenta. Os seres humanos são sistemas físicos complexos em que há troca de energia (trabalho, calor etc.), movimento etc. Para eles existe, portanto, um sentido único de tempo crescente: não há reversibilidade do tempo para os fenômenos de crescimento biológico (vida).

Entretanto, para os fenômenos simples de mecânica, como, por exemplo, a colisão de duas partículas, continua havendo reversibilidade do tempo. Aliás, na teoria da relatividade, o tempo desempenha o papel de uma quarta coordenada, semelhante às três coordenadas espaciais **x**, **y**, **z** necessárias para localizar um ponto no espaço. Os fenômenos elementares entre partículas são reversíveis para as quatro coordenadas, incluindo o tempo.



ISBN 85-222-0161-7

Esta obra foi impressa pela
EDITORA DO BRASIL S/A.
Av. Mal. Humberto de Alencar Castelo Branco, 368
Fone: 913-4141 — Guarulhos — SP
para a
FAE — Fundação de Assistência ao Estudante
Rua Miguel Ângelo, 96 — Maria da Graça
Rio de Janeiro — RJ — República Federativa do Brasil
em 1984.