

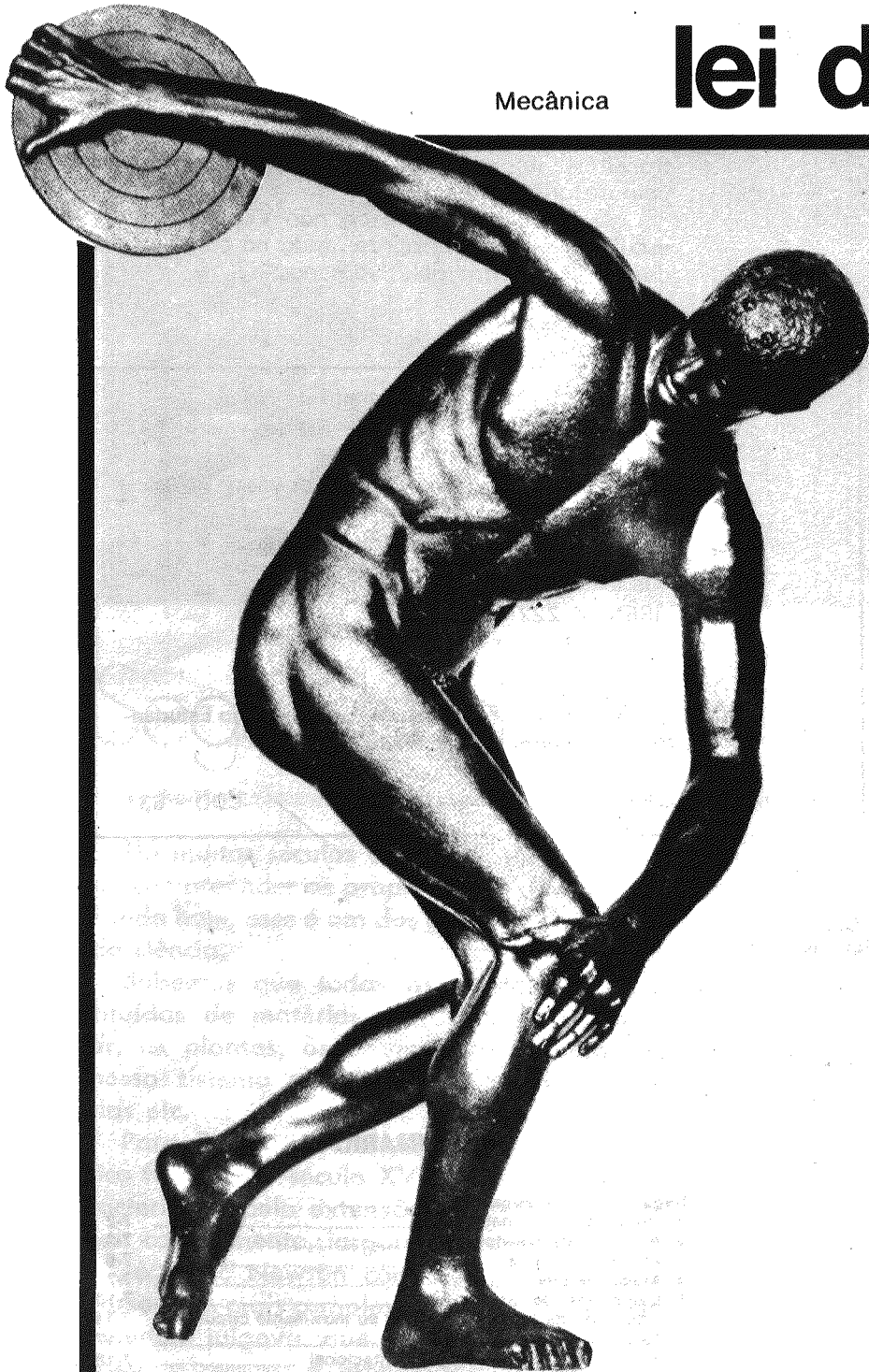
PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA

IFUSP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FAE/PREMEN

7

Segunda lei de Newton

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

Jesuina Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Programação Visual

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

Fotografia e Reproduções

José Augusto Machado Calil
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

O **Discóbolo**: a escultura de Miron aparece no momento em que os artistas da Grécia antiga consideram que nenhuma beleza formal justifica qualquer desrespeito pelas leis das experiências dos sentidos. A representação tem de ser correta; se a correção é contrária à tradição, tanto pior para esta, que tem de ceder.

Miron procura a representação perfeita da vivacidade e espontaneidade, do movimento, do esforço rápido e da atitude cheia de energia; no seu **Discóbolo** representa intencionalmente o momento mais rápido, tenso e concentrado da ação — aquele que precede imediatamente o lançamento do disco —, fixando o que há de transitório no movimento, a impressão produzida pelo instante fugaz.

O **Discóbolo** de Miron não existe mais. A escultura em bronze apresentada na capa é uma das réplicas feitas pelos romanos.

U58m Universidade de São Paulo, Instituto de Física.
5. ed. Mecânica 2 / IFUSP. — 5. ed. — Rio de Janeiro : FAE, 1984.
6 folhetos : il. ; 27 cm. — (Projeto de ensino de física).

Os folhetos são numerados de 7 a 12.
ISBN 85-222-0161-7

1. Mecânica. I. Fundação de Assistência ao Estudante, *Rio de Janeiro*, ed. II. Título.

84-007 MEC/FAE/RJ CDD - 531

SUMÁRIO

Segunda lei de Newton	
1. Unidades de massa	7-2
2. A 2.ª lei de Newton	7-3
3. Massa e inércia	7-6
4. Massa e peso	7-7
5. Exercícios de aplicação	7-10
6. Aplicação da 2.ª lei de Newton ao movimento circular	7-14
7. Peso na Terra e na Lua	7-17
8. Massa inercial e massa gravitacional	7-18
Leitura Suplementar	
Newton e o <i>Principia</i>	7-20



um dos problemas
da ciência:

MATÉRIA

Fotografia ampliada de tecidos humanos.

Segunda lei de Newton

Há muitos séculos o homem tem procurado compreender as propriedades da matéria. Ainda hoje, esse é um dos grandes problemas da ciência.

Sabemos que todas as coisas são constituídas de matéria: as rochas, a água, o ar, as plantas, os animais, os planetas do nosso sistema solar, as estrelas, as bactérias etc.

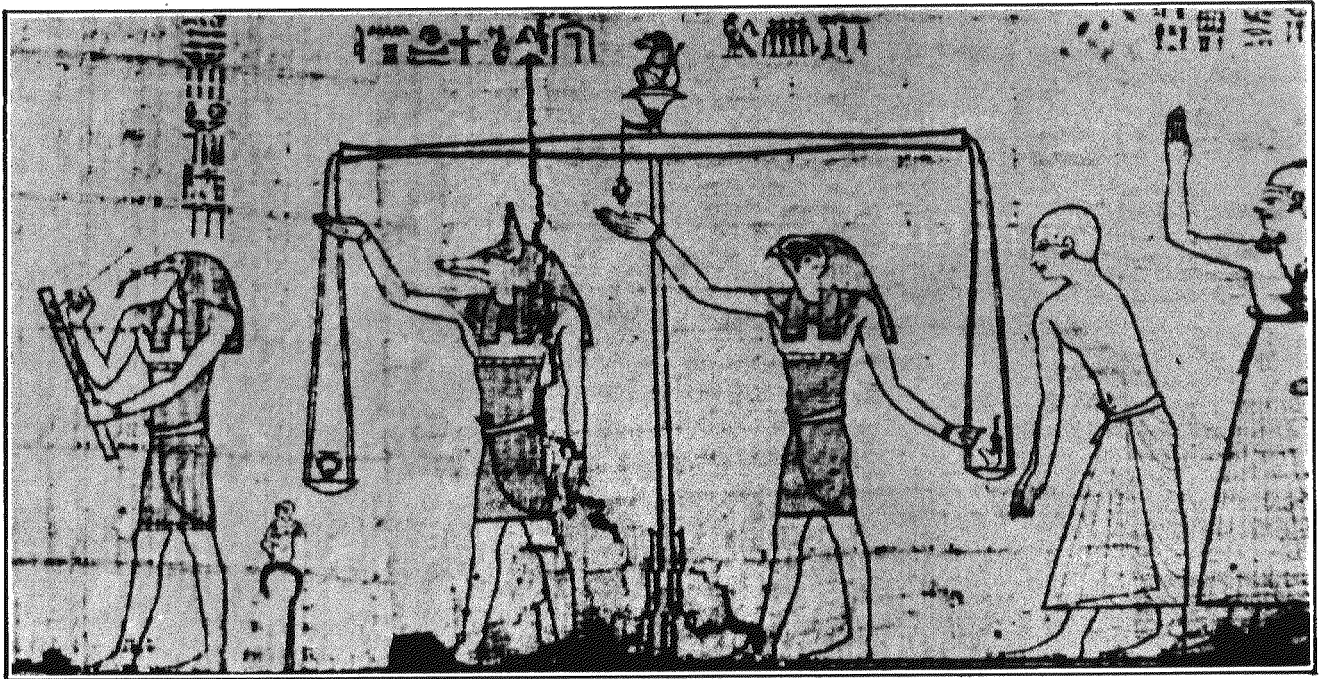
Para René Descartes, filósofo e matemático francês do século XVII, a matéria se caracterizava pela extensão, ou seja, por possuir comprimento, largura e profundidade.

Já Isaac Newton considerava a matéria como algo mais complexo; além da extensão, Newton julgava que outras propriedades, como a massa, a mobilidade, a inércia, a dureza, a impenetrabilidade etc. seriam ne-

cessárias para caracterizar a matéria. Dentre todas essas propriedades, Newton julgava mais importante a massa. De fato, ele dizia que a massa de um corpo é a medida da quantidade de matéria desse corpo.

Contudo, será realmente necessário usar a massa para medir a quantidade de matéria? Não poderíamos utilizar outra grandeza, como por exemplo o volume, para essa medida? Sabemos, inclusive, que a maior parte dos líquidos é vendida por volume; ou seja, mede-se a quantidade de um líquido através de seu volume.

Em muitos casos, porém, o volume não é uma boa medida da quantidade de matéria. Tomemos, por exemplo, o caso de um conjunto de moedas de níquel iguais.



Podemos dizer que cada moeda contém a mesma quantidade de matéria que as outras. Mas, se aquecermos uma delas, ela sofrerá uma certa dilatação, e assim seu volume aumentará. Ora, se a quantidade de matéria é medida pelo volume, deveríamos dizer que a quantidade de matéria aumentou. Entretanto, a quantidade de níquel não variou com o aquecimento. É um caso em que o volume variou sem que a quantidade de matéria tenha variado.

Por outro lado, podemos variar a quantidade de matéria mantendo o volume constante: quando enchamos uma bola de futebol, introduzindo mais e mais ar no seu interior, o volume da bola quase não se altera.

Somos levados, assim, a abandonar a idéia de usar sempre o volume como medida de quantidade de matéria. Que grandeza utilizaremos para esse fim?

Poderíamos utilizar o **peso**? O peso de um corpo é a força com que ele é atraído pela Terra ou por outro astro onde se encontra; esta força depende de onde ele está. Por exemplo, o peso de um homem na Terra é quase seis vezes maior do que o seu peso na Lua, apesar de a quantidade de matéria que ele possui ser a mesma, quer ele esteja na Terra ou na Lua. Portanto, também o peso

não é uma boa medida da quantidade de matéria.

A melhor medida da quantidade de matéria de um corpo é a **massa**, pois não depende do local onde ele está, nem da temperatura, nem da pressão. Para comparar e medir as massas dos corpos podemos utilizar uma balança, que é um instrumento conhecido pelo homem há tempos imemoriais.

1. Unidades de massa

Suponhamos que um joalheiro receba um pedido de cinco anéis iguais ao modelo exposto em sua vitrina. Para medir a quantidade de ouro necessária para fabricar cada anel, ele pode simplesmente colocar o anel-modelo num dos pratos de uma balança de braços iguais, e depois completar o outro prato com ouro em pó até que a balança se equilibre. Quando a balança estiver equilibrada, as quantidades de ouro em cada prato serão iguais.

Q1 — A quantidade de ouro utilizada para fazer 5 anéis é igual a 5 vezes a quantidade de ouro necessária para fazer um anel?

RESPOSTAS

R₁ -

A balança mais antiga que se conhece, descoberta em uma tumba pré-histórica, foi construída 7000 anos atrás no antigo Egito.

A foto ao lado, detalhe do papiro egípcio do século II descoberto em Saqqarah — **O Livro dos Mortos de Djoser** —, representa a **pesagem da alma**, o ritual de julgamento dos mortos pelos deuses.

Q2 — Se o joalheiro equilibrasse a balança com o anel-modelo em um prato e pequenos cilindros de latão no outro,



e, em seguida, equilibrasse outra vez a balança com os mesmos cilindros de latão num prato e ouro em pó no



outro, estaria medindo a quantidade de ouro necessária para fazer um anel?

Dois corpos que se equilibram em uma balança de braços iguais têm a mesma massa, ou seja, a mesma quantidade de matéria.

Para que se possa medir as massas dos corpos, é necessário adotar um **padrão** de

massa; com esse padrão comparamos os corpos cujas massas queremos determinar. O padrão internacional de massa é o cilindro feito de uma liga de platina e irídio, que está guardado no Instituto de Pesos e Medidas, na França; a massa desse cilindro foi arbitrariamente chamada **1 quilograma (1 kg)**, e constitui a unidade de medida de massas.

A massa de um quilograma é igual à massa de 1,000027 litro de água pura (destilada) à temperatura de 4°C e pressão de 760mm de mercúrio (veja a leitura suplementar do capítulo 3 — “Padrões de medida”).

2. A 2.^a lei de Newton

Vejamos agora como se relacionam os conceitos de massa e de força. Suponhamos que um mesmo corpo seja submetido à ação de forças diferentes. Então, existe uma relação de proporcionalidade entre as forças aplicadas e as acelerações adquiridas pelo corpo em cada caso, como vimos no capítulo 6. Portanto, a equação que relaciona a força **F** aplicada ao corpo e a aceleração **a** que ele adquire é $F = k \cdot a$, onde **k** é uma constante de proporcionalidade. Essa constante não de-

pende da força aplicada, pois, para um mesmo corpo, a razão F/a permanece constante, qualquer que seja a força F aplicada a ele.

Entretanto, essa constante depende do corpo. Vejamos como é essa dependência. Experiências como as ilustradas na figura 14 do capítulo 6, em que um carrinho é puxado por forças de intensidades diferentes, mostram que a constante k não depende da forma, da cor, ou de outra propriedade do corpo, mas somente de sua massa.

Vamos verificar como a constante k se relaciona com a massa do corpo aplicando forças de mesma intensidade a um carrinho que rola sem atrito sobre uma superfície horizontal. Carregando-se o carrinho com massas convenientes podemos fazer com que a massa total seja duplicada, triplicada etc.

Na figura 1 temos três fotografias estroboscópicas do movimento desse carro. Em **A** a massa é 280g, em **B** é 560g e em **C** é 840g. Nos três casos a força aplicada ao carro tem a mesma intensidade.

Q3 — Quanto valem as acelerações adquiridas pelo carro nos três casos? Utilize a escala da figura.

Q4 — Qual é a razão entre as acelerações nos casos **A** e **B**? E nos casos **A** e **C**?

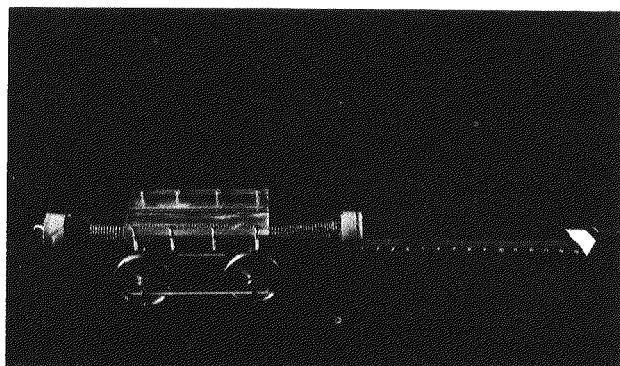
Essa experiência mostra que as acelerações adquiridas pelo carro são inversamente proporcionais às suas massas, pois duplicando-se a massa do carrinho, sua aceleração se reduz à metade; triplicando-se a massa, a aceleração se reduz a $1/3$ e assim por diante.

Embora as acelerações adquiridas pelo carro sejam diferentes, o produto $k \cdot a$ permanece constante, pois a força aplicada, nos três casos, foi de mesma intensidade. Chamando de a_1 , a_2 e a_3 as acelerações nos casos **A**, **B** e **C**, temos que: $k_1 a_1 = k_2 a_2 = k_3 a_3$.

Lembrando que $a_2 = a_1/2$ e $a_3 = a_1/3$, podemos substituir na relação acima e obtemos $k_1 a_1 = k_2 a_1/2 = k_3 a_1/3$, portanto,

$$k_2 = 2k_1 \text{ e } k_3 = 3k_1.$$

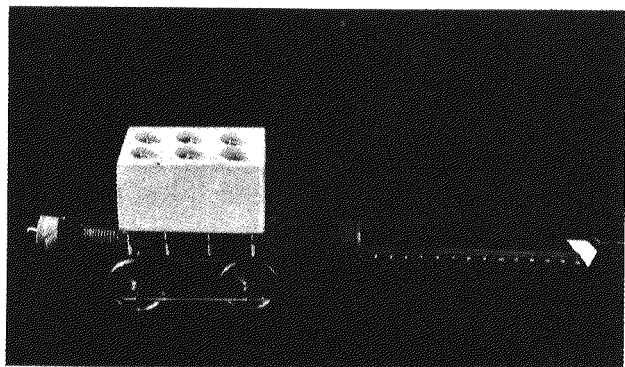
Verificamos, portanto, que a razão entre as constantes do carro nos três casos é igual



Acima, o carrinho utilizado nas experiências mostradas na figura 1.

A massa do conjunto **carrinho + bloco de madeira** (foto abaixo) é o dobro da do carrinho; a massa do conjunto **carrinho + 2 blocos de madeira** é o triplo.

Nas três experiências, as forças aplicadas foram iguais porque as distensões da mola colocada no tubo de vidro — indicadas pela referência de forma triangular sobre a escala milimetrada — foram iguais.



à razão entre suas massas; em outros termos:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{m_1}{m_2} \text{ e } \frac{k_1}{k_3} = \frac{m_1}{m_3}$$

Podemos então dizer que a razão k entre a força e a aceleração de um corpo é proporcional à massa desse corpo. Se escolhermos convenientemente a unidade de força, podemos fazer $k = m$. Assim: $F/a = m$, ou

$$F = ma$$

Esta última expressão é conhecida como a **segunda lei de Newton**. Como ela permite prever o movimento que um corpo vai descrever, é conhecida também como **lei fundamental da dinâmica**. De fato, se conhecermos a posição inicial e a velocidade inicial de um corpo, podemos prever a trajetória que ele descreverá, assim como sua veloci-

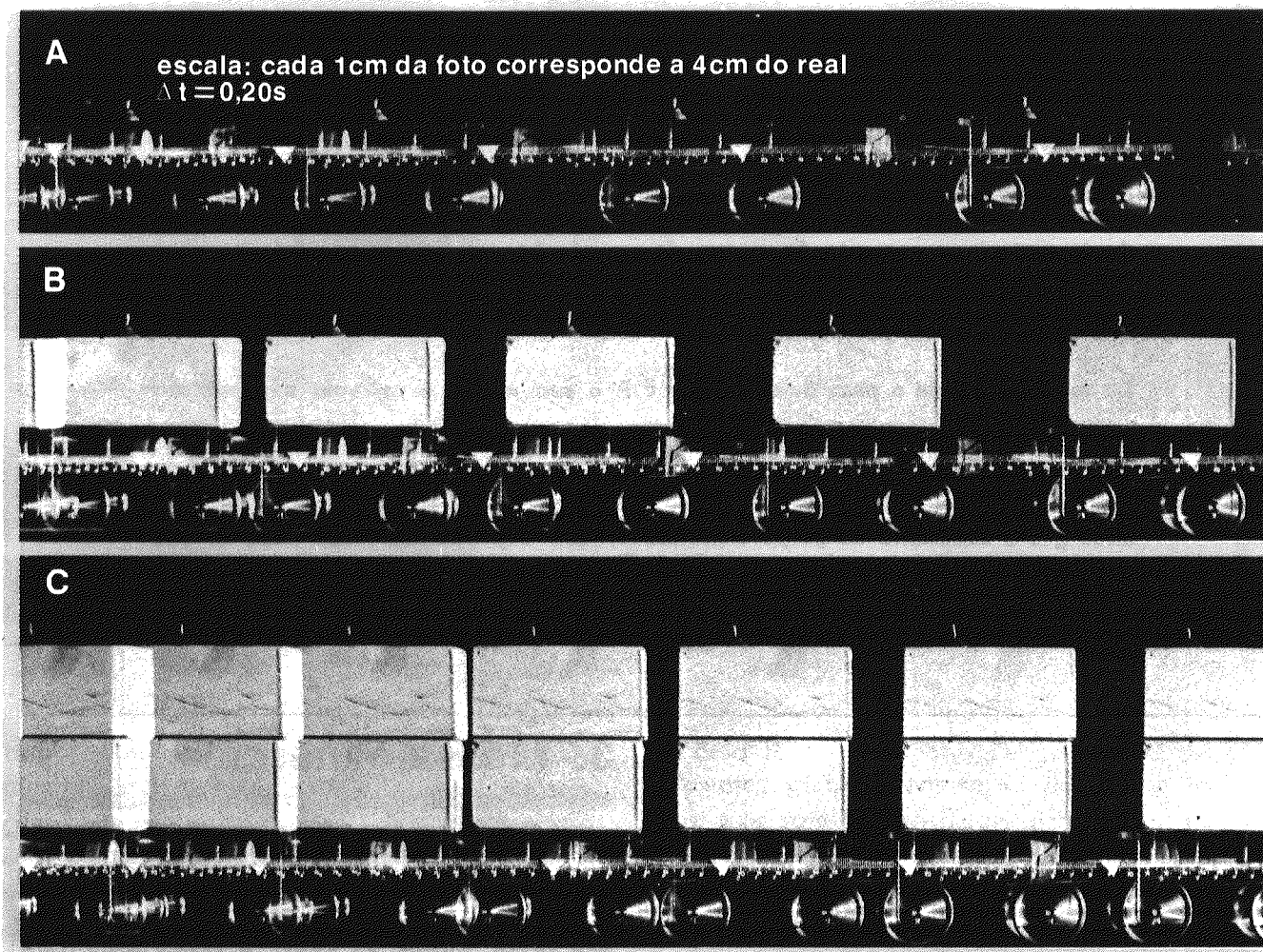


figura 1

dade em cada instante, desde que conheçamos as forças que atuam sobre ele.

Foi fazendo uso dessa lei que pudemos programar um computador eletrônico para obter, ponto por ponto, a trajetória do satélite Kosmos 159 que você desenhou no capítulo 1.

A segunda lei de Newton nos permite definir a **unidade de força**: escolhemos como unidade de força aquela que, aplicada a um corpo de massa igual a 1kg, faz com que esse corpo adquira uma aceleração de 1m/s^2 . Essa unidade é chamada **newton** (abreviada por N).

Q5 — Quantos newtons vale a força que, aplicada a um corpo de 5kg, lhe imprime uma aceleração de 3m/s^2 ?

Q6 — Qual é a massa de um corpo que adquire uma aceleração de 4m/s^2 quando submetido à ação de uma força de 8N?

RESPOSTAS

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -

Uma balança de braços iguais fica equilibrada quando as forças-peso que agem em seus pratos são iguais. Portanto, a balança compara os pesos dos corpos colocados em seus pratos. Mas o peso de um corpo é, em um dado local, proporcional à sua massa. Por exemplo, dois ganchos iguais têm o dobro da quantidade de matéria, e portanto da massa, de um só. Ao mesmo tempo, dois ganchos pesam o dobro de um só, como você viu no capítulo 6, quando pendurou ganchos no dinamômetro. Três ganchos têm três vezes a massa e pesam três vezes mais que um só, e assim por diante.

De modo geral, se o peso de um corpo é P e sua massa é m , vale a expressão

$$P = mg$$

onde g é a constante de proporcionalidade, que depende do local onde se faz a experiência. Próximo da superfície da Terra, o valor de g é aproximadamente $9,8\text{m/s}^2$.

3. Massa e inércia

Segundo a lei da inércia, que vimos no capítulo anterior, a velocidade de um corpo é constante se ele não sofrer ação de nenhuma força. Então, se sobre o corpo agir uma força não equilibrada, sua velocidade variará. Ele adquirirá uma certa aceleração que será tanto menor quanto maior for a sua inércia.

Suponhamos que um corpo de massa m adquira uma aceleração a quando submetido à ação de uma força F .

Q7 — Qual seria a aceleração adquirida por um corpo de massa $2m$, quando submetido à ação da mesma força F ?

Q8 — Qual dos corpos possui maior inércia?

Como a aceleração do segundo corpo foi metade da aceleração adquirida pelo primeiro, concluímos que sua inércia é o dobro da do primeiro.

Existe, portanto, um critério de comparação de inércias, pois, se um corpo tem massa duas vezes maior que outro, sua inércia também será duas vezes maior. Exemplificando, vimos na experiência da seção anterior que o carro em **C**, de massa 3 vezes

R1 — Sim.

R2 — Sim.

R3 — Valem, respectivamente, 70, 35 e 23 cm/s^2 .

R4 — A aceleração adquirida pelo carro **B** é a metade da aceleração adquirida pelo carro **A**: $a_1/a_2 = 2$. Para o caso **A**, a aceleração é aproximadamente o triplo do caso **C**: $a_1/a_3 = 3$.

R5 — $F = ma = 5\text{kg} \times 3\text{m/s}^2 = 15\text{N}$.

R6 — $m = F/a = \frac{8\text{N}}{4\text{m/s}^2} = 2\text{kg}$.

RESPOSTAS

VARIAÇÃO DE g COM A ALTITUDE	
altitude (m)	$g(m/s^2)$
0	9,806
1 000	9,803
4 000	9,794
8 000	9,782
16 000	9,757
32 000	9,708
100 000	9,598

tabela 1

maior que em **A** e submetido à força de mesma intensidade, adquiriu uma aceleração 3 vezes menor que em **A**. Podemos então concluir que a inércia do carro em **C** foi 3 vezes maior que em **A**. **Dessa forma, a massa de um corpo, além de ser uma medida de sua quantidade de matéria, é também medida de sua inércia.**

4. Massa e peso

Newton descobriu que todo corpo exerce uma força de atração, chamada **atração gravitacional**, sobre os corpos que o rodeiam. Essa força tem, em geral, intensidade muito pequena, e passa despercebida: não conseguimos detectar nenhuma força de atração entre, por exemplo, uma cadeira e uma caneta. Entretanto, nas vizinhanças de corpos de massa muito grande, como a Terra, o Sol e os astros em geral, a força se manifesta de maneira muito sensível.

Uma característica importante desse tipo de força é que sua intensidade diminui com a distância; assim, ela se torna praticamente nula, quando a distância entre os dois corpos em questão se torna muito grande.

R₇ -

R₈ -

R₉ -

Essa força é responsável pelo fato de os planetas girarem em torno do Sol, e de a Lua e os satélites artificiais girarem em torno da Terra; é ela também a responsável pela tendência que os corpos apresentam de cair na superfície do astro do qual estão mais próximos.

Um corpo na superfície de um astro está sujeito a uma força de atração gravitacional, que podemos medir suspendendo-o em uma mola calibrada (isto é, um dinamômetro). Essa força é chamada força-peso, ou simplesmente **peso** do corpo.

Q9 - O que é peso de um corpo?

A força-peso depende da massa do corpo que é atraído, da massa do astro que o atrai, e da distância do corpo ao centro desse astro. Mesmo na superfície da Terra o peso de um corpo varia ligeiramente de lugar para lugar. Por exemplo, um relógio que pesa 1,000N em São Paulo pesará 1,003N em Paris e 1,005N nos pólos. Estas variações são devidas principalmente ao movimento de rotação da Terra e, em menor grau, à não-homogeneidade da distribuição da matéria na Terra. Para verificar como a força-peso depende do astro onde o corpo se encontra, devemos me-

O que é a força, kgf ou kg?

Na linguagem diária, freqüentemente dizemos coisas como "o peso de José é 70 kg". No entanto, do ponto de vista da Física, essa frase é errada, pois o quilograma é unidade de massa, não de peso. Deve-se dizer "a massa de José é 70kg".

Existe uma unidade de força que é igual ao peso de uma massa de 1kg em Paris; chama-se quilograma-força, e se representa por kgf ou kg*. Um quilograma-força vale 9,81N.

Contudo, em outros lugares, o peso de uma massa de 1kg não será exatamente 1kgf. Em São Paulo, por exemplo, o peso da massa de 1kg vale 0,997kgf ou 9,78N.

Quando não se exige grande precisão, pode-se dizer que o peso de uma massa de 1kg na superfície da Terra é aproximadamente 1kgf. De quantos kgf será o peso de uma massa de 1kg na Lua?

dir o peso do mesmo corpo na superfície de vários astros.

Hoje é possível medir o peso de um mesmo corpo na superfície da Terra e na superfície da Lua. Verifica-se assim que o peso de um corpo na Lua é 5,8 vezes menor do que na Terra.

Q10 — Um astronauta leva para a Lua um carrinho que pesa 2N na Terra. Quanto pesa esse carrinho quando o astronauta está na Lua? Como poderia ele medir o peso do carrinho na Lua?

O peso de um corpo é portanto uma força que depende do local onde estamos. É medido em unidades de força: newtons ou quilograma-força (a relação entre essas unidades está no quadro acima).

Será que a massa de um corpo também varia quando passamos de um astro para outro? Isso também pode ser verificado medindo-se a massa do corpo nas superfícies da Terra e da Lua.

Entretanto, para isso precisamos de um método de medida de massa que não dependa do peso, pois já sabemos que o peso de um corpo varia conforme o lugar em que é medido.

Podemos medir a massa de um corpo aplicando a ele uma força conhecida e medindo sua aceleração: a massa fica determinada pelo quociente $m = F/a$.

Essa experiência pode ser feita em qualquer lugar do espaço, na Terra ou na Lua. Por exemplo, o astronauta pode, na Lua, puxar o carrinho horizontalmente com um dinamômetro, aplicando uma força constante F , e medir a sua aceleração. Ele verificará, assim, que a razão F/a , isto é, a massa do carrinho, é exatamente a mesma na Lua e na Terra.

A massa de um corpo é a medida da quantidade de matéria desse corpo; ela não depende do lugar onde a medida é feita. A massa é uma propriedade que depende somente do corpo.

Dizemos que a massa é uma **propriedade invariante** dos corpos, pois é a mesma na superfície da Terra, da Lua ou em qualquer outro lugar do espaço.

Q11 — O peso de um corpo também é invariante, como a massa?

Q12 — Um astronauta possui um relógio que, na superfície da Terra, tem massa 50g (0,05kg) e peso 0,5N. Quais serão o peso e a massa do relógio quando o astronauta estiver na Lua?



Vendedor de Cestos
— gravura de Debret
(século XIX).

Jean Debret procurou retratar o modo de vida de sua época.

O transporte de mercadorias em um travessão em equilíbrio, como em uma balança, é comum ainda hoje no Nordeste.

Q13 — Responda se cada uma das frases abaixo se refere ao peso ou à massa.

- É a força com que a Terra atrai um corpo.
- Para um certo corpo, é a mesma na Terra, em Marte ou em qualquer lugar do espaço.
- Para um certo corpo, varia ligeiramente de lugar para lugar na Terra, e é muito menor na Lua.
- É a melhor medida da quantidade de matéria de que dispomos.
- É medida em quilogramas (kg).
- É medida em newtons (N).
- É devida à força de atração gravitacional.
- É medida aplicando-se uma força conhecida ao corpo, medindo a aceleração resultante e fazendo o quociente da força pela aceleração.
- É medida pendurando o corpo em uma mola calibrada (dinamômetro).
- É medida em uma balança.

RESPOSTAS

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R₁₃ -

Além das propriedades diferentes da massa e do peso discutidas acima, veremos no capítulo seguinte que o peso é uma grandeza vetorial, ao passo que a massa é uma grandeza escalar.

- R7 — A aceleração seria $a/2$.
- R8 — O corpo de maior massa ($2m$).
- R9 — É a força com que o corpo é atraído pela Terra, ou por outro astro em cuja superfície ele se encontra.
- R10 — O carrinho pesa aproximadamente $0,34N$ na Lua, peso este que pode ser medido pendurando-o em um dinamômetro.
- R11 — Não, o peso de um corpo depende do lugar onde ele está.
- R12 — A massa será a mesma, $50g$. O peso será cerca de 6 vezes menor, ou $0,08N$.
- R13 — PESO: a, c, f, g, i.
MASSA: b, d, e, h, j.

5. Exercícios de aplicação

- E1** — Um disco de massa $0,5kg$ desliza sem atrito sobre uma superfície lisa, com aceleração de $4m/s^2$. Que força atua sobre ele?
- E2** — Diante de um imprevisto, um automóvel de massa $2\,000kg$ é freado, passando sua velocidade de $72km/h$ para $36km/h$ em $5s$. Qual o valor da força que foi aplicada pelos freios?
- E3** — Um carro, cuja massa é de $600kg$, quebrou sua barra de direção e precisa ser guinchado. Qual a aceleração que o carro adquire, quando o guincho começa a puxá-lo com uma força de $300N$?
- E4** — Um foguete que leva em sua ogiva um satélite meteorológico é acelerado durante $10s$; os gases expelidos pelo seu reator exercem sobre ele uma força inicial de $2 \times 10^5 N$. Sendo a massa do foguete $10^4 kg$, qual é a aceleração inicial produzida?
- E5** — Uma locomotiva acelera um vagão de massa $24\,000kg$, imprimindo a ele uma aceleração de $0,5m/s^2$. Qual o valor da força que a locomotiva aplica ao vagão? Qual a intensidade da força necessária para imprimir a mesma aceleração a um conjunto de dez vagões iguais ao primeiro?
- E6** — Uma força constante é aplicada durante $1,0s$ num disco **A**, que desliza sem atrito sobre uma mesa. A velocidade do disco varia de $2,0m/s$ nesse intervalo de tempo. A mesma força aplicada em outro disco **B**, durante $3,0s$, acarreta uma variação de velocidade de $5,0m/s$.
- a) Qual dos discos possui maior massa?
- b) Quais as massas dos discos **A** e **B**, sabendo que a força é de $10,0N$?
- E7** — Em um tubo de TV, um elétron é acelerado por uma força constante de $25 \times 10^{-14} N$. Sendo a massa do elétron $9,1 \times 10^{-31} kg$, calcule:
- a) A aceleração do elétron.
- b) A velocidade final do elétron, sabendo que ele parte do repouso e que o tubo o acelera durante $2,6 \times 10^{-15} s$.
- E8** — Um carrinho é puxado sobre uma superfície horizontal lisa, por uma mola mantida em distensão constante. Verifica-se que o carrinho é acelerado com a aceleração igual a $12cm/s^2$. Qual será a aceleração desse carrinho, se ele for puxado por duas molas, cada uma exatamente igual à primeira, lado a lado, e distendidas igualmente à primeira?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

- E9** — Você tem três carrinhos **A**, **B** e **C**. Os carrinhos **A** e **B**, quando colocados em pratos opostos de uma balança de braços iguais, se equilibram. Colocando-os agora em um mesmo prato da mesma balança eles equilibram o carrinho **C** que está no outro prato. Aplicando certa força **F** ao carrinho **A**, ele é acelerado a $2,5\text{m/s}^2$. Supondo agora que você aplica a mesma força **F** ao carrinho **B**, e depois a mesma força **F** ao carrinho **C**, responda:
- Qual a aceleração adquirida pelo carrinho **B**?
 - Qual a aceleração adquirida pelo carrinho **C**?
- E10** — Uma força de $5,0\text{N}$ é aplicada a um corpo, acelerando-o a $2,0\text{m/s}^2$.
- Calcule sua massa, admitindo que essa seja a única força exercida sobre o corpo.
 - Que outro processo você poderia utilizar para medir a sua massa?
 - Se a medida feita com o primeiro método resultasse maior que a obtida pelo segundo método, que conclusões você poderia tirar?
- E11** — Um bloco de massa $4,0\text{kg}$ é puxado sobre uma mesa horizontal sem atrito pela força constante de $12,0\text{N}$, a partir do repouso.
- Qual a aceleração do bloco?
 - Que distância percorre o bloco em $2,0\text{s}$?
 - Se, ao fim de $3,0\text{s}$, o bloco se divide em duas partes iguais, uma ainda puxada pela força de $12,0\text{N}$ e a outra livre, qual a distância entre elas $2,0\text{s}$ após se terem separado?
- E12** — Aristóteles ensinou que era necessária uma força constante para produzir uma velocidade constante e daí concluiu que, na ausência de forças, os corpos parariam.
- Indique uma situação em que uma força constante parece produzir uma velocidade constante.
 - Como você explica essa situação, segundo as leis do movimento de Newton?

R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -a)

b)

R₇ -a)

b)

R₈ -

R₉ -a)

b)

R₁₀ -a)

b)

c)

R₁₁ -a)

b)

c)

R₁₂ -a)

b)

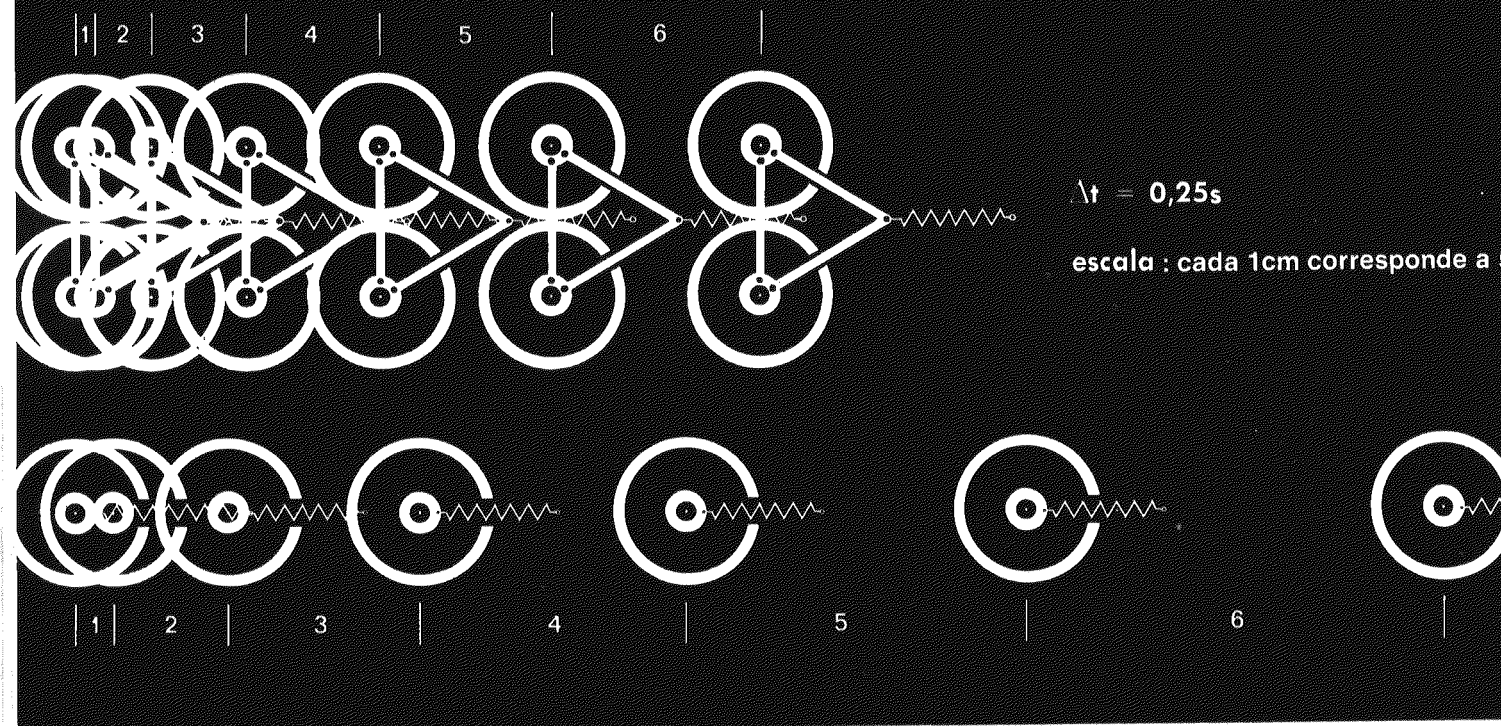


figura 2

E13 — A figura 2 mostra o movimento de dois corpos. O primeiro corpo é composto de dois discos, cada um deles igual ao disco que constitui o segundo corpo. Os dois discos juntos possuem o dobro da massa de um só. O disco composto e o disco simples estão sujeitos à mesma força, como se pode notar pela deformação das molas. A massa de um disco é 0,5kg. Usando as informações da figura:

- Determine as acelerações para os dois discos.
- Calcule a força que está sendo exercida pela mola sobre o disco composto.
- Calcule a força que age sobre o disco simples.
- Qual a relação entre a aceleração do disco composto e do simples?

E14 — Se no Instituto de Pesos e Medidas fosse mantida uma mola-padrão ao invés de uma massa-padrão, como você definiria uma unidade de massa?

E15 — A força gravitacional sobre um corpo na superfície da Lua é aproximadamente um sexto da força gravitacional na superfície da Terra.

- Quanto pesaria, na Lua, um homem de massa igual a 70 kg? E na Terra?
- Qual seria sua massa na Terra e na Lua?

E16 — a) Qual é aproximadamente a força gravitacional que atua sobre uma massa de 100g na superfície da Terra?

- Qual é aproximadamente a massa de um objeto que pesa 49,0N na superfície da Terra?

O trecho abaixo foi transcrito do livro **2001: Uma Odisséia no Espaço**, de Arthur Clarke, baseado no roteiro do filme de mesmo nome.

“Um dos atrativos da vida na Base e na Lua em geral era, sem dúvida alguma, a baixa gravidade, produzindo uma sensação de bem-estar generalizado. Contudo,

isso apresentava os seus perigos e era preciso que decorressem algumas semanas até que um emigrante procedente da Terra conseguisse adaptar-se. Uma vez na Lua, o corpo humano via-se impelido a adquirir toda uma nova série de reflexos. E pela primeira vez era obrigado a distinguir massa de peso.

Um homem que pesasse na Terra noventa quilogramas-força poderia descobrir, para grande satisfação sua, que na Lua o seu peso era de apenas quinze quilogramas-força. Enquanto se deslocasse em linha reta e em velocidade uniforme, sentiria uma sensação maravilhosa, como se flutuasse. Mas assim que resolvesse alterar o seu curso, virar esquinas ou deter-se subitamente, então perceberia que sua massa de noventa quilogramas, ou inércia, continuava presente, pois isso é fixo e inalterável, tanto na Terra como na Lua, no Sol ou no espaço. Portanto, antes que uma pessoa conseguisse adaptar-se ao regime selenita, era necessário aprender que todos os objetos são pelo menos seis vezes mais inertes do que o seu peso levaria a crer à primeira vista. Tal fato de um modo geral somente era compreendido após algumas colisões e apertos de mão demasiado violentos. Os antigos habitantes da Lua procuravam manter distância dos recém-chegados até que esses estivessem aclimatados."

E17 — Por que um astronauta caminha em linha reta, com relativa facilidade, sobre o solo lunar?

E18 — Existe diferença entre peso e massa?

E19 — A inércia de um corpo depende de sua massa ou de seu peso?

E20 — A inércia de um homem é diferente na Lua e na Terra?

E21 — Um homem de massa noventa quilogramas, aqui na Terra, vai à Lua. Lá:

- a) seu peso será 90 quilogramas-força e sua massa 90 quilogramas.
- b) seu peso será 15 quilogramas-força e sua massa 90 quilogramas.
- c) seu peso será 90 quilogramas-força e sua massa 15 quilogramas.
- d) seu peso será 15 quilogramas-força e sua massa 15 quilogramas.

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R_{13-a})

b) c)

d)

R₁₄₋

R_{15-a})

b)

R_{16-a} b)

R₁₇₋

R₁₈₋

R₁₉₋

R₂₀₋

R₂₁₋

Respostas dos Exercícios de aplicação

- R1 — 2N.
- R2 — $4 \times 10^3 \text{N}$.
- R3 — $0,5 \text{m/s}^2$.
- R4 — 20m/s^2 .
- R5 — $1,2 \times 10^4 \text{N}$; $12 \times 10^4 \text{N}$.
- R6 — a) O disco B.
b) $m_A = 5,0 \text{kg}$ e $m_B = 6,0 \text{kg}$.
- R7 — a) $2,7 \times 10^{27} \text{m/s}^2$. b) $7,0 \times 10^{12} \text{m/s}^2$.
- R8 — 24cm/s^2 .
- R9 — a) $2,5 \text{m/s}^2$. b) Aproximadamente
 $1,3 \text{m/s}^2$.
- R10 — a) 2,5kg.
b) Utilizando uma balança.
c) Nesse caso, se poderia supor a existência de atrito entre o corpo e a superfície, diminuindo, assim, a aceleração do corpo.
- R11 — a) $3,0 \text{m/s}^2$. b) Cerca de 6,0m. c) 12m.
- R12 — a) Um corpo leve em queda no ar; por exemplo, uma folha.
b) Para que a velocidade seja constante é necessário que as forças que agem sobre o corpo sejam contrabalançadas. No caso da folha em queda, a resistência do ar contrabalança a força de atração da Terra.
- R13 — a) Para o corpo duplo, 40cm/s^2 ; para o corpo simples, 80cm/s^2 .
b) 0,40N. c) 0,40N. d) $\frac{a_C}{a_S} = \frac{1}{2}$
- R14 — Diríamos que um corpo possui uma unidade de massa se, ao ser puxado pela mola-padrão com uma unidade de força, adquirisse uma unidade de aceleração.
- R15 — a) Na Lua o peso do homem seria um sexto de seu peso na Terra, aproximadamente 114N; na Terra, seu peso é de 686N.
b) Tanto na Terra como na Lua sua massa seria a mesma, de 70kg.
- R16 — a) $P = 0,98 \text{N}$. b) $m = 5 \text{kg}$.
- R17 — Sendo seu peso pequeno, o esforço exigido também é pequeno.
- R18 — Sim. O peso é a força com que a Terra atrai os corpos. Para um mesmo corpo, ele é maior na Terra do que na Lua. A massa é uma propriedade característica do corpo.
- R19 — De sua massa.
- R20 — Não.
- R21 — b) Seu peso será 15 quilogramas-força e sua massa 90 quilogramas.

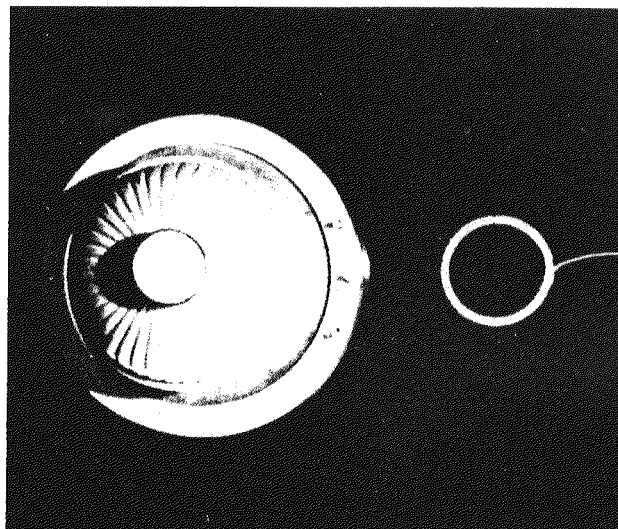


figura 3

6. Aplicação da 2.^a lei de Newton ao movimento circular

Até agora, aplicamos a segunda lei de Newton apenas aos movimentos retilíneos. Vejamos agora como ela pode ser empregada em um movimento circular.

A figura 3 mostra um disco que desliza sem atrito sobre uma mesa; a seu lado há um anel de **borracha** que pode ser preso ao disco. Quando o anel é puxado por um fio (figura 4), ele sofre uma deformação, que é tanto maior quanto maior for a força aplicada. Se a deformação é mantida constante durante o movimento, isso indica que a intensidade da força aplicada ao disco também é constante durante esse movimento.

A figura 5 é uma fotografia estroboscópica do disco em movimento circular. O disco está preso a uma das extremidades de um fio, que está por sua vez fixo, pela outra extremidade, a um ponto da mesa. O movimento do disco foi circular desde a posição **A** até a posição **J**; logo depois de o disco passar pela posição **J**, o fio foi cortado.

Q14 — Existe alguma força atuando sobre o disco durante o trajeto desde a posição **A** até a posição **J**? Justifique sua resposta.

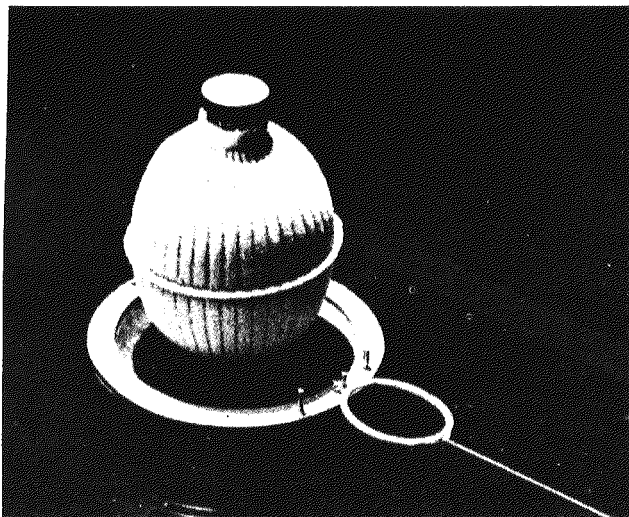


figura 4

Para girar uma pedra amarrada na ponta de um barbante, é necessário exercer continuamente uma força sobre a pedra, força esta que se transmite através do barbante. Assim, não é surpreendente que, para manter o disco em uma trajetória circular, seja necessário exercer sobre ele uma força. O fato de o anel de borracha permanecer deformado durante o movimento circular demonstra que essa força existe.

Q15 — Qual a forma da trajetória do disco após o fio ter sido cortado?

Q16 — Após o fio ter sido cortado, existe ainda alguma força não equilibrada agindo sobre o disco? Justifique sua resposta.

Meça, na foto estroboscópica, as distâncias percorridas pelo disco entre as posições sucessivas **A-B** e **D-E**.

Q17 — O valor da velocidade do disco é constante durante o movimento circular?

Q18 — Qual é a variação do valor da velocidade do disco durante o movimento circular?

Verificamos que, embora o disco esteja sob a ação de uma força durante o movimento circular, não há variação do valor de sua velocidade. Não havendo variação do valor

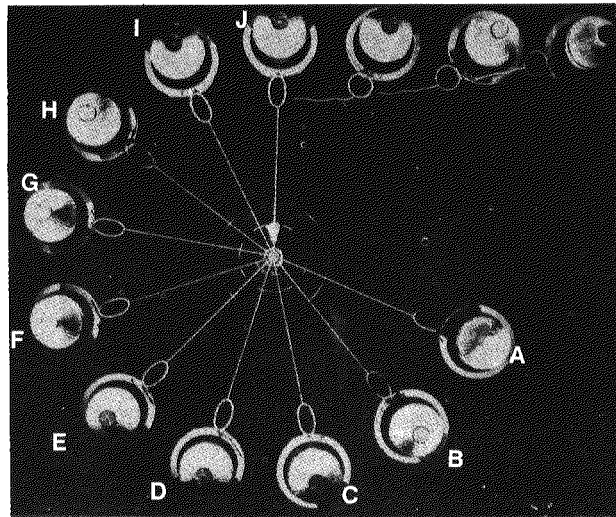


figura 5

RESPOSTAS

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R₁₈ -

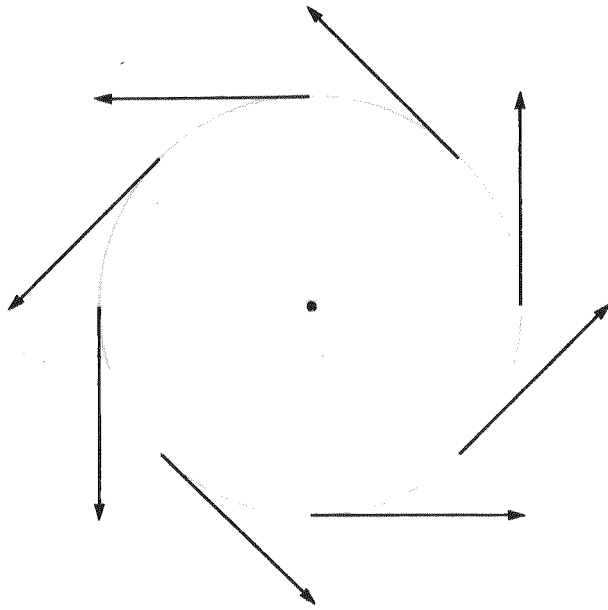


figura 6
 Representação das direções das velocidades de um corpo em movimento circular, em algumas posições de sua trajetória.

da velocidade, poderíamos concluir que a aceleração do disco é nula. No entanto, isso implicaria que o produto $m \times a$, da massa do disco pela sua aceleração, seria igual a zero, ou seja, a força $F = ma$ que atua sobre o disco seria nula. Ora, isso não é verdade, como vimos acima: a deformação do anel de borracha mostra claramente que o disco está sob a ação de uma força enquanto dura o movimento circular.

O raciocínio desenvolvido acima parece indicar que a segunda lei de Newton, $F = ma$, não se aplica aos movimentos circulares. Mas isso é falso: a segunda lei é uma lei universal, que deve valer para todos os movimentos. O que então está errado?

Para responder a essa pergunta, ataquemos o problema de outro ponto de vista: sabemos que o disco está sujeito à ação de uma força F , como atesta a deformação do anel de borracha. Conhecemos o valor m da massa do disco. Apliquemos a segunda lei de Newton a essa situação; claramente, o disco está sujeito a uma aceleração $a = F/m$.

No entanto, sabemos que a aceleração mede a variação de velocidade, e assim po-

demos garantir que a velocidade do disco está variando. Mas vimos anteriormente que o valor numérico da velocidade permanece constante durante o movimento circular. Estamos, então, perante uma situação em que a velocidade do corpo varia, mas seu valor numérico permanece constante. Isso indica que a velocidade é uma grandeza que possui outras propriedades, além de seu valor, que não foram consideradas até agora; veremos, no próximo capítulo, que a velocidade é uma grandeza caracterizada também por **direção e sentido**.

Assim, durante a experiência, apesar de o valor numérico da velocidade não ter mudado, sua **direção** variou continuamente. Em outros termos, a velocidade do corpo não apontou sempre na mesma direção, pois o corpo descreveu uma circunferência. E é essa variação da direção da velocidade que corresponde à aceleração do movimento circular (fig. 6).

No capítulo 8 o movimento circular voltará a ser estudado, considerando-se a direção e o sentido da velocidade.

Astro	Massa (kg)	Raio (m)
Sol	$1,98 \times 10^{30}$	$6,95 \times 10^8$
Mercúrio	$3,28 \times 10^{23}$	$2,57 \times 10^6$
Vênus	$4,83 \times 10^{24}$	$6,31 \times 10^6$
Terra	$5,98 \times 10^{24}$	$6,38 \times 10^6$
Marte	$6,37 \times 10^{23}$	$3,43 \times 10^6$
Júpiter	$1,90 \times 10^{27}$	$7,18 \times 10^7$
Saturno	$5,67 \times 10^{26}$	$6,03 \times 10^7$
Urano	$8,80 \times 10^{25}$	$2,67 \times 10^7$
Netuno	$1,03 \times 10^{26}$	$2,48 \times 10^7$
Plutão	?	?
Lua	$7,34 \times 10^{22}$	$1,74 \times 10^6$

tabela 2

7. Peso na Terra e na Lua

Entendemos por **peso** de um corpo a força de atração gravitacional que esse corpo sofre por parte de um astro, como a Terra, Marte ou a Lua.

Sabemos que o peso de um corpo depende de sua massa e da massa do astro que o atrai; além disso, a intensidade da força-peso diminui com a distância do corpo ao astro em questão. Assim, à medida que nos afastamos da Terra, vamos nos tornando cada vez mais leves.

Q19 — Uma nave espacial parte da Terra para uma estação a 150 000km do centro da Terra e vai até outra estação, a 150 000km do centro de Júpiter (tabela 2). Em qual das duas estações o peso do piloto é maior? Por quê? E a sua massa?

A partir do que já sabemos sobre a atração gravitacional, podemos dizer que a diferença entre o peso de um corpo na Terra e o peso desse mesmo corpo na Lua depende das diferenças entre as massas e os raios desses astros. Vamos tentar descobrir exatamente qual é essa dependência; comecemos com as massas.

Medidas indiretas nos mostram que a massa M_T da Terra é $M_T = 6,0 \times 10^{24}$ kg, ao passo que a massa M_L da Lua é $M_L = 7,3 \times 10^{22}$ kg. Calculando a razão entre essas duas massas, obtemos:

$$\frac{M_T}{M_L} = \frac{6,0 \times 10^{24}}{7,3 \times 10^{22}} = 82$$

ou $M_T = 82 M_L$.

Ou seja, a massa da Terra é 82 vezes maior que a massa da Lua.

RESPOSTAS

R₁₉ -

Se o peso de um corpo dependesse apenas da massa do astro que o atrai, seria de esperar que, na superfície da Terra, ele fosse 82 vezes maior que na superfície da Lua; no entanto, isso não é verdade, como a experiência mostra. De fato, o peso do corpo depende ainda da distância a que ele se encontra do centro do astro em questão. Quanto mais afastado do centro da Terra — ou da Lua — menor é o peso do corpo.

Métodos indiretos de medida permitem determinar os raios da Terra e da Lua: são respectivamente $R_T = 6,4 \times 10^6$ m e $R_L = 1,7 \times 10^6$ m. A razão entre os raios dos dois astros é então

$$R_T/R_L = \frac{6,4 \times 10^6}{1,7 \times 10^6} = 3,8.$$

Dessa forma, o raio da Terra é 3,8 vezes maior que o raio da Lua.

Se o peso do corpo em determinado astro fosse diretamente proporcional à massa desse astro e inversamente proporcional a seu raio, teríamos (P_T e P_L são respectivamente os pesos do corpo na superfície da Terra e na superfície da Lua):

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{M_T}{M_L} \times \frac{R_L}{R_T} = 82 \times \frac{1}{3,8} = 22$$

$$P_T = 22 P_L$$

E assim o peso de um corpo na Terra seria cerca de 22 vezes maior que o peso desse corpo na Lua. No entanto, sabemos que o peso de um corpo na Terra é apenas cerca de 6 vezes maior que o peso desse corpo na Lua. Logo, nessa suposição de que o peso é diretamente proporcional à massa do astro e inversamente proporcional a seu raio **não** pode ser correta. Vejamos o que acontece se considerarmos que o peso é inversamente proporcional ao **quadrado** do raio do astro:

$$\frac{P_T}{P_L} = \frac{M_T}{M_L} \times \left(\frac{R_L}{R_T}\right)^2 = 82 \times \left(\frac{1}{3,8}\right)^2 = 5,8$$

$$P_T = 5,8 P_L$$

- R14 — Sim, pois a direção do movimento do disco mudou durante esse trajeto; além disso, o anel de borracha permaneceu deformado.
- R15 — É uma reta.
- R16 — Não. O anel de borracha voltou à sua forma normal, a direção do movimento do disco não mais se alterou e sua velocidade permaneceu constante.
- R17 — Sim.
- R18 — A variação é nula.
- R19 — Como as distâncias das estações aos centros dos planetas são, em ambos os casos, iguais, o peso do piloto é maior na estação de Júpiter, pois a massa desse planeta é muito maior que a massa da Terra; a massa do piloto é a mesma nas duas estações e, aliás, em qualquer lugar.

Vemos então que, neste caso, o peso do corpo na Terra resulta 5,8 vezes maior que o peso do corpo na Lua, o que está de acordo com a experiência.

Assim, podemos concluir que **o peso de um corpo na superfície de um astro é diretamente proporcional à sua massa, à massa do astro, e inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo ao centro do astro.**

Quando estamos na superfície ou próximos da superfície de um astro, a atração gravitacional devida a este astro é muito maior do que as forças gravitacionais devidas aos outros astros; dessa forma, podemos com boa aproximação desprezar os efeitos dos outros astros. Entretanto, isto não é verdade quando não estamos próximos de um determinado astro. Por exemplo, considere uma nave que vai da Terra à Lua. Quando ela está à distância de $3,0 \times 10^5$ km da Terra e $8,0 \times 10^4$ km da Lua (a distância da Lua à Terra é $3,8 \times 10^5$ km), as forças de atração gravitacional devidas à Lua e à Terra são aproximadamente iguais. Podemos dizer que a nave tem dois pesos, um devido à Terra, outro devido à Lua.

E os astros têm peso? Pode-se dizer que um astro tem peso **em relação** a um outro astro. O peso da Terra em relação ao Sol, por exemplo, seria a força de atração gravitacional solar. Entretanto, não é costume empregar a palavra peso para se referir à força gravitacional entre astros.

8. Massa inercial e massa gravitacional

Neste capítulo, medimos massa de duas maneiras diferentes.

De início, usamos uma balança e afirmamos que as massas de dois corpos são iguais quando a balança está equilibrada. Nesse caso, as massas são chamadas de **massas gravitacionais** por-

que comparamos a atração gravitacional sobre os dois corpos.

Em seguida, aplicamos uma força a um corpo, medimos a aceleração adquirida e, por meio da segunda lei de Newton, determinamos a massa do corpo pela relação $m = F/a$. Nesse caso, como a relação F/a é uma medida da inércia, a massa é chamada de **massa inercial**.

Ficamos assim com duas medidas de massa feitas de forma totalmente diferente. Na primeira, usamos uma balança e equilibramos — sem movimento — forças gravitacionais. Na segunda, a gravidade não importa, aplicamos uma força ao corpo, o colocamos em movimento e medimos a aceleração.

Serão equivalentes essas duas medidas da massa de um corpo? Se considerarmos o quilograma-padrão guardado no Instituto de Pesos e Medidas da França tanto para massas inerciais quanto gravitacionais, observa-se experimentalmente que a massa inercial de um corpo é igual à sua massa gravitacional. Se determinarmos, por meio de uma balança, que a massa gravitacional de dois corpos é igual e aplicarmos a mesma força a ambos, notaremos que adquirem a mesma aceleração; reciprocamente, se concluirmos que dois corpos têm massas inerciais iguais porque adquirem a mesma aceleração quando sujeitos à mesma força, notaremos que eles se equilibram quando colocados em uma balança.

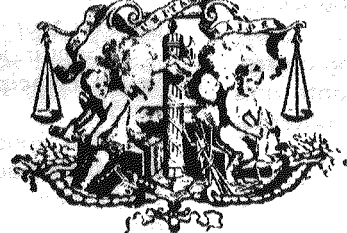
Assim, podemos medir massa de duas formas diferentes, por meio de uma balança ou da segunda lei de Newton. Como frequentemente é muito difícil aplicar uma força a um corpo e estar seguro de que forças desconhecidas não estejam influenciando o movimento, é mais comum determinarmos somente a massa gravitacional de um corpo por meio de uma balança e a considerarmos igual à massa inercial. Não sendo necessário distinguir massa inercial e massa gravitacional, usamos a palavra **massa** para nos referirmos tanto a uma quanto a outra.

Hypoth. V. L. & Saturnum Orbibus suis So
 m, Jovem & Saturnum Orbibus suis So
 Mercurium & Venerem circa Solem
 naribus demonstratur. Plenâ facie l
 midiatâ è regione Solis, falcatâ cis Sol
 um macula
 ena facie p
 rtum est qu
 eorum pha
 Hypoth. V
 Terram vel
 uialtera medi
 Hæc à K
 em utique sunt tempora periodica, ex
 ve Planetæ circa Terram, sive iidem cu
 e mensura quidem temporum periodi
 omos universos. Magnitudines autem
 aldus omnium diligentissimè ex Observ

PHILOSOPHIE
 NATURALIS
 PRINCIPIA
 MATHEMATICA

AUCTORE
 ISAACO NEWTONO,
 EQUITE AURATO.
 EDITIO ULTIMA

*Cui accedit ANALYSIS per QUANTITATUM SERIES, FLUXIONES & DIFFERENTI
 AS cum enumeratione LINEARUM TERTII ORDINIS.*



AMSTÆLODAMI,
 SUMPTIBUS SOCIETATIS.
 M. D. CCXXIII



Newton e o "Principia"

Isaac Newton (1642-1727) nasceu num vilarejo inglês. Sua infância transcorreu calmamente na fazenda de seus pais, entre brinquedos mecânicos que ele mesmo construía.

Em 1661 entrou para o Trinity College da Universidade de Cambridge, ajudado financeiramente por um tio.

Quando a peste negra ameaçou a Inglaterra, em 1665, voltou à fazenda natal e durante dois anos fez extraordinárias descobertas em matemática, óptica e mecânica.

São desse período as idéias principais de seu trabalho sobre a gravitação dos corpos, que só seria publicado 21 anos mais tarde, no famoso livro **Philosophia Naturalis Principia Mathematica — Princípios Matemáticos da Filosofia Natural** (referido comumente como o **Principia**) —, em que são sistematizados os fundamentos e as leis da mecânica clássica.

O atraso de 21 anos na publicação do livro foi devido ao seu caráter introvertido e receio de provocar polêmicas como as que ocorreram após a publicação de sua **Teoria da Luz e das Cores**, em 1672.

Até o começo deste século, toda a Física se baseou e se inspirou no trabalho de Newton. Estabelecendo definitivamente a transição — iniciada por Galileu e Kepler — entre a ciência medieval e a ciência moderna, Newton é considerado um dos maiores pensadores que a humanidade já teve. As concepções de Newton, se bem que ainda aplicáveis a uma grande parte da Física, foram reformuladas em 1905 por Albert Einstein, em sua Teoria da Relatividade.

O **Principia** apresenta a filosofia natural — como era então chamada a Física — de maneira axiomática. Inicialmente são dadas as definições dos termos utilizados no texto; em seguida, são expostas as leis ou axiomas; e por fim, baseada exclusivamente nesses axiomas, a construção lógica da teoria.

Seguindo o costume da época, Newton escreveu o **Principia** em latim, a língua científica de então.

Na época ainda não havia uma **linguagem científica** padronizada, e assim palavras como força, massa, movimento etc. eram utilizadas por diferentes autores com significados diversos. Somente a partir da edição do **Principia** é que tal linguagem passou a ser estabelecida.

O texto que segue, extraído do **Principia**, é uma tradução da edição inglesa publicada em 1946 por Florian Cajori. Os números entre parênteses referem-se a comentários sobre o texto.

Definições

Definição I

A quantidade de matéria é a medida da mesma provinda conjuntamente de sua densidade e de seu volume¹.

Assim, ar de densidade dupla, em espaço duplo, tem quantidade quádrupla. A mesma coisa deve ser compreendida sobre neve ou poeira ou pós finos, que se condensam por compressão ou liquefação, e sobre todos os corpos que se condensam por qualquer causa. Não considero aqui um

meio que livremente permeia os interstícios entre as partes dos corpos, se é que tal meio existe². É esta quantidade que chamo daqui por diante de corpo ou massa³. E esta quantidade é conhecida através do peso de cada corpo, pois é proporcional ao peso, conforme eu verifiquei em experiências com pêndulos, feitas com muita precisão, e que serão descritas adiante⁴.

Definição II

A quantidade de movimento é a medida do mesmo, provinda conjuntamente da velocidade e da quantidade de matéria⁵.

O movimento do todo é a soma dos movimentos das partes; e portanto em um corpo duplo em quantidade, com velocidade igual, o movimento é duplo; com velocidade dupla, é quádruplo.

Definição III

Uma força aplicada é a ação exercida sobre um corpo para mudar seu estado, seja de repouso ou de movimento uniforme em linha reta⁶.

Axiomas ou leis do movimento

Lei I

Todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta, a não ser que seja obrigado a mudar esse estado por forças a ele aplicadas.

Projéteis continuam em seus movimentos, na medida em que não são retardados pela resistência do ar, ou impelidos para baixo pela força da gravidade. Um pião, cujas partes são continuamente desviadas de movimentos retilíneos pela sua coesão, não cessa a sua rotação, a não ser por seu retardamento pelo ar. Os corpos³ maiores dos planetas e cometas, encontrando menor resistência em espaços mais livres, mantêm seus movimentos tanto progressivos como circulares por tempo muito mais longo.

1. A definição que Newton dá de massa não é satisfatória; com efeito, ele diz que massa é o produto de densidade e volume, mas não explica o que é densidade ("provinda conjuntamente de" significa "produto de").

2. O "meio que permeia os interstícios dos corpos" é o éter, que se supunha existir no espaço: ele seria o meio que permite a propagação da luz. A hipótese da existência do éter foi abandonada após a aceleração da Teoria da Relatividade, em 1905.

3. Newton usa pouco a palavra "massa", preferindo "quantidade de matéria" e "corpo".

4. A distinção que se faz entre peso e massa é muito importante. Poucos autores antes de Newton se preocuparam em estabelecê-la.

Lei II

A variação de movimento é proporcional à força aplicada; e se faz na direção da reta em que esta força é aplicada.

Se uma força qualquer gera um movimento, uma força dupla gerará o dobro do movimento, uma força tripla, o triplo do movimento, seja a força aplicada toda de uma vez ou aos poucos e sucessivamente. E este movimento (sendo sempre dirigido na mesma direção da força geradora), se o corpo já estava em movimento, é somado ou subtraído do movimento anterior, conforme eles conspirarem diretamente ou são contrários um ao outro; ou é juntado obliquamente, quando são oblíquos, de tal modo a produzir um novo movimento composto da determinação de ambos⁷.

Lei III

A cada ação está sempre oposta uma reação igual: ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas para as partes contrárias⁸.

Algo que 'puxa ou empurra outra coisa é igualmente puxado ou empurrado por esta outra coisa. Se você aperta uma pedra com o seu dedo, o dedo é também apertado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se eu posso falar assim) será igualmente puxado para trás pela pedra; porque a corda esticada, pela mesma tendência de se relaxar ou desenrolar, puxará o cavalo tanto em direção à pedra, como puxa a pedra em direção ao cavalo, e obstará o progresso de um tanto quanto avança a outra. Se um corpo agir sobre outro e pela sua força mudar o movimento do outro, este corpo (por causa da igualdade da pressão mútua) sofrerá uma mudança igual em seu próprio movimento, em sentido contrário. As variações causadas por estas ações são iguais, não nas velocidades, mas nos movimentos dos corpos; isto é, se os corpos não forem tolhidos por outros impedimentos. Pois, visto que os movimentos variam igualmente, as variações das velocidades, em sentidos opostos, são inversamente proporcionais aos corpos. Esta lei também valerá em atrações.

5. A expressão "quantidade de movimento" aparece nessa definição; no que se segue, Newton emprega a palavra "movimento".

6. A definição de força faz menção implícita ao princípio da inércia, que somente será enunciado mais tarde, como a primeira lei do movimento.

7. Aqui Newton leva em conta o caráter vetorial da força e da quantidade de movimento. Na época, ainda não existia o conceito de grandeza vetorial, e portanto também não se sabia executar operações vetoriais. Mesmo assim, em um escólio que segue o enunciado das três leis, Newton dá a regra do paralelogramo, para efetuar a composição de duas forças que agem segundo direções oblíquas.

8. Essa lei é conhecida como Lei da Ação e da Reação.

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.