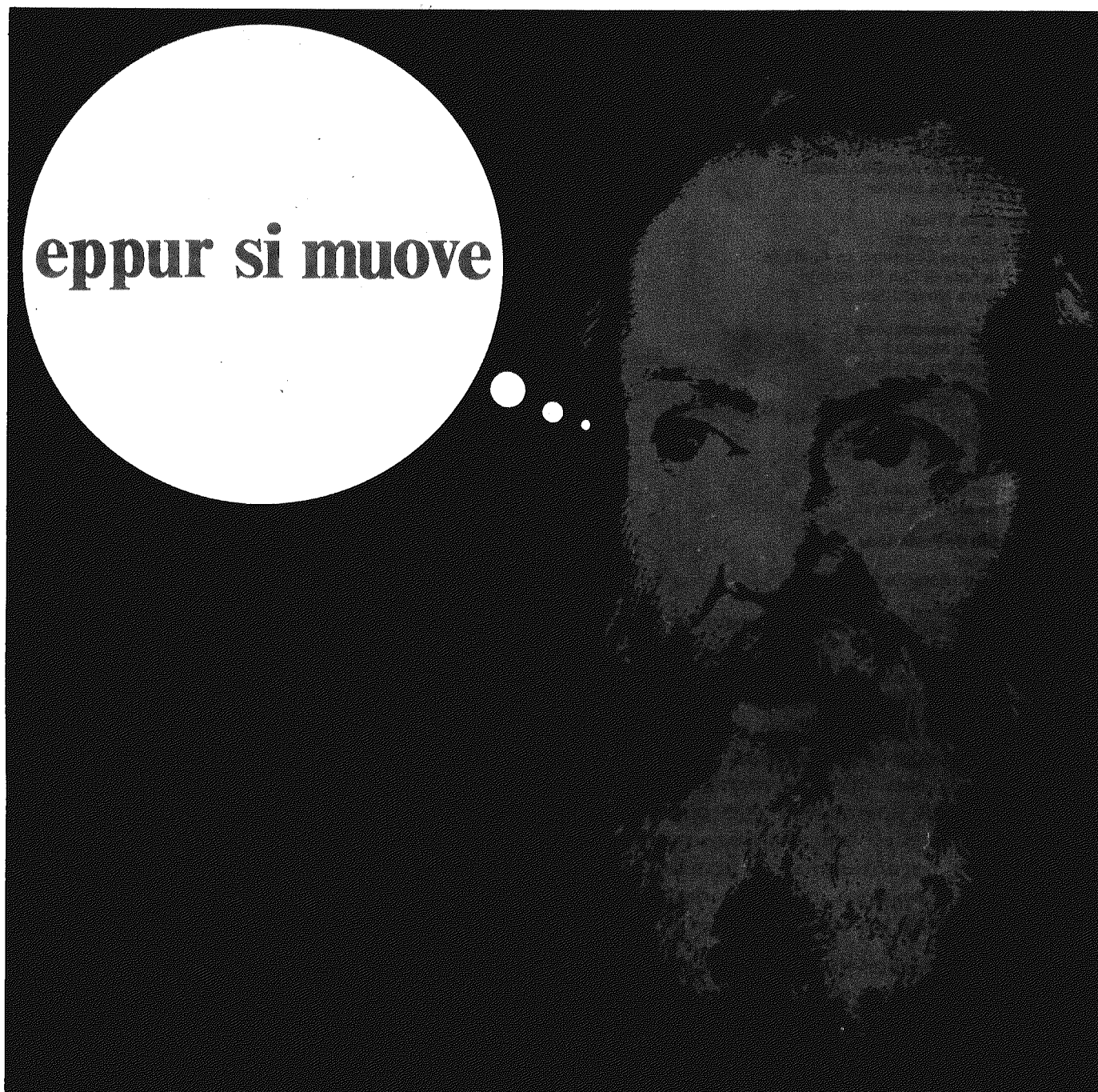


PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA
IFUSP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FAE /PREMEN

6

Força, inércia e aceleração

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

Eletricidade

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

Galileu Galilei nasceu na cidade italiana de Florença, a 20 de fevereiro de 1564. Em seu trabalho pioneiro baseou-se a transformação do corpo medieval de conhecimentos na ciência moderna. Na época em que ele viveu, as idéias correntes sobre o Universo repousavam sobre uma interpretação superficial do fato de que o Sol e as estrelas parecem girar em torno da Terra. Assim, nosso planeta constituía, para os antigos, o centro imóvel em torno do qual giravam todos os astros, inclusive os cinco planetas então conhecidos (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno). A Igreja Católica, que dominava política, espiritual e culturalmente a maior parte das civilizações européias, tinha por estabelecido que o geocentrismo era a única doutrina referente à organização do Universo que se coadunava com as interpretações que então se faziam das Sagradas Escrituras. Havia no entanto alguns, entre os quais Galileu, que não julgavam o geocentrismo uma boa resposta para os movimentos observados dos astros; achavam que tudo seria melhor explicado considerando o Sol, e não a Terra, como o centro do Universo. Galileu defendeu o ponto de vista heliocêntrico até 1632, quando publicou o livro *Diálogos Sobre os Dois Grandes Sistemas do Mundo*; na obra eram confrontados os dois sistemas, heliocêntrico e geocêntrico, em circunstâncias que irritaram certos prelados. Como consequência, Galileu foi submetido a julgamento pela Santa Inquisição, que o forçou a desmentir tudo o que dissera anteriormente, e o condenou à prisão perpétua domiciliar. Diz a lenda que, ao ouvir o veredicto, o sábio teria murmurado as palavras "eppur si muove" (e, no entanto, ela se move), referindo-se à sua convicção de que a Terra gira em torno do Sol, e não o contrário. Entretanto não há registro histórico de tal fato; o mais provável é que ele tenha apenas pensado as palavras.

Em 1638, já perto do fim da vida, Galileu publicou os *Diálogos Sobre Duas Novas Ciências*, obra em que fundamenta a Mecânica Moderna. É lá que aparecem pela primeira vez o princípio da inércia, o conceito de aceleração e a afirmação de que a aceleração dos corpos em queda é constante.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 6 — Força, inércia e aceleração

1. O princípio da inércia	6-2
2. EXPERIÊNCIA — Como comparar forças	6-6
3. Força e variação de velocidade	6-10
4. Exercícios de aplicação I	6-12
5. Força e aceleração	6-15
6. Aceleração média e aceleração instantânea	6-17
7. Aceleração na calha	6-17
8. EXPERIÊNCIA — Medida de aceleração	6-18
9. Exercícios de aplicação II	6-20
10. Movimento com aceleração constante	6-23
11. Movimento com desaceleração constante	6-25
12. Como calcular distâncias quando a aceleração é constante	6-26
13. Equações da velocidade e da distância para movimentos com aceleração constante	6-28
14. Movimento com aceleração variável	6-30
15. Exercícios de aplicação III	6-33



Força, inércia e aceleração

O relacionamento entre o movimento e suas causas foi um problema que preocupou os homens de ciência desde a mais remota antiguidade. De Aristóteles até Newton, muitas foram as maneiras de encarar a questão; a importância do assunto é tal que o desenvolvimento das teorias sobre o movimento ocupa lugar central na história das idéias do homem acerca do universo.

A evolução das noções sobre o movimento e suas causas pode ser exemplificada por meio de uma experiência simples: suponha um disco de metal parado sobre uma mesa horizontal. Se não for exercida nenhu-

ma ação sobre o disco, ele permanece indefinidamente em repouso. Se o empurrarmos, ele entra em movimento; deixando, no entanto, de se mover assim que interrompemos a ação que exercíamos sobre ele, ou seja, assim que deixamos de empurrá-lo. Se apenas damos um empurrão no disco, retirando a mão logo em seguida, verificamos que ele se move muito pouco antes de parar.

O resultado de experiências como essa levou os pensadores que antecederam Galileu — dos quais um dos mais importantes foi Aristóteles — a afirmar que, para um corpo se manter em movimento, é necessário que

Para conseguir uma camada de gás entre o disco e a mesa, montamos sobre o disco um reservatório de "gelo seco" (gás carbônico, CO_2 , sólido, cuja temperatura é cerca de -70°C). O gelo seco se evapora à temperatura ambiente; o gás carbônico evaporado aumenta a pressão dentro do reservatório e sai pelo orifício inferior, escapando por entre o disco e a mesa. Desse modo há sempre uma camada de gás entre a mesa e o disco.

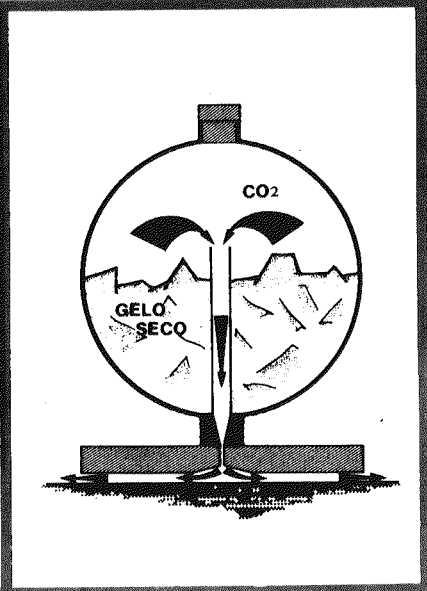
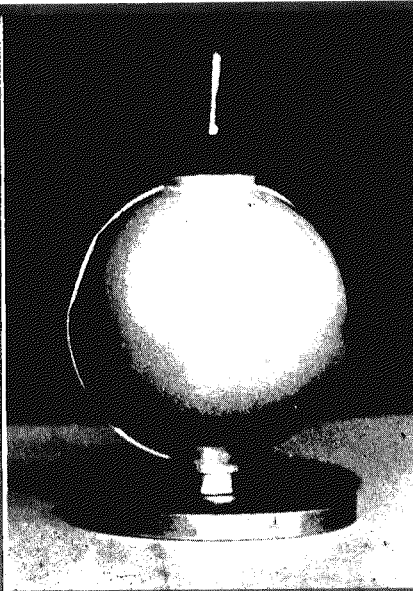
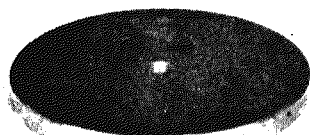
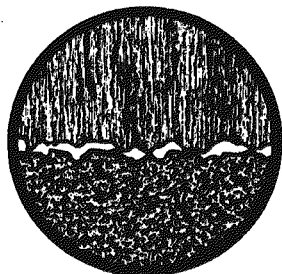


figura 1



As superfícies dos corpos nunca são perfeitamente lisas. Sempre que um corpo desliza sobre outro, entre os dois aparece uma força que se opõe ao movimento; essa força chama-se "força de atrito", ou simplesmente "atrito". O atrito pode ser diminuído através da utilização de lubrificantes, como óleos ou graxas.

ele esteja submetido à ação de uma força. Para tais pensadores, o movimento deveria cessar logo que a força cessasse. Entretanto, essa conclusão se originava numa análise pouco cuidadosa dos fatores que influenciavam as experiências. Muito da importância da contribuição de Galileu para a ciência se deveu à sua preocupação em aprofundar a análise de tais fatores. É isso que faremos agora na experiência do disco sobre a mesa. Vejamos se somos levados a uma conclusão diferente da de Aristóteles.

6 - 2

1. O princípio da inércia

Polindo as superfícies do disco e da mesa, e repetindo o empurrão, percebemos que o disco percorre uma distância maior antes de parar. Se, além de efetuar o polimento, molhamos a mesa com água e sabão, podemos verificar que o deslocamento do disco é ainda maior. Usando lubrificantes mais eficientes, conseguimos fazer com que o disco percorra distâncias bastante grandes antes de parar.

Q1 — Qual a influência dos lubrificantes sobre o movimento do disco?

No caso de nossa experiência, podemos reduzir bastante o atrito entre as duas superfícies (isto é, do disco e da mesa) fazendo com que o disco se mova sobre uma camada de gás situada entre ele e a mesa (figura 1). Esse mesmo método é utilizado nos **hovercrafts**, veículos que se deslocam sobre água, gelo ou praias, deslizando sobre um "colchão" de ar.

A fotografia estroboscópica da figura 2 mostra um disco semelhante movendo-se sobre uma superfície horizontal bem lisa, após ter sido levemente empurrado.

Q2 — A velocidade do disco é constante?

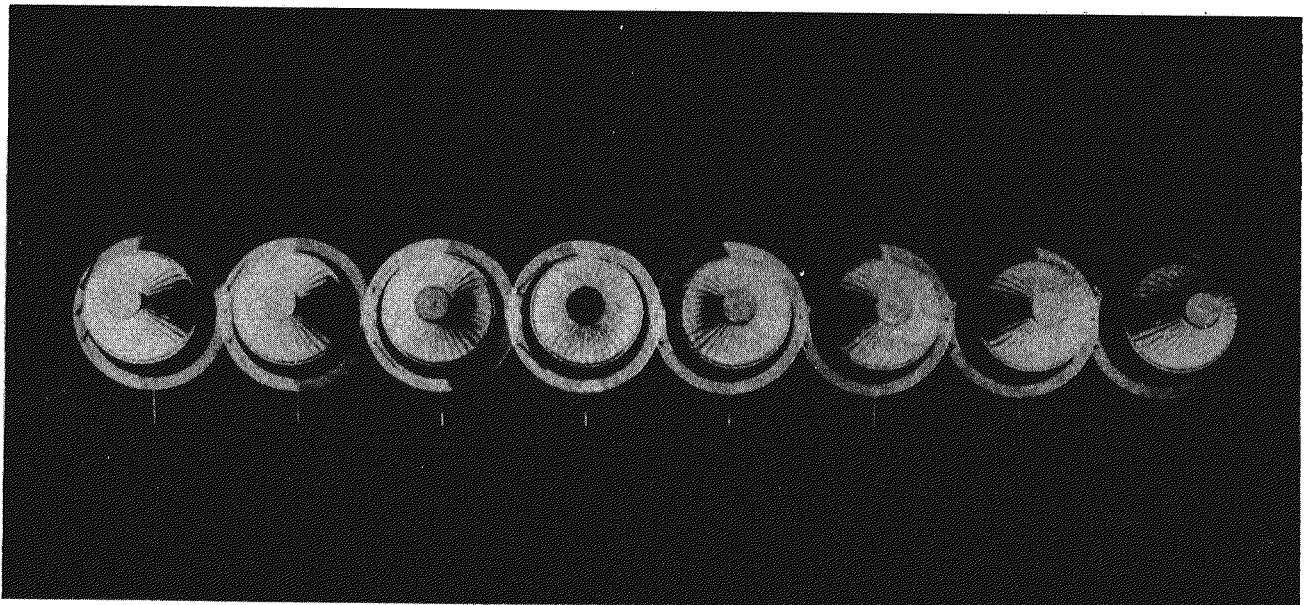
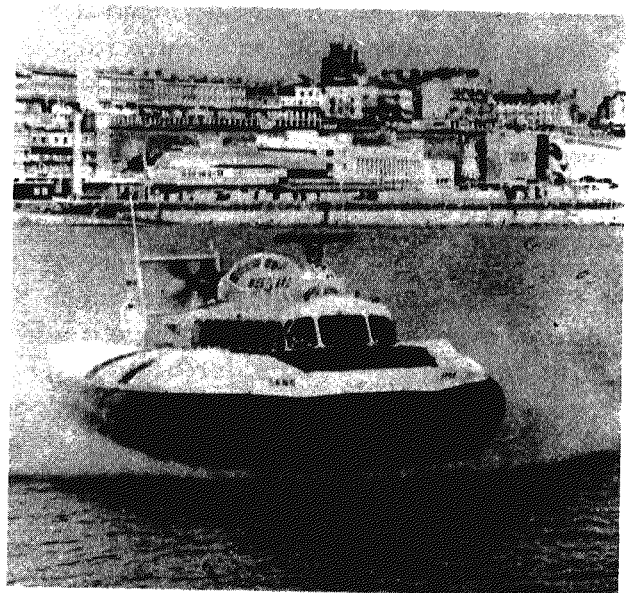


figura 2

Podemos agora concluir, diferentemente de Aristóteles, que o disco se move com velocidade constante, sem que nenhuma força o impulse durante o movimento. Também Galileu chegou a conclusão semelhante: qualquer velocidade, uma vez adquirida por um corpo, será mantida enquanto não existirem causas de aceleração ou retardamento, condição conseguida aproximadamente em superfícies horizontais em que a força de atrito tenha sido reduzida ao mínimo.

Analisando com mais cuidado as condições em que se fez a fotografia do movimento do disco, verificamos que praticamente não há atrito que influencie o movimento. A atração da Terra, que o faria cair, é anulada pela reação da superfície de apoio. Portanto, não há nenhuma força não equilibrada agindo sobre o disco. Como disse Galileu, não havendo nenhuma causa de aceleração ou de retardamento, a velocidade do disco é mantida.

Apesar de o atrito ter sido reduzido ao mínimo, o disco somente pôde adquirir uma certa velocidade porque foi submetido a um empurrão inicial. Uma vez dado o impulso, o disco tende a seguir em linha reta. Uma vez nesse estado de movimento, o disco só pode mudar de velocidade ou de direção se alguma força não equilibrada passar a agir sobre ele.



Hovercraft

RESPOSTAS

R₁ -

R₂ -



figura 3

Podemos perceber um fenômeno semelhante quando estamos no interior de um automóvel que é freado: somos lançados para a frente. Por outro lado, se o carro faz uma curva fechada, somos lançados para o lado. No primeiro caso, somos lançados para a frente porque, ao ser freado, o automóvel tem sua velocidade diminuída, mas nossa velocidade continua a mesma. Tendemos, assim, a continuar com a mesma velocidade; é o atrito de nossas roupas com o banco do carro e, eventualmente, o apoio que o pára-brisa nos oferece — isto é, forças não equilibradas — que fazem com que nosso estado de movimento se altere, ou seja, que impedem que continuemos com a mesma velocidade que tínhamos anteriormente.

Quando o automóvel faz a curva, é outra vez o atrito com o banco e a presença das paredes laterais do carro que impedem que continuemos em linha reta (figura 3). Se não existisse atrito entre as rodas do automóvel e a estrada, o próprio veículo seguiria em linha reta. Isso é, aliás, o que acontece quando o veículo tem os pneus "carecas" e a estrada está muito lisa.

Q3 — Qual é a direção do movimento do disco na fotografia estroboscópica (figura 2)?

Q4 — O que seria necessário para mudar a direção ou o valor da velocidade do disco da figura 2?

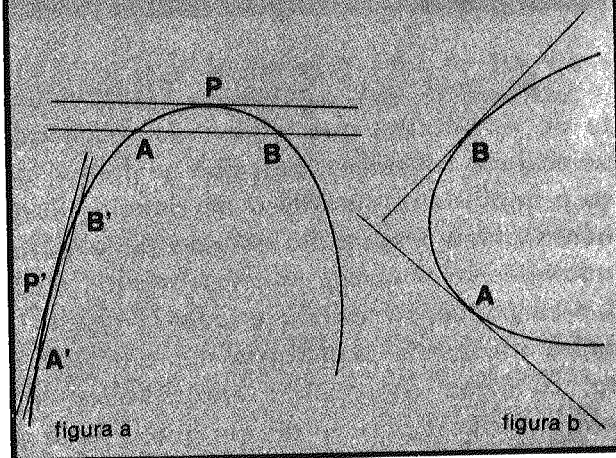
Direção do movimento

Uma direção é determinada por uma reta. Retas paralelas determinam a mesma direção, enquanto que retas não paralelas determinam direções diferentes. A direção de um movimento retilíneo é dada pela reta segundo a qual o corpo se desloca. Já nos movimentos curvilíneos, a direção do movimento, quando o corpo se encontra numa certa posição, é determinada pela reta tangente à curva naquela posição.

Uma maneira simples de traçar a tangente a uma curva em um dado ponto é seguir o procedimento seguinte: 1) escolher dois pontos A e B, próximos do ponto P considerado, e igualmente distantes dele (figura a); 2) traçar a reta AB, que será aproximadamente paralela à tangente à curva em P.

Como retas paralelas determinam a mesma direção, a direção da reta AB corresponderá à direção da tangente em P, ou seja, à direção do movimento do corpo quando ele se encontra na posição P.

A figura b mostra as direções do movimento de um corpo em duas posições de uma trajetória.

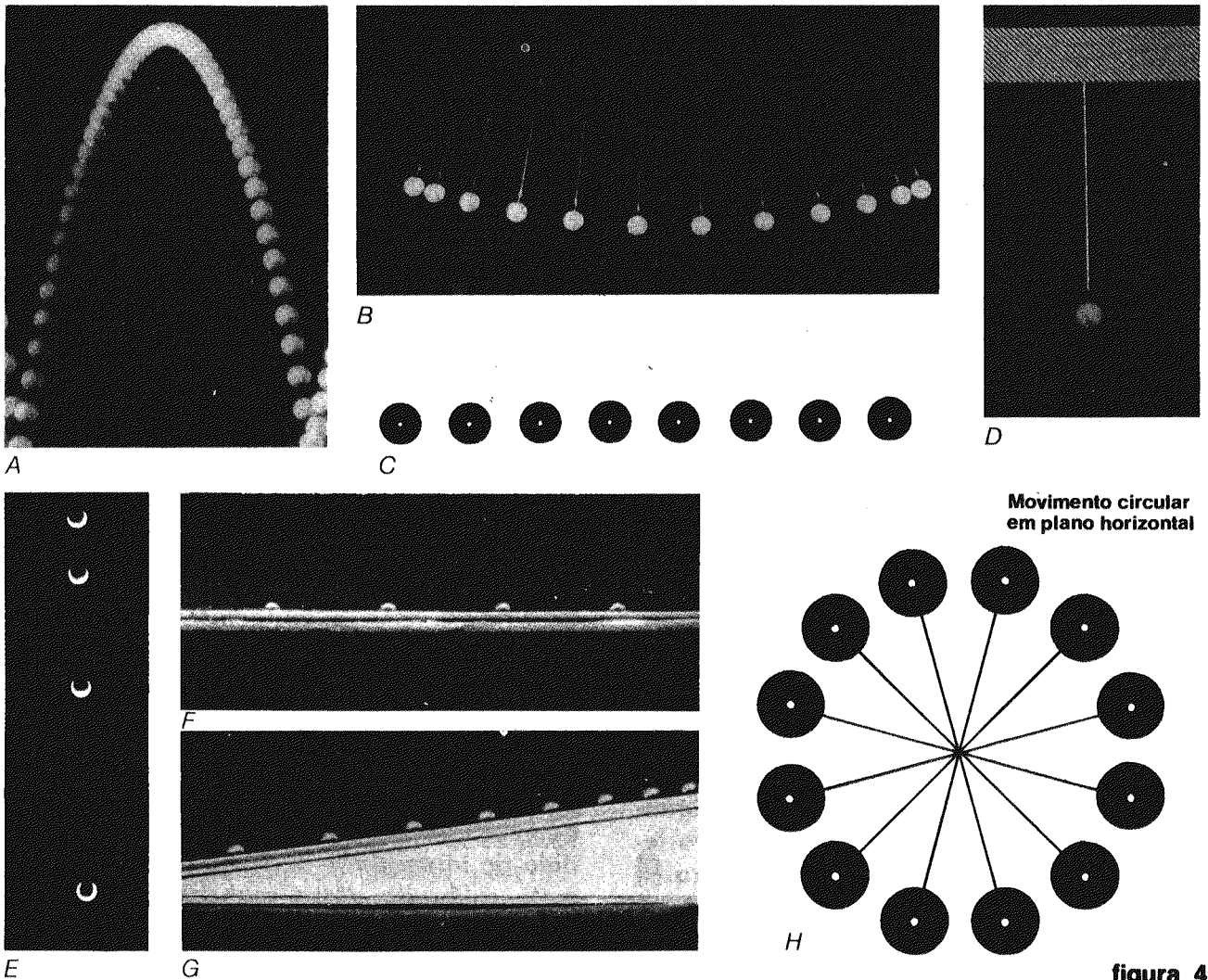


Q5 — Se você observar que um corpo em movimento tem sua direção, ou velocidade, ou ambas as coisas variando, poderá concluir que existe força agindo sobre ele?

Q6 — Diga em quais dos movimentos ilustrados nas fotos estroboscópicas da figura 4 se pode garantir a presença de forças não equilibradas.

Q7 — Lembrando a figura da órbita do satélite Kosmos 159, você pode dizer se existe uma força não equilibrada agindo sobre ele? Justifique sua resposta.

O que discutimos até agora pode ser resumido num dos princípios mais importantes



Movimento circular em plano horizontal

figura 4

da Física, o **princípio da inércia**. Proposto inicialmente por Galileu, foi enunciado em sua forma moderna por Isaac Newton; é uma das leis fundamentais do movimento:

O princípio da inércia

(Primeira lei do movimento, de Newton)

“Todo corpo tende a permanecer parado se estiver parado e a permanecer em movimento retilíneo e uniforme se estiver em movimento. Só haverá modificação dessas situações se houver ação de forças que não sejam equilibradas por outras.”

Para estudar o movimento, é então importante estudar as forças, aprender como medi-las e verificar como elas afetam o movimento dos corpos.

RESPOSTAS

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -

R₇ -

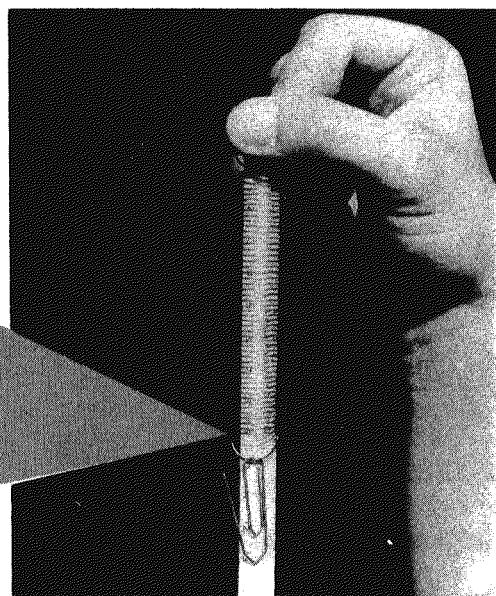
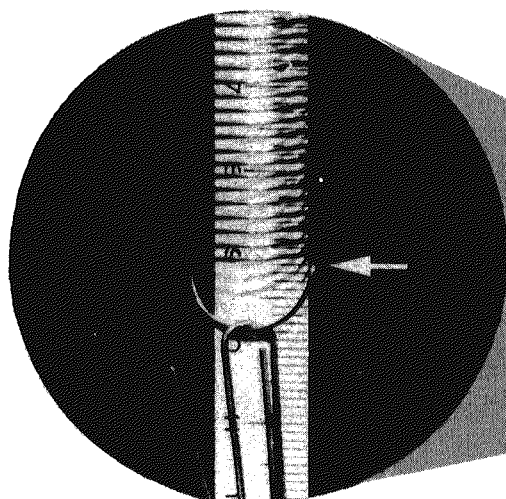


figura 5

2. EXPERIÊNCIA

Como comparar forças

Prenda a extremidade de uma mola em um caderno que está sobre a mesa. Segurando a outra extremidade da mola, tente levantar o caderno, puxando a mola para cima. Faça isso de modo a aumentar lentamente a força que você exerce sobre a mola. Prossiga até que o caderno seja levantado completamente.

- Q8** — O que acontece com a mola à medida que você vai aumentando a força?
- Q9** — Depois que você conseguiu levantar o caderno completamente, a mola continuou esticando ou permaneceu com um certo comprimento?
- Q10** — Se você usar a mola para levantar um corpo mais leve do que o caderno, ela esticará mais ou menos? Faça a experiência para verificar o que acontece.

Para levantar um corpo, não basta aplicar-lhe uma força qualquer: é preciso que essa força iguale ou supere a força com que a Terra atrai o corpo. Você percebeu que na experiência com a mola, à medida que crescia a força exercida, a mola ia esticando;

mais ainda, você notou que, a partir do momento em que o caderno ficou suspenso livremente, o comprimento da mola não mais se alterou.

Isso sugere um método para medir forças: calibra-se uma mola de forma que o **aumento** de seu comprimento sirva de medida da intensidade da força aplicada. Uma mola calibrada dessa maneira é chamada um **dinamômetro**.

Monte o dinamômetro conforme mostra a figura 5. Para que o aparelho funcione melhor, é conveniente que, antes de montá-lo, você estique a mola até cerca de 60cm para que as espiras fiquem distanciadas, como na figura.

A régua que é introduzida no interior da mola serve para determinar de quanto ela se deforma (ou seja, estica) ao ser submetida a uma força. O comprimento marcado pela régua servirá assim como medida da força aplicada. Dessa maneira, você poderá comparar quantitativamente as forças aplicadas nas diversas experiências que realizará.

A extremidade inferior da mola pode ser considerada como referência inicial. Na figura 5 a referência indica 9,1cm (não é necessário que no seu dinamômetro a referência seja também 9,1cm).

- Q11** — Qual é a posição da referência em seu dinamômetro?

Posição inicial da referência $x_0 =$	
Carga na mola	$x - x_0 = \Delta x$
0P	
1P	
2P	
3P	
4P	
5P	

tabela 1

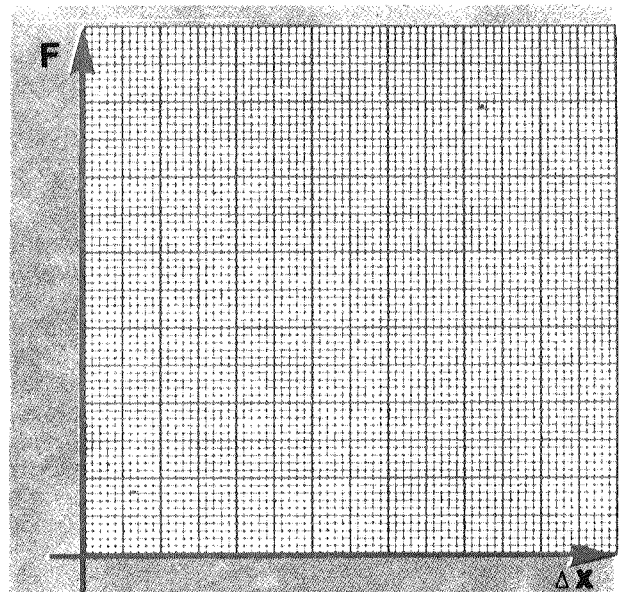


figura 6

Verifiquemos agora de quanto a mola se deforma quando penduramos um, dois, três, etc. ganchos. Como os ganchos são feitos com o mesmo material e têm aproximadamente as mesmas dimensões, a força com que a Terra os atrai é aproximadamente a mesma para todos eles, isto é, todos possuem aproximadamente o mesmo peso P . Pendurar um gancho na mola significa então submeter o dinamômetro a uma força igual a P ; quando são dois os ganchos, a força é $2P$, e assim por diante.

Anote na tabela 1 a posição inicial da extremidade da mola (x_0).

Pendure um gancho na extremidade da mola, depois dois, três, etc., até alcançar cinco ganchos. Preencha a tabela 1 com os deslocamentos correspondentes em relação à posição inicial da referência: $x - x_0 = \Delta x$.*

Q12 — De quanto a mola estica quando você acrescenta um novo gancho aos que já estavam pendurados?

Q13 — Esse valor varia de caso para caso? Isto é, ele depende do número de ganchos que já estavam pendurados?

Construa na figura 6 um gráfico que relacione a força aplicada a mola com a deformação Δx produzida (Δx é a variação do comprimento da mola em relação à posição inicial da referência).

RESPOSTAS

R₈ -

R₉ -

R₁₀ -

R₁₁ -

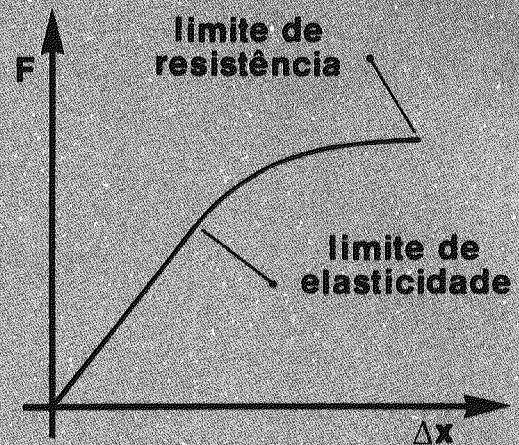
R₁₂ -

R₁₃ -

*A letra grega Δ é utilizada, em Física e em Matemática, para designar a *variação* de uma grandeza, isto é, a diferença entre dois valores da grandeza.

Lei de Hooke

A lei de Hooke afirma que existe proporcionalidade entre a força aplicada a um corpo elástico e a deformação por ele sofrida. No entanto, tal proporcionalidade vale apenas enquanto a força aplicada não faz a deformação exceder o que se chama de "limite de elasticidade" do corpo. Antes que esse limite seja alcançado, o corpo fica deformado apenas quando submetido a essa força, voltando às suas dimensões originais logo que ela cessa; excedido o limite de elasticidade, a deformação do corpo é permanente, isto é, ele não mais readquire sua forma original.



O gráfico obtido deve ser aproximadamente uma reta que passa pela origem. Isso significa, como você já sabe, que há uma relação de proporcionalidade direta entre as forças aplicadas e as deformações da mola. Ou seja, para uma força F , a deformação é Δx ; para uma força $2F$, essa deformação é $2\Delta x$, e assim por diante.

O gráfico que você construiu é análogo ao de calibração do cronômetro de areia: com ele, você poderá determinar o valor da deformação produzida na mola por uma força qualquer e vice-versa. A única diferença entre os dois casos é que, com o gráfico de calibração do cronômetro de areia, você converte medidas de tempo em milímetros de areia para segundos e vice-versa, enquanto que no gráfico de calibração da mola a conversão será de centímetros para unidades P . Ou seja, dado um certo deslocamento da referência, a força correspondente será obtida como um múltiplo (inteiro ou não) do peso P de um gancho.

Observando o gráfico da figura 6, responda:

- Q14** — De quanto a mola se deformará se for submetida a uma força igual a $1,5 P$?
- Q15** — Qual deve ser o valor da força aplicada para que a mola estique $5,0\text{cm}$ além do comprimento inicial?

Agora que você calibrou seu dinamômetro, poderá utilizá-lo para medir forças que agem sobre corpos em movimento.

Coloque um caderno sobre uma superfície horizontal, que pode ser sua carteira ou mesmo o chão da sala. Prenda a mola da maneira indicada na figura 7. Puxe a mola segundo a horizontal, aumentando lentamente a força até que o caderno comece a se deslocar com velocidade aproximadamente constante.

- Q16** — Enquanto você puxa o caderno, mantendo sua velocidade constante, a deformação da mola é também constante?
- Q17** — Qual é, aproximadamente, o valor da deformação?
- Q18** — Utilizando o gráfico de calibração da mola, determine a força que você aplicou.

Quando o caderno se move com velocidade constante, as várias forças que agem sobre ele se equilibram. Tais forças são: a força exercida pelo peso do caderno e a ação do apoio (incluindo o atrito entre o caderno e a superfície de apoio — figura 8).

Como a ação do peso do caderno é equilibrada pela reação do apoio, para que todas as forças estejam equilibradas é necessário

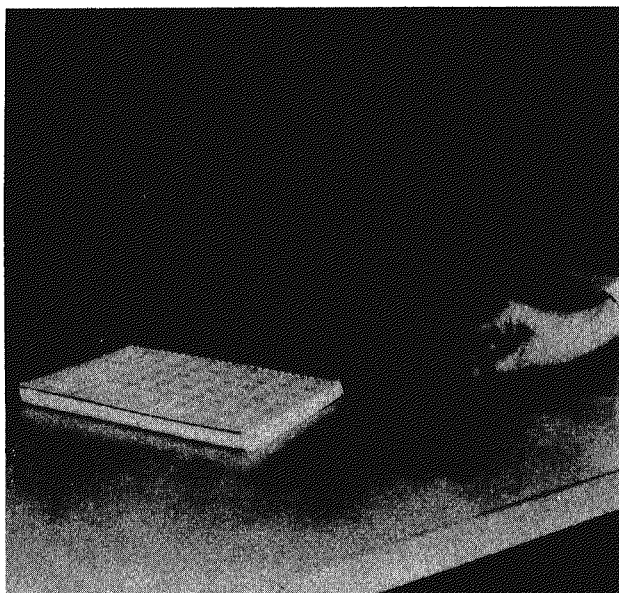


figura 7

que a força de atrito seja equilibrada pela força aplicada pela mola. Portanto, esta última deve ter valor igual ao da força de atrito. Dessa maneira, a experiência que você fez serviu também para obter uma medida do valor da força de atrito entre o caderno e a mesa.

Coloque dois lápis sob o caderno, como mostra a figura 9. Puxe o caderno como anteriormente e meça a força necessária para manter sua velocidade constante.

Q19 — A força agora é maior ou menor? Por quê?

Essa experiência mostra que, diminuindo o atrito entre as duas superfícies, é cada vez menor a força necessária para manter constante a velocidade do caderno.

Q20 — Se conseguíssemos eliminar completamente o atrito entre as duas superfícies, qual seria a força necessária para manter constante a velocidade do caderno?

Veja agora as respostas às questões.

Já sabemos que a velocidade de um corpo varia quando ele está sujeito a uma força não equilibrada; vamos agora verificar como essa velocidade varia.

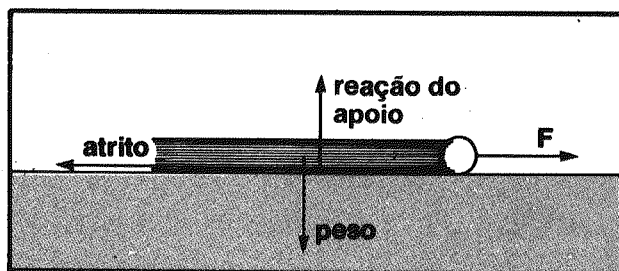


figura 8

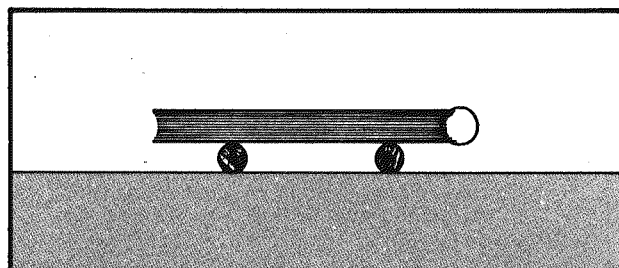


figura 9

RESPOSTAS

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R₁₈ -

R₁₉ -

R₂₀ -

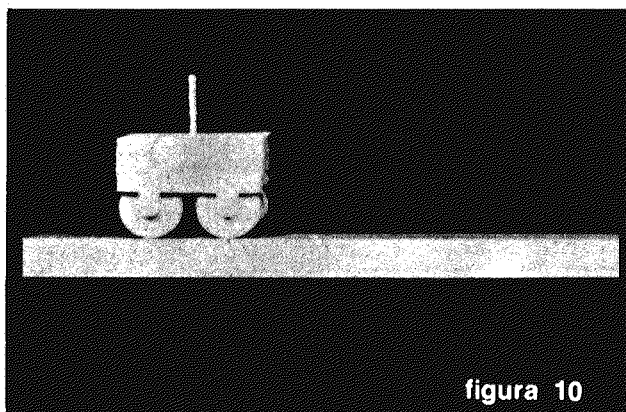


figura 10

Posição	Instante (t)	Velocidade (m/s)
0	0	0
1		
2		
3		
4		

tabela 2

- R1 — Os lubrificantes fazem com que o atrito entre as superfícies de contato diminua, permitindo que o disco percorra uma distância maior.
- R2 — Dentro da precisão das medidas, a velocidade do disco é constante.
- R3 — É a direção da reta segundo a qual o disco se desloca.
- R4 — Seria necessário que uma força não equilibrada agisse sobre ele.
- R5 — Sim. Se não agisse pelo menos uma força, a velocidade e a direção não variariam.
- R6 — A, B, E, G e H.
- R7 — Sim, existe, pois a direção e a velocidade variam no decorrer do tempo.
- R8 — Ela vai esticando. Quanto maior a força aplicada, mais a mola estica.
- R9 — A mola permaneceu com um certo comprimento.
- R10 — A mola esticará menos.
- R11 — Depende do dinamômetro.
- R12 — Em cada caso, leia, na escala de seu dinamômetro, a posição da referência antes e depois de colocar a nova arruela. Em seguida, determine a diferença entre as duas leituras.
- R13 — Não.
- R14 — Leia no seu gráfico a deformação correspondente à força dada.
- R15 — Leia em seu gráfico o valor da força correspondente à deformação dada.
- R16 — Sim.
- R17 — Depende da mola, da superfície de apoio e do caderno. Um valor típico é aproximadamente 6cm.
- R18 — Leia em seu gráfico o valor da força correspondente à deformação observada.
- R19 — A força é menor, porque a presença dos lápis fez com que diminuísse o atrito entre o caderno e a mesa.
- R20 — Uma força igual a zero, de acordo com o princípio da inércia.

3. Força e variação de velocidade

O carrinho da figura 10 pode mover-se livremente sobre trilhos horizontais. Os efeitos do atrito são muito pequenos e podem ser desprezados (figura 11).

A figura 12 mostra o mesmo carrinho puxado por uma força constante a partir do repouso. Você pode comprovar que a força é realmente constante, comparando os comprimentos da mola nas diversas posições. O intervalo de tempo entre dois instantâneos sucessivos é de 0,10s.

Q21 — A velocidade do carrinho é constante?

Q22 — Determine as velocidades instantâneas do carrinho nas posições de 1 a 4 e disponha os resultados na tabela 2. Lembre-se que, para calcular a velocidade num determinado instante, você deve calcular a velocidade média do carrinho no menor intervalo de tempo possível que contenha esse instante.

Q23 — A variação de velocidade entre duas posições sucessivas quaisquer é constante?

Como a variação da velocidade entre duas posições sucessivas é constante, e como o intervalo de tempo decorrido entre dois instantâneos sucessivos também é constante, vemos que, para intervalos de tempo

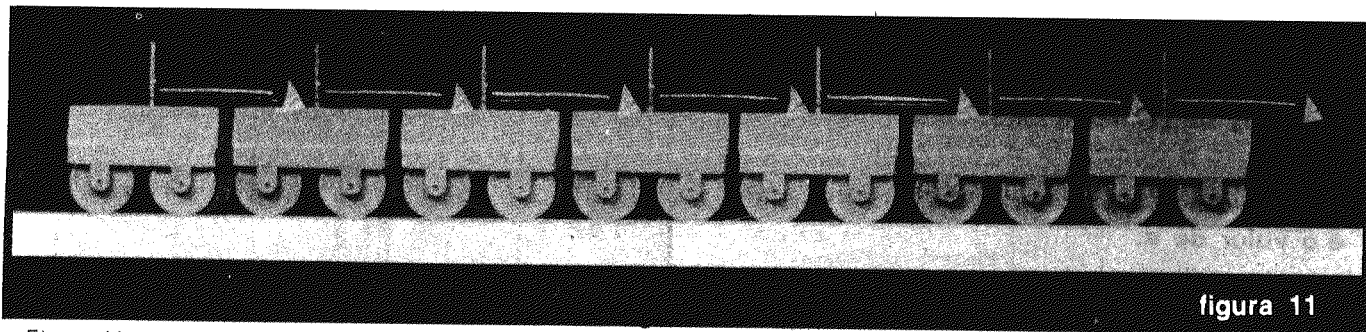


figura 11

Figura 11 — O carrinho foi empurrado e depois abandonado. A fotografia mostra um movimento uniforme, o que indica que não há forças não equilibradas agindo e que o atrito pode ser desprezado.

Figura 12 — O carrinho foi puxado por uma mola espiral amarrada ao seu poste central. A outra extremidade da mola é indicada por um triângulo de papel. São mostradas posições de 0,1 em 0,1 segundo, e a escala é de 1:4.

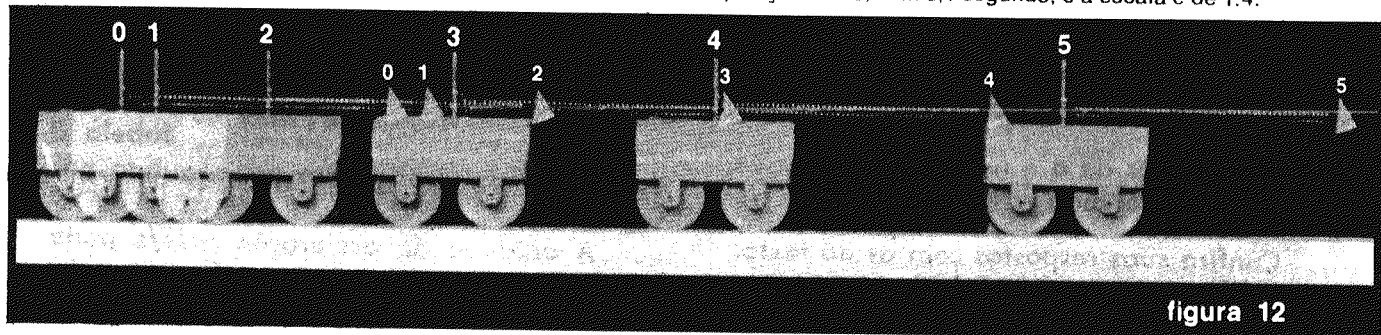


figura 12

iguais, as variações de velocidade são iguais. Confirme a validade dessa afirmação, determinando as variações de velocidade para intervalos de tempo maiores; faça isso, por exemplo, para os intervalos de 0,0s a 0,2s e de 0,2s a 0,4s (note que esses intervalos de tempo têm amplitude de 0,2s).

Q24 — As variações de velocidade nesses intervalos de tempo são iguais?

Conseguimos, portanto, determinar uma característica importante do movimento de um corpo sujeito à ação de uma força constante: **sua velocidade varia proporcionalmente com o tempo**. Se o corpo em questão partiu do repouso — isto é, sua velocidade inicial era igual a zero —, ele adquire uma velocidade v num intervalo de tempo Δt e uma velocidade $2v$ num intervalo de tempo $2\Delta t$. Podemos então dizer que existe uma relação de proporcionalidade simples entre a variação de velocidade e o intervalo de tempo em que essa variação ocorreu. Essa relação pode ser expressa como $\Delta v = a \Delta t$, onde a é uma constante de proporcionalidade (veja Grandezas Proporcionais, Cap. 4).

Para que possamos descrever o movimento de um corpo submetido a uma força

RESPOSTAS

R₂₁ -

R₂₃ -

R₂₄ -

constante, devemos então determinar o valor da constante a . Isso pode ser feito realizando medidas de Δv e de Δt e determinando em cada caso o quociente $a = \Delta v / \Delta t$.

Vejam, no exemplo do carrinho, qual é o valor de a .

Q25 — Anote na tabela 3 as variações de velocidade do carrinho nos intervalos de tempo correspondentes às passagens pelas posições 1 e 2; 1 e 3; 1 e 4.

Q26 — Determine o valor da constante a para cada um dos trechos.

Q27 — O valor de a é realmente constante durante todo o movimento?

Confira suas respostas com as do texto.

Essa constante, que nos dá a variação de velocidade por unidade de tempo, é chamada **aceleração** do movimento.

A aceleração indica a rapidez com que a velocidade varia. No nosso caso, a aceleração é igual a 4m/s/s , o que significa que em cada segundo a velocidade variou de 4cm/s .

Podemos agora resumir o que dissemos da seguinte forma: "Quando um corpo está sujeito a uma **força constante**, seu movimento se caracteriza por possuir uma **aceleração constante**."

Inversamente, se, ao analisarmos o movimento de um corpo, notamos que ele possui aceleração constante, podemos dizer que esse corpo está sujeito à ação de uma força constante.

Como a aceleração é obtida dividindo a variação Δv de velocidade pelo intervalo Δt de tempo em que a variação ocorreu, podemos medi-la por meio de várias unidades. Se, por exemplo, um carro de corrida passa de 120km/h a 180km/h em 10 segundos, sofreu uma variação de velocidade Δv igual a 60km/h em 10 segundos. A aceleração é

$$\text{calculada então como } \frac{60\text{km/h}}{10\text{s}} = 6,0\text{km/h/s}.$$

Nesse caso, a unidade é dada em km/h/s (quilômetros por hora por segundo). Essa aceleração também poderia ser medida em m/h/s ($6,0 \times 10^3$ metros por hora por segundo).

Posições	Δv (m/s)	Δt (s)	$a = \Delta v / \Delta t$ $\left(\frac{\text{m/s}}{\text{s}}\right)$
1 e 2			
1 e 3			
1 e 4			

a é constante? R 27 ➤

tabela 3

do); ou m/s/s ($1,67$ metro por segundo por segundo).

A unidade de aceleração m/s/s pode também ser escrita na forma $\text{m/s} \times \text{s}$ ou m/s^2 (metro por segundo ao quadrado). Esta forma simbólica de escrever a unidade de aceleração tem exatamente o mesmo significado que m/s/s .

Será que o valor da aceleração depende do valor da força aplicada? Para responder a esta questão, na seção 5 analisaremos o movimento do carrinho sob a ação de forças diferentes.

4. Exercícios de aplicação I

E1 — Num teste de aceleração, dois carros de marcas diferentes percorreram o mesmo trecho de uma estrada reta e plana. Após uma série de corridas, obtiveram-se os seguintes resultados:

Carro A: passou da velocidade de 20km/h à velocidade de 100km/h em 20s.

Carro B: passou da velocidade de 20km/h à velocidade de 100km/h em 40s.

- Qual foi a variação de velocidade do carro A?
- Qual foi a variação de velocidade do carro B?
- As acelerações dos dois carros são iguais? Por quê?
- Calcule as acelerações médias de A e B em km/h/h , km/h/s , m/s/s e m/s^2 .

E2 — Um corpo desliza sobre uma superfície horizontal com atrito desprezível. O corpo é puxado por uma força constante F_1 . Num intervalo de tempo de 0,3s, a velocidade varia de 0,2m/s a 0,4m/s. Em uma segunda experiência, o mesmo objeto é puxado com outra força F_2 , durante 0,3s e sua velocidade varia de 0,5m/s a 0,8m/s.

- A aceleração do corpo varia durante a primeira experiência? E durante a segunda experiência?
- Qual das duas forças aplicadas foi maior? Quantas vezes maior?
- Se o corpo fosse puxado pela segunda força durante 0,9s, qual seria sua variação de velocidade?
- Ainda neste caso, se o corpo partisse do repouso, qual seria sua velocidade 1,0 segundo após a partida?

E3 — A notícia ao lado foi publicada em São Paulo durante a primeira visita do avião supersônico Concorde ao Brasil (setembro de 1971). A velocidade do som (Mach 1) é de 1 230km/h.

Calcule a aceleração média do Concorde nesse voo em km/h/min:

- Desde o instante de decolagem até atingir a velocidade Mach 2.
- Desde o instante de decolagem até atingir o Mach 1.
- No intervalo de tempo em que ele passou de Mach 1 para Mach 2.

E4 — A fotografia estroboscópica da figura 13 mostra parte do movimento de uma bola que foi lançada para cima. A escala da figura é de 1:10 e o intervalo de tempo entre dois instantâneos sucessivos é de 0,1s. No instante correspondente à posição 5, a bola estava no ponto mais alto de sua trajetória, e apresentava, assim, velocidade nula.

- Observando a figura 13, pode-se concluir que existe uma força agindo sobre a bola? Por quê?
- Em caso afirmativo, verifique se a força é constante.

O Concorde quebrou na manhã de ontem um de seus próprios recordes, no voo do Galeão para Viracopos, quando atingiu a velocidade "Mach 2" (duas vezes a do som) 22 minutos após a decolagem. O recorde anterior era de 25 minutos.

O prototipo francês do supersonico franco-britânico levantou voo do Galeão às 9h09 e sete minutos após, sobre o Atlântico atingia a velocidade "Mach 1". Em mais 15 minutos, à altitude de 15 mil metros, a velocidade do Concorde já era duas vezes maior que a do som. Às 9h50 estava em Porto Alegre, e às 10h19 sobrevoava a Capital, para pousar em Viracopos às 10h30.

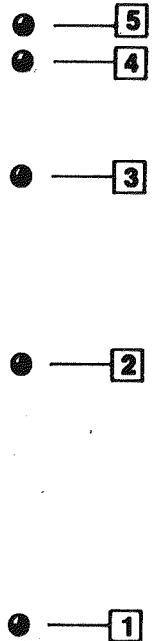


figura 13

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁ - a)
b)
c)

d)

R₂ - a)
b)
c)
d)

R₃ - a)
b)
c)

R₄ - a)
b)

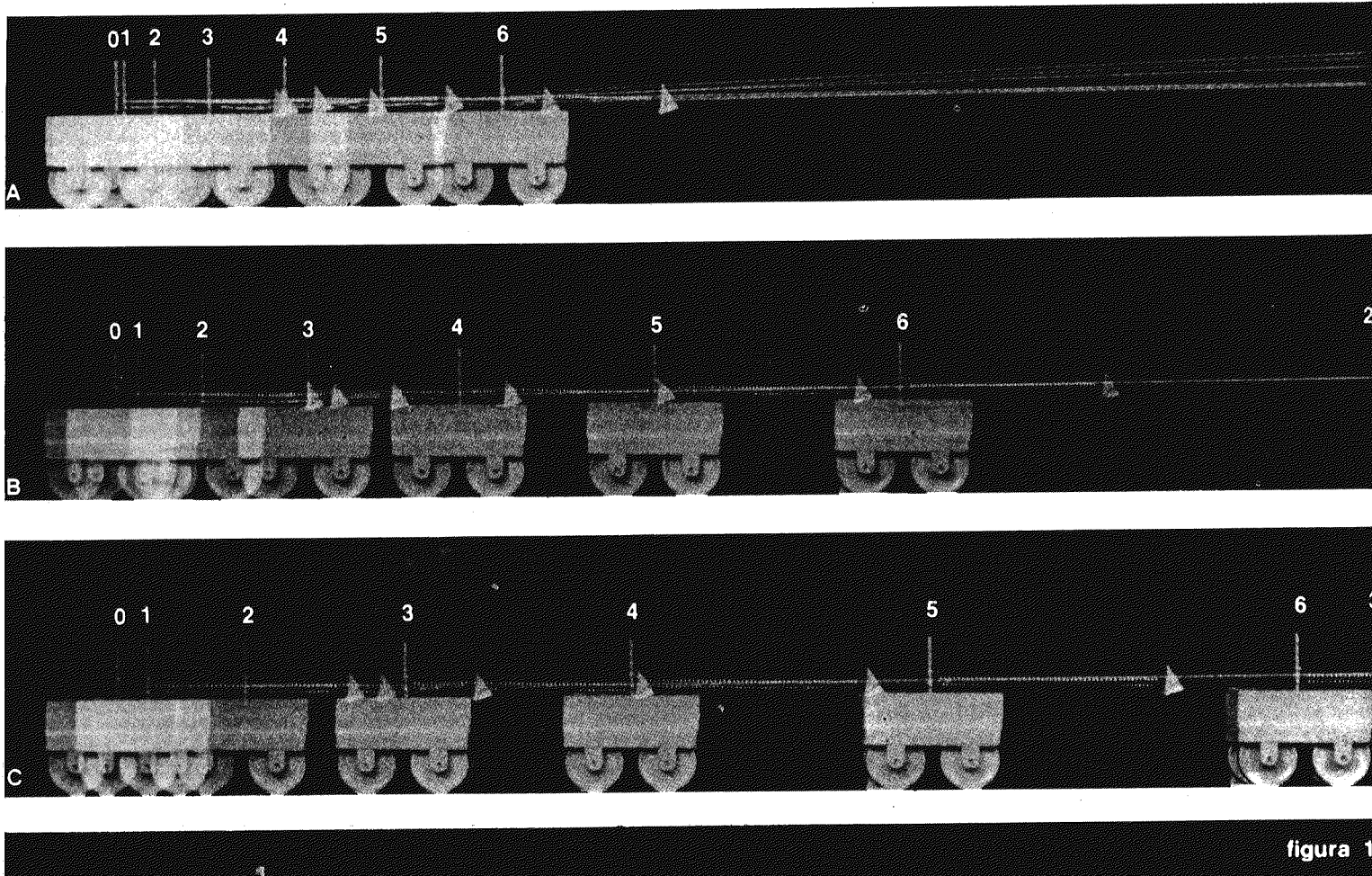


figura 1

Figura 14 — Os carrinhos são idênticos e as molas também; os triângulos permitem medir facilmente os comprimentos das molas. A intensidade das forças que puxam os carrinhos é indicada pela deformação das molas e é constante para cada carrinho. Esta figura e as de n.ºs 11 e 12 são montagens fotográficas que devem ser analisadas como fotografias estroboscópicas. Dados desta figura — Escala 1:4 e $\Delta t = 0,1s$.

R21 — Não, pois ele percorre distâncias diferentes em tempos iguais.

R22 — Tabela 2

Posição	Instante (t)	Velocidade (m/s)
0	0	0
1	0,1	0,39
2	0,2	0,79
3	0,3	1,19
4	0,4	1,62

R23 — Sim, dentro da aproximação das medidas.

R24 — Sim, dentro da aproximação das medidas.

R25 — Tabela 3

Trechos	Δv (m/s)	Δt (s)	$a = \Delta v / \Delta t$ (m/s/s)
1 e 2	0,40	0,1	4
1 e 3	0,80	0,2	4
1 e 4	1,23	0,3	4

R27 — Sim, dentro da aproximação das medidas.

Respostas dos Exercícios de aplicação I

R1 — a) 80km/h; b) 80km/h;

c) Não, porque apesar das variações de velocidade serem iguais, elas ocorreram em intervalos de tempo diferentes;

A: 240 km/h/h; 4 km/h/s; 1m/s/s; 1m/s²

B: 120 km/h/h; 2 km/h/s; 0,6m/s/s; 0,6m/s²

R2 — a) É constante durante cada uma das duas experiências;

b) $F_2 = 1,5 F_1$; c) 0,9m/s; d) 1,0m/s.

R3 — a) 111,8km/h/min;

b) 175,7km/h/min;

c) 82km/h/min.

R4 — a) Existe uma força, porque a velocidade da bola está variando;

b) A força é constante.

5. Força e aceleração

A figura 14 mostra os movimentos de três carrinhos idênticos, sujeitos à ação de forças diferentes: a força aplicada ao segundo carrinho é o dobro da aplicada ao primeiro, enquanto que a aplicada ao terceiro carrinho é o triplo da aplicada ao primeiro. Chamando de F a força aplicada ao primeiro, a aplicada ao segundo seria $2F$ e ao terceiro $3F$.

Os três movimentos foram simultâneos, e portanto o intervalo de tempo entre dois instantâneos sucessivos é o mesmo para os três carrinhos, $0,10s$.

Q28 — Qual dos carrinhos sofreu maior variação de velocidade? Por quê?

A tabela 4 fornece as variações de velocidade entre as posições 0 e 5 em cada um dos três casos.

Q29 — Utilizando a tabela 4, determine, para cada carrinho, a variação de velocidade por unidade de tempo, isto é, sua aceleração, preenchendo a 4.ª linha da tabela.

Q30 — Qual dos carrinhos apresentou maior aceleração?

Coloque na última linha da tabela as forças aplicadas a cada um dos carrinhos.

Q31 — Quando a força aplicada sobre o carrinho é duplicada, o que ocorre com o valor da aceleração? E quando ela é triplicada?

Q32 — Esses resultados mostram que as acelerações são proporcionais às forças aplicadas?

Confira agora as suas respostas.

A experiência com os três carrinhos permite concluir que a aceleração é proporcional à força aplicada ao corpo. Se a força triplica, a aceleração também triplica; se a for-

CARRO	A	B	C
Δv (m/s) 0 → 5	0,66	1,36	2,05
Δt (s) 0 → 5			
$\Delta v/\Delta t$			
Forças aplicadas			

tabela 4

RESPOSTAS

R₂₈ -

R₃₀ -

R₃₁ -

R₃₂ -

R28 — O terceiro carrinho, porque a força aplicada sobre ele é maior.

R29 — Tabela 4

carro	A	B	C
Δv (m/s)	0,66	1,36	2,05
$\Delta v / \Delta t$ (m/s/s)	1,3	2,7	4,1
Forças aplicadas	F	2F	3F

R30 — O terceiro carrinho.

R31 — Ela também duplica. Quando a força triplica, a aceleração também triplica.

R32 — Sim.

	I	II	III	IV
	v_t (m/s)	Δv (m/s)	Δt (s)	a (m/s/s)
A				
B				
C				
D				

tabela 5

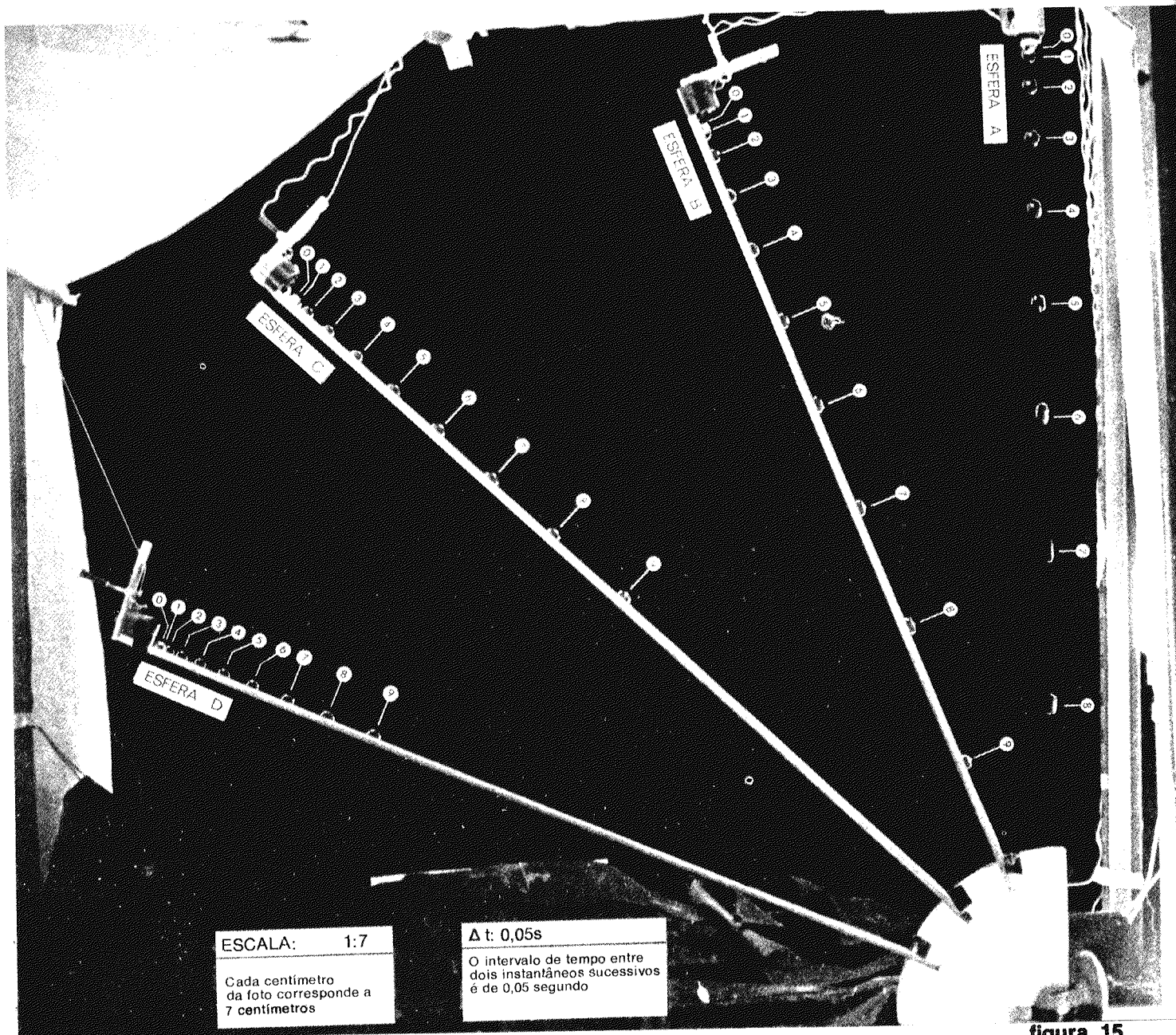


figura 15

ça é reduzida à metade, a aceleração também o é, e assim por diante. Podemos exprimir matematicamente esse fato escrevendo $F = ka$, onde F é a força, a a aceleração e k uma constante de proporcionalidade.

6. Aceleração média e aceleração instantânea

O exemplo que acabamos de ver é um caso muito particular, pois a variação da velocidade em cada unidade de tempo (a aceleração) foi constante. Esse fato não é comum nos movimentos que conhecemos, uma vez que os corpos estão geralmente sujeitos a forças variáveis. A aceleração não é constante e a razão $\Delta v/\Delta t$ é, nestes casos, a aceleração média no intervalo de tempo Δt .

Se quisermos calcular a aceleração num instante determinado (aceleração instantânea), teremos que calcular as acelerações médias em intervalos de tempo cada vez menores e que contenham o instante considerado, como foi feito para a velocidade instantânea no capítulo 5.

7. Aceleração na calha

Vejamos como se comparam as acelerações de esferas de aço que rolam, simultaneamente, em rampas de diferentes inclinações.

A fotografia estroboscópica da figura 15 mostra os movimentos de quatro esferas de aço, A, B, C e D. A esfera A foi abandonada em queda livre, caindo verticalmente; as demais rolaram sobre calhas de alumínio com inclinações diferentes.

Inicialmente, as esferas estavam presas por eletroímãs, que foram desligados por um único interruptor. Assim, as quatro esferas iniciaram seus movimentos no mesmo instante. Na foto, números iguais correspondem a posições simultâneas: quando a esfera que caiu em queda livre estava, por exemplo, na posição 7, as esferas B, C e D estavam também em suas respectivas posições 7.

Responda às questões 33, 34, 35 e 40 na página 6-19.

Q33 — A velocidade de cada esfera foi constante durante o movimento?

Q34 — Para cada uma das esferas, calcule a velocidade média, em m/s, no trecho entre as posições 0 e 8. Lembre-se de que você deve utilizar a escala impressa na foto para determinar as distâncias reais.

Q35 — Qual das esferas apresentou a maior velocidade média? E qual apresentou a menor?

As questões 36, 37, 38 e 39 se referem à tabela 5.

Q36 — Determine as velocidades instantâneas (v_i) das quatro bolinhas no instante correspondente às posições 7 e preencha a coluna I da tabela 5. Se você tiver dificuldade em responder a esta questão, determine em cada caso o espaço percorrido entre as posições 6 e 8 e divida o valor encontrado pelo tempo decorrido entre os instantes correspondentes a essas posições.

Q37 — Calcule a variação de velocidade (Δv) para cada uma das bolinhas, entre o instante 0 (zero) e o instante de passagem pela posição 7; preencha a coluna II da tabela 5.

Q38 — Determine o tempo gasto para cada uma das bolinhas ir da posição zero até a posição 7 e preencha a coluna III da tabela 5.

Q39 — Calcule a aceleração média de cada bolinha e preencha a coluna IV da tabela 5.

Q40 — Qual das bolinhas apresenta a maior aceleração?

Confira agora as suas respostas.

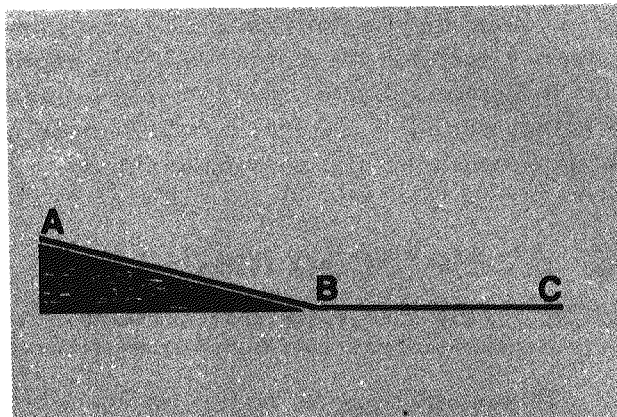


figura 16

Uma bolinha colocada em uma calha **horizontal** não adquire movimento, a não ser que receba um empurrão. Entretanto, as bolinhas colocadas nas calhas **inclinadas** adquirem velocidade sem receber empurrão, e passam a se mover com acelerações diferentes. A aceleração adquirida pela bolinha será tanto maior quanto mais inclinada for a calha.

Que força age sobre as bolinhas que estão nas calhas inclinadas e as faz mudar do estado de repouso para o de movimento? Para responder a essa pergunta, consideremos as forças que atuam numa bolinha. Uma delas é a força vertical de atração que a Terra exerce (peso). A calha, por sua vez, exerce uma força sobre a bolinha (a reação de apoio). Na calha horizontal, a esfera permanece em repouso porque a ação da Terra é completamente anulada pela reação do apoio (ação da calha). Na calha inclinada, a ação da Terra não é completamente anulada pela reação do apoio, e a esfera desce acelerada. Aumentando a inclinação da calha, a aceleração da esfera aumenta. Interpretamos isso da seguinte maneira: a ação da Terra (peso da esfera) permanece constante, enquanto que a reação do apoio diminui à medida que aumentamos a inclinação, tornando-se nula numa calha vertical.

8. EXPERIÊNCIA

Medida de aceleração

Nesta experiência você vai usar a calha e o cronômetro de areia para calcular a aceleração média de uma bolinha que rola na

parte inclinada da calha. Para isso, é necessário conhecer a variação da velocidade da bolinha entre as posições A e B (veja a figura 16) e o intervalo de tempo em que ocorre essa variação. Para determinar a variação da velocidade entre as posições A e B, precisamos conhecer as velocidades da bolinha nessas posições.

Q41 — Qual a velocidade da bolinha no instante em que você a solta na posição A?

Para determinar a velocidade na posição B, é suficiente determinar a velocidade no trecho BC, pois a velocidade da bolinha é praticamente a mesma em todos os pontos desse trecho.

Determinação da velocidade v_B no ponto B

Nivele a calha com cuidado e meça a distância BC.

Q42 — Qual o valor encontrado?

Solte a bolinha em A e, sem voltar o cronômetro a zero após cada corrida, meça o tempo total para a bolinha percorrer 5 vezes o trecho BC. Mantenha sempre a calha bem nivelada e tome o cuidado de soltar a bola sempre do mesmo modo, sem lhe dar qualquer empurrão inicial e exatamente do ponto A.

Q43 — Em média, qual é o intervalo de tempo, em segundos, para a esfera percorrer uma vez o trecho BC?

RESPOSTAS

R₃₃ -

R₃₄ -

R₃₅ -

Q44 — Qual é a velocidade da bolinha nesse trecho?

Q45 — Qual é a velocidade da bolinha no ponto B?

Q46 — Qual é a variação da velocidade ($v_B - v_A = \Delta v$) da bolinha entre os pontos A e B?

Conhecido Δv , resta apenas determinar o intervalo de tempo Δt em que ocorreu essa variação de velocidade, para determinar a aceleração.

Determinação de Δt

Para determinar o intervalo de tempo Δt solte a bolinha do ponto A e meça o tempo de cinco corridas no trecho inclinado AB.

Q47 — Qual é o intervalo médio de tempo Δt para uma corrida do percurso AB?

Cálculo da aceleração

Como você conhece a variação de velocidade Δv no trecho AB e o intervalo de tempo Δt necessário para a bolinha percorrer esse trecho, pode calcular sua aceleração média pelo quociente $\Delta v/\Delta t$.

Q48 — Qual é a aceleração média da bolinha no trecho AB?

Q49 — A força que age sobre a bolinha na calha é uma força constante. Podemos então concluir que a aceleração média calculada na questão anterior é constante em todos os pontos do trecho AB?

R₄₀ -

R₄₁ -

R₄₂ -

R₄₃ -

R₄₄ -

R₄₅ -

R₄₆ -

R₄₇ -

R₄₈ -

R₄₉ -

R33 — Não, pois cada uma delas percorreu distâncias diferentes em tempos iguais.

R34 — A) $\frac{0,77}{0,4} = 1,9\text{m/s}$;

B) $\frac{0,64}{0,4} = 1,6\text{m/s}$;

C) $\frac{0,40}{0,4} = 1,0\text{m/s}$;

D) $\frac{0,21}{0,4} = 0,5\text{m/s}$.

R35 — A esfera A, em queda livre, teve a maior velocidade média; a esfera D, que rolou pela calha mais próxima da horizontal, teve a menor velocidade média.

	I	II	III	IV
	v (m/s)	Δv (m/s)	Δt (s)	a (m/s/s)
A	3,35	3,35	0,35	9,58
B	2,74	2,74	0,35	7,84
C	1,79	1,79	0,35	5,10
D	0,93	0,93	0,35	2,66

R40 — A bolinha A tem maior aceleração.

R41 — É zero.

R42 — 70cm.

R43 — Um valor entre 1,7s a 1,9s.

R44 — Um valor entre 38cm/s a 40cm/s.

R45 — Um valor entre 38cm/s a 40cm/s.

R46 — Um valor entre 38cm/s a 40cm/s.

R47 — Um valor entre 1,2s a 1,4s.

R48 — Um valor entre 29cm/s² a 31 cm/s².

R49 — Sim; se a força que age é constante, a aceleração também será.

9. Exercícios de aplicação II

E5 — Descreva situações em que se evidencia a existência da inércia dos corpos.

E6 — Sob que condições um corpo pode ter um movimento acelerado? Como se deve proceder para medir sua aceleração?

E7 — A velocidade de um foguete variou de 4 000km/h a 7 600km/h em duas horas.

a) Qual foi a sua aceleração média em $\frac{\text{km/h}}{\text{s}}$?

b) E em $\frac{\text{m/s}}{\text{s}}$?

E8 — Um corpo em queda livre tem aceleração de $9,8 \frac{\text{m/s}}{\text{s}}$.

a) De quanto varia sua velocidade em cada segundo?

b) Se sua velocidade inicial é zero, qual será sua velocidade 10 segundos depois?

E9 — Numa estrada horizontal, um automóvel mantém velocidade constante de 120km/h, enquanto que outro se mantém à velocidade de 50km/h. Qual deles apresenta maior aceleração?

E10 — Certo corpo é puxado sobre uma superfície horizontal lisa, por meio de

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

uma mola mantida em distensão constante; verifica-se que o corpo adquire uma aceleração de 15cm/s^2 . Qual será a aceleração do corpo se ele for puxado por duas molas, colocadas lado a lado, cada uma exatamente igual à primeira e distendidas igualmente (e com distensão igual à da primeira)?

E11 — Um corpo indeformável, que está submetido somente a duas forças que se equilibram:

- a) está necessariamente em movimento retilíneo e uniforme;
- b) está necessariamente parado;
- c) Não pode ficar imóvel porque sobre ele agem duas forças;
- d) pode ter movimento curvilíneo, desde que o valor da velocidade seja constante;
- e) pode permanecer imóvel ou em movimento retilíneo e uniforme.

E12 — Certa força, exercida durante $1,2\text{s}$, eleva a velocidade de um objeto de $1,8\text{m/s}$ a $4,2\text{m/s}$. Em seguida, esta mesma força é aplicada durante $2,0\text{s}$; de quanto varia a velocidade do objeto nesse intervalo de tempo?

E13 — Um corpo, que estava inicialmente em repouso sobre uma superfície lisa (atrito desprezível), fica sujeito a uma força horizontal constante, que lhe dá uma aceleração de 2m/s^2 . Após 5 segundos, a ação dessa força cessa; qual a distância percorrida por esse corpo nos próximos 3 segundos?

E14 — Um corpo é puxado por uma força constante da esquerda para a direita. Ele parte do repouso e sua velocidade aumenta de $0,20\text{m/s}$ durante os primeiros $0,40\text{s}$.

- a) Qual a velocidade do corpo após $2,0\text{s}$?
- b) Findos esses $2,0$ segundos, retira-se a força que age da esquerda para a direita e passa-se a puxar o disco com uma força igual, mas dirigida no sentido oposto. Quanto tempo o corpo demora para parar?

R₅ -

R₆ -

R₇ - a) b)

R₈ - a) b)

R₉ -

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R₁₃ -

R₁₄ - a)

b)

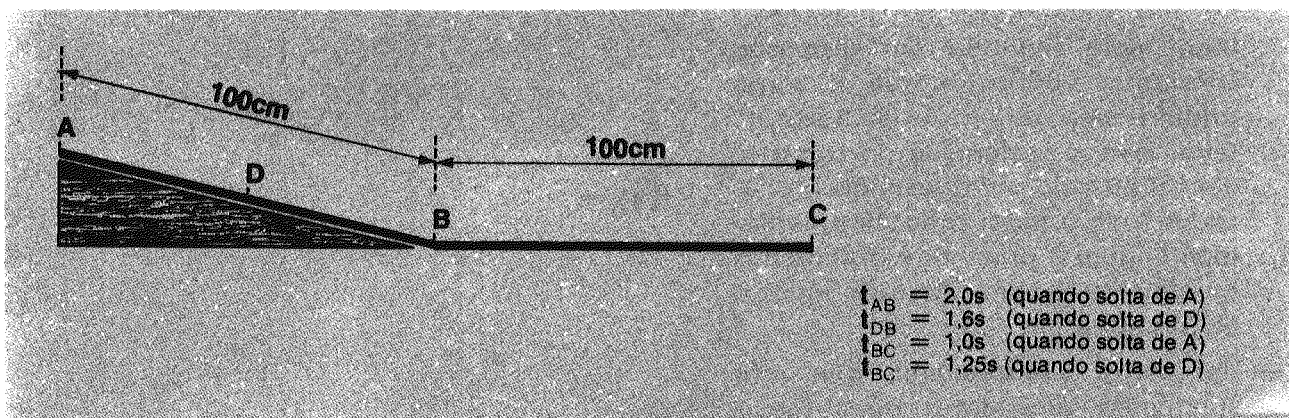


figura 17

$\Delta t = 0,25$

ESCALA : cada 1cm corresponde a 5 cm

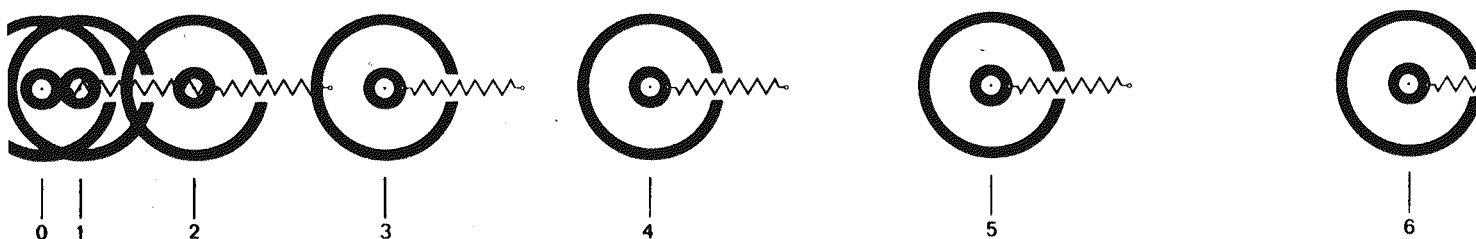


figura 18

E15 — Abandonando-se uma esfera sobre uma calha semelhante à da figura 17, obtiveram-se os dados que constam na figura.

Calcule:

- a) Velocidade em B (solta de A);
- b) Velocidade em B (solta de D);
- c) Aceleração em AB (solta de A);
- d) Aceleração em DB (solta de D).

E16 — A figura 18 representa um disco que estava inicialmente em repouso e que puxado por uma mola entra em movimento passando pelas posições 1, 2, 3, 4, 5 e 6. O intervalo de tempo entre a passagem por uma posição e a seguinte é de 0,25 segundo.

- a) Calcule as velocidades instantâneas do disco nas posições 1, 2, 3, 4 e 5.
- b) Calcule as variações de velocidade entre cada posição e a seguinte, lembrando que na posição zero sua velocidade é 0cm/s.
- c) A força que age sobre o corpo é constante? Por quê?
- d) Qual a aceleração do movimento?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁₅ - a) c)

b) d)

R₁₆ - a)

b)

c)

d)

figura 20

v (m/s)

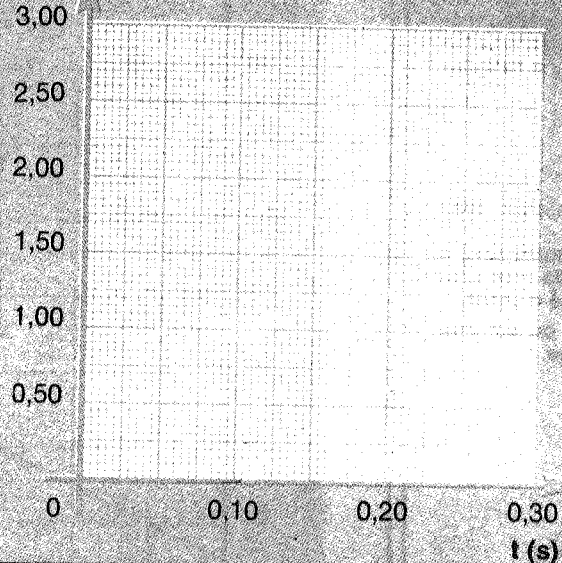


tabela 6

t (s)	0,05	0,10	0,20	0,30
v (m/s)	0,48	0,95	1,94	2,90

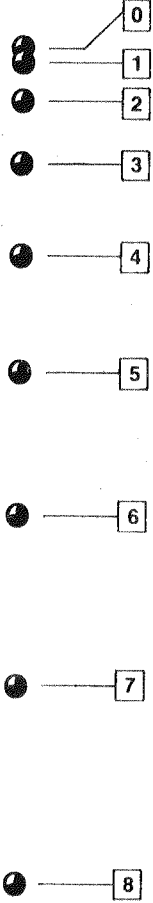


figura 19

10. Movimento com aceleração constante

RESPOSTAS

A fotografia estroboscópica da figura 19 mostra uma esfera caindo. O intervalo de tempo entre instantâneos sucessivos é de 0,05 segundo, e a escala é de 1:7.

Vamos estudar o movimento dessa esfera construindo o gráfico da velocidade em função do tempo. Os dados da tabela 6 foram obtidos a partir da figura e fornecem as velocidades e os instantes correspondentes.

Com esses dados construa o gráfico v x t na figura 20.

Q50 — Qual o aspecto do gráfico obtido?

Q51 — A velocidade da esfera é constante durante a queda?

O movimento da esfera é acelerado e o gráfico v x t é uma reta que passa pela origem.

Quando o gráfico v x t é uma reta passando pela origem, que informação, sobre a aceleração, nos fornece esse gráfico?

Esse gráfico indica que Δv é proporcional a Δt , e portanto $\Delta v = a \Delta t$ (veja Grandezas Proporcionais, Cap. 4).

R₅₀ -

R₅₁ -

R5 — Veja discussão à página 6-4 e figura 3.

R6 — Quando sobre ele age uma força não equilibrada. Para medir a aceleração média no intervalo t_1 a t_2 determinam-se as velocidades v_1 em t_1 e v_2 em t_2 e calcula-se:

$$\Delta v / \Delta t = (v_2 - v_1) / (t_2 - t_1).$$

R7 — a) 0,5km/h/s; b) 0,14m/s/s.

R8 — a) 9,8m/s; b) 98m/s.

R9 — Os dois têm aceleração zero, pois suas velocidades são constantes.

R10 — A aceleração com as duas molas será o dobro da aceleração adquirida com apenas uma mola porque a força é o dobro.

R11 — e) pode permanecer imóvel ou em movimento retilíneo e uniforme.

R12 — $\Delta v = 4\text{m/s}$.

R13 — 30m.

R14 — a) 1m/s; b) 2s.

R15 — a) 100cm/s; b) 80cm/s;
c) 50cm/s²; d) 50cm/s².

R16 — a) $v_1 = 20\text{cm/s}$ $v_2 = 40\text{cm/s}$
 $v_3 = 60\text{cm/s}$ $v_4 = 80\text{cm/s}$
 $v_5 = 100\text{cm/s}$;
b) 20cm/s para todos os intervalos;
c) Sim. A força é constante porque também são constantes as variações de velocidade;
d) $a = 80\text{cm/s}^2$.

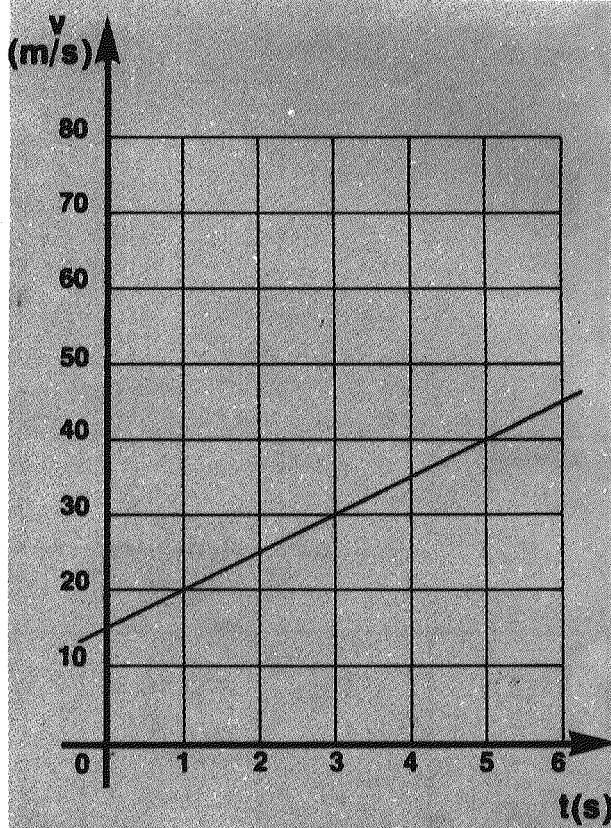


figura 21

Q52 — Pelo gráfico, determine Δv e Δt entre os instantes 0,05s e 0,10s.

Q53 — Qual o valor da constante $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$?

Q54 — Essa constante corresponde a alguma grandeza física conhecida? Qual?

Q55 — Determine a aceleração da bolinha no intervalo de $t = 0,20\text{s}$ a $t = 0,25\text{s}$.

Q56 — A aceleração da esfera varia durante o movimento?

Q57 — Sempre que o gráfico da velocidade em função do tempo para o movimento de um corpo for uma reta, a aceleração é constante?

Confira agora as suas respostas.

Se, no instante em que se começa a marcar o tempo (instante $t = 0$), o móvel já estava com velocidade diferente de zero, o gráfico $v \times t$ não passará pela origem.

Q58 — Qual é a velocidade inicial (no instante $t = 0$) do movimento cujo gráfico $v \times t$ é mostrado na figura 21?

Em casos como esse, a aceleração média do movimento pode ser calculada de modo idêntico ao que já vimos. Considera-se um intervalo Δt qualquer, e determina-se, pelo gráfico, qual a

variação de velocidade Δv ocorrida neste intervalo de tempo (figura 22).

No gráfico da figura 21, por exemplo, escolhendo-se $\Delta t = t_2 - t_1 = (5 - 3)\text{s}$, a variação correspondente da velocidade é $\Delta v = v_2 - v_1 (40 - 30)\text{km/h}$. Portanto, a aceleração média nesse intervalo é:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{10\text{km/h}}{2\text{s}} = 5\text{km/h/s}$$

Para qualquer outro intervalo de tempo que se considere, o valor encontrado para a aceleração será o mesmo, porque o gráfico é uma reta.

Q59 — Determine, a partir do gráfico da figura 21, a aceleração média considerando $\Delta t = (5 - 1)\text{s}$. Você obteve o mesmo resultado que anteriormente?

Se o gráfico de $v \times t$ é uma reta, a aceleração do movimento está relacionada com o ângulo que a reta forma com o eixo das abscissas. Observe o gráfico da figura 23, que representa as velocidades de dois móveis, A e B, em função do tempo.

Q60 — Qual das retas (a ou b) forma o maior ângulo com o eixo das abscissas?

Q61 — Qual das retas corresponde ao movimento que tem a maior aceleração? Por quê?

Confira as suas respostas.

RESPOSTAS

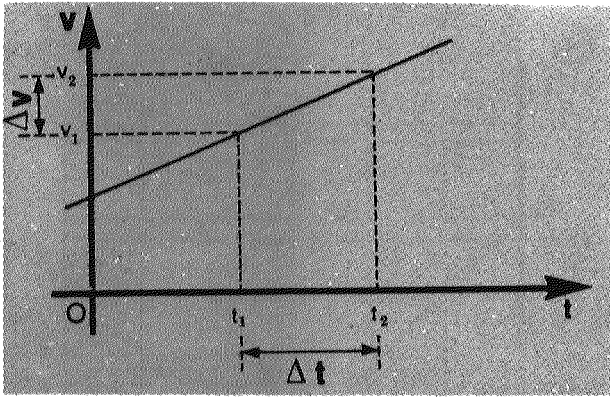


figura 22

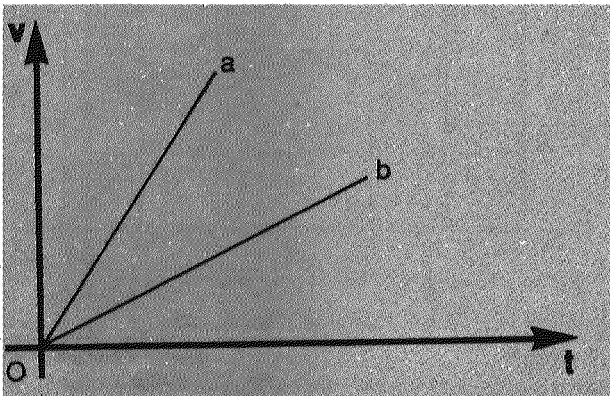


figura 23

11. Movimento com desaceleração constante

Em todos os movimentos acelerados que estudamos até agora a velocidade aumentava com o tempo. Será que só existe aceleração quando a velocidade aumenta?

Quando, num carro em movimento, o motorista usa os freios e faz a velocidade diminuir, não estará também provocando uma aceleração? Ora, a velocidade do carro diminui porque age sobre as rodas uma força não equilibrada em sentido contrário ao do movimento. Assim, as forças podem não só provocar aumento da velocidade de um móvel, mas também diminuição dessa velocidade, conforme sejam aplicadas no mesmo sentido ou em sentido contrário ao do movimento. Em qualquer um dos casos, como a velocidade está variando no decorrer do tempo, dizemos que o movimento é acelerado. No caso em que o valor da velocidade diminui, diz-se que o movimento é retardado ou desacelerado.

Um bom exemplo de um movimento desacelerado é o de uma cápsula espacial que retorna da Lua. Ao reentrar na atmosfera terrestre, a cápsula passa de uma velocidade v_1 igual a 40 000km/h para uma velocidade v_2 igual a 20 000km/h num intervalo de tempo de aproximadamente 3 minutos e 20 segundos.

R₅₂ -

R₅₃ -

R₅₄ -

R₅₅ -

R₅₆ -

R₅₇ -

R₅₈ -

R₅₉ -

R₆₀ -

R₆₁ -

R50 — É uma reta passando pela origem.

R51 — Não.

R52 — Pelo gráfico, verificamos que:

$$\begin{aligned} \Delta v &= 0,96 - 0,48 & \Delta v &= 0,48 \text{ m/s.} \\ \Delta t &= 0,10 - 0,5 & \Delta t &= 0,05 \text{ s.} \end{aligned}$$

$$R53 \text{ — } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0,48}{0,05} \quad a = 9,6 \text{ m/s}^2.$$

R54 — Sim, essa constante é a aceleração do movimento da esfera.

$$R55 \text{ — } \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2,40 - 1,92}{0,25 - 0,20} = \frac{0,48}{0,05} \quad a = 9,6 \text{ m/s}^2.$$

R56 — Não, essa aceleração média é constante dentro da precisão das medidas efetuadas.

R57 — Sim, ela é constante.

R58 — Aproximadamente 15m/s.

R59 — 5km/h/s. Sim.

R60 — A reta a.

R61 — A reta a, porque a um dado intervalo de tempo $t_2 - t_1$ corresponde uma variação maior de velocidade $v_2 - v_1$.

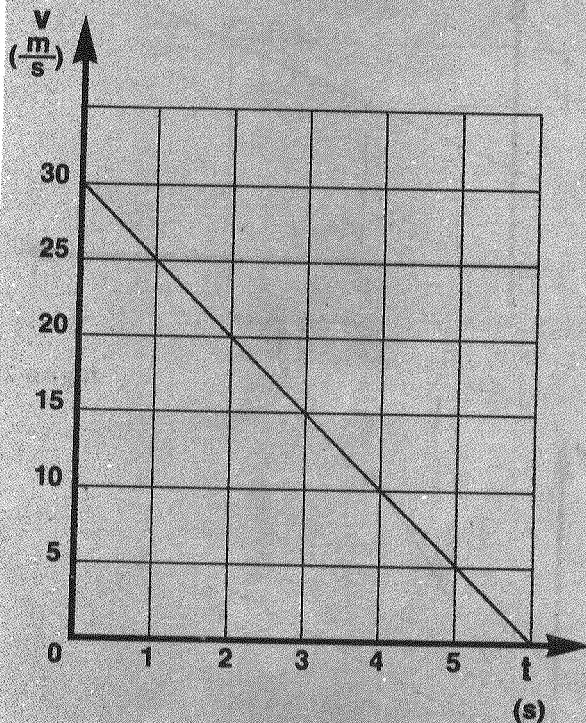


figura 24

A variação de sua velocidade é então
 $\Delta v = v_2 - v_1 = 20\,000 - 40\,000 = -20\,000 \text{ km/h}$

variação esta que se dá em

$$\Delta t = 3 \text{ min } 20 \text{ seg} = 200 \text{ s}$$

A aceleração média da cápsula é, portanto,

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{-20\,000}{200} = -100 \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$$

e é negativa, pois Δv é negativo.

Use o gráfico da figura 24 para responder às seguintes questões:

Q62 — A aceleração é constante? Por quê?

Q63 — Qual é a velocidade do móvel no instante $t = 0$?

Q64 — Qual a velocidade do móvel no instante $t = 3 \text{ s}$?

Q65 — A velocidade do móvel está aumentando ou diminuindo no decorrer do tempo?

Q66 — Em que instante o móvel pára?

Q67 — Qual é a aceleração do movimento? Confira as suas respostas.

12. Como calcular distâncias quando a aceleração é constante

O gráfico da figura 25 corresponde ao movimento de um carro que se move com velocidade constante.

Q68 — Qual é a velocidade do carro?

Q69 — Qual é a distância percorrida pelo carro nos 5 primeiros segundos?

Para determinar a distância percorrida pelo carro, você multiplicou sua velocidade (10m/s) pelo tempo de 5 segundos. Entretanto, examinando o gráfico, você pode observar o retângulo de base 5 (s) e altura 10 (m/s). Ao multiplicar 10 (m/s) por 5 (s), você determina a "área" desse retângulo. A unidade em que essa área é medida não é cm^2 ou m^2 ou qualquer outra unidade de área, pois os lados do retângulo não são medidos por meio de unidades de comprimento: um lado é medido em segundos, o outro em m/s. Calculando a "área", tem-se

$$10 \frac{\text{metros}}{\text{segundo}} \times 5 \text{ segundos} = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \text{s} = 50 \text{ m.}$$

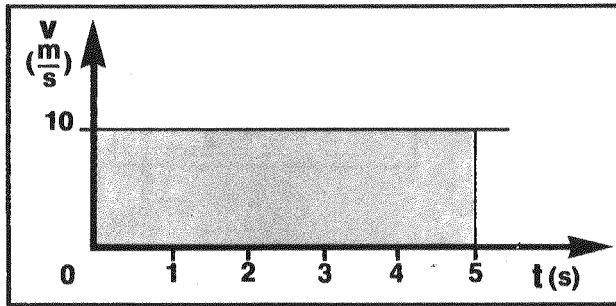


figura 25

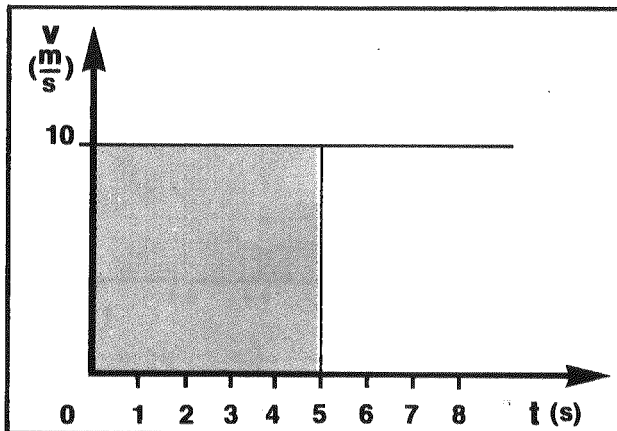


figura 26

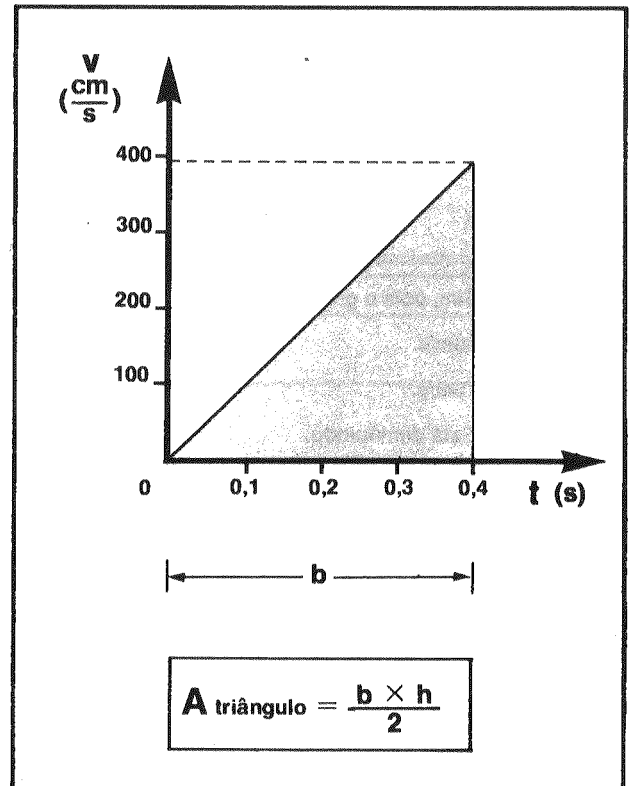


figura 27

Q70 — Em que unidade foi medida a área da região em cor da figura 25?

A escala usada para desenhar o gráfico não influi no valor da "área" calculada. Você pode verificar isso examinando o gráfico da figura 26 que corresponde ao mesmo movimento.

Apesar de ele estar construído em escala diferente, a área da região em cor é também 50m, pois os valores indicadores nos eixos são os mesmos que anteriormente.

No caso em que a velocidade do movimento é constante, o cálculo de distâncias por meio de uma área não lhe traz muitas vantagens, pois você sabe fazer isso eficientemente de outra forma. No entanto, esse método é muito útil quando a velocidade não é constante. Vejamos um exemplo.

O gráfico $v \times t$ da figura 27 foi feito a partir da análise da figura 19, que mostra uma bolinha caindo.

Q71 — Determine a área da região em cor no gráfico da figura 27 (note que a região em questão não é mais um retângulo, mas um triângulo).

Q72 — Qual é a unidade em que essa área é medida?

RESPOSTAS

R₆₂ -

R₆₇ -

R₆₃ -

R₆₈ -

R₆₄ -

R₆₉ -

R₆₅ -

R₇₀ -

R₆₆ -

R₇₁ -

- R62 — Sim, pois o gráfico é uma reta.
 R63 — 30m/s.
 R64 — 15m/s.
 R65 — Está diminuindo.
 R66 — No instante $t = 6s$, quando sua velocidade chega a 0m/s (veja o gráfico figura 24).
 R67 — $-5m/s^2$
 R68 — 10m/s.
 R69 — 50m.
 R70 — Em metros: $m/s \times s = m$.
 R71 — 80cm.

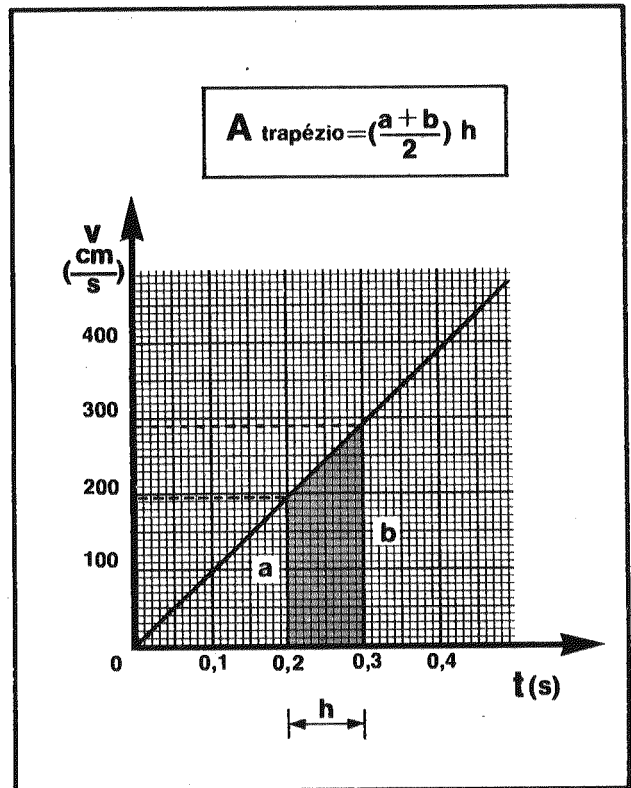


figura 28

- Q73** — Usando uma régua, determine a distância percorrida pela bola da figura 19 nos primeiros 0,4 segundo de movimento (não se esqueça de utilizar a escala para determinar a distância real).
Q74 — Compare os resultados encontrados para as questões 71 e 73. São iguais?
Q75 — Meça, na fotografia estroboscópica, a distância (real) percorrida entre os instantes $t = 0,20s$ (posição 4) e $t = 0,30$ (posição 6).
Q76 — Determine, no gráfico da figura 28, a área correspondente ao intervalo citado na questão anterior. Note que se trata de um trapézio.
Q77 — Os resultados das questões 75 e 76 são iguais?

Confira as suas respostas.

O gráfico da figura 29 representa a velocidade em função do tempo, para o movimento de um corpo que se move com aceleração constante.

- Q78** — Qual a distância percorrida pelo corpo nos 4 segundos que durou o movimento?
Q79 — Qual a distância percorrida pelo corpo entre os instantes $t = 2s$ e $t = 3s$?
Q80 — O espaço percorrido por um corpo em movimento é igual à área sob a curva no gráfico:
 a) distância x tempo;
 b) velocidade x tempo;
 c) aceleração x tempo;

- d) velocidade x distância;
 e) aceleração x distância.

Confira as suas respostas.

Para qualquer movimento, sempre que tivermos o gráfico da **velocidade em função do tempo**, poderemos calcular a distância percorrida, através do cálculo da "área" limitada pela curva e o eixo dos tempos.

13. Equações da velocidade e da distância para movimentos com aceleração constante

Quando a aceleração de um corpo é constante, o gráfico da velocidade em função do tempo é uma reta, como mostra a figura 30. A aceleração é dada por

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0} = \frac{v - v_0}{t - 0} = \frac{v - v_0}{t}$$

ou $at = v - v_0$ ou ainda: $v = v_0 + at$

Esta última equação nos permite calcular a velocidade do corpo em qualquer instante, desde que conheçamos a velocidade inicial v_0 e a aceleração a . Seja, por exemplo, um corpo que tem velocidade 2m/s em um determinado instante e cuja aceleração (constante) é igual a $5m/s^2$.

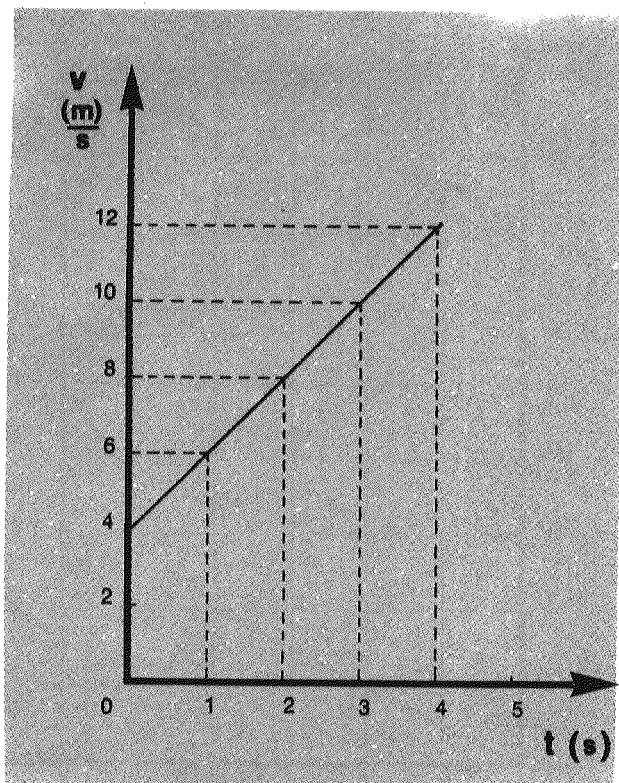


figura 29

Calculemos a velocidade desse corpo 4 segundos após.

Na equação $v = v_0 + at$, devemos substituir os valores $v_0 = 2\text{m/s}$, a 5m/s^2 , $t = 4\text{s}$. Obtemos, então, $v = 2 + 5 \times 4$, ou seja, $v = 22\text{m/s}$.

Q81 — Um corpo inicialmente com velocidade 5m/s é acelerado com aceleração constante igual a 2m/s^2 . Qual é a velocidade do corpo 10 segundos depois?

Confira a sua resposta.

Da mesma forma que para a velocidade, podemos estabelecer uma equação que nos forneça o espaço em função do tempo para um movimento com aceleração constante.

Vimos que num gráfico $v \times t$ a área abaixo da reta fornece o espaço percorrido pelo corpo. Calculemos essa área em um caso genérico (figura 31). O espaço percorrido e é dado pela área do trapézio em cor

$$e = \frac{v + v_0}{2} t$$

Mas sabemos que $v = v_0 + at$

Substituindo, vem:

$$e = \frac{v_0 + at + v_0}{2} t = \frac{2v_0 + at}{2} t \quad \text{ou}$$

$$e = v_0 t + \frac{1}{2} at^2.$$

A equação acima nos permite calcular a distância percorrida por um corpo conhecendo sua velocidade inicial, sua aceleração e o tempo.

Façamos isso em um exemplo: Um corpo está-se movendo com velocidade de 2m/s quan-

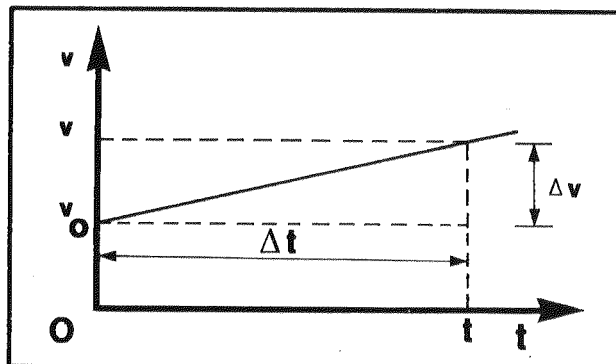


figura 30

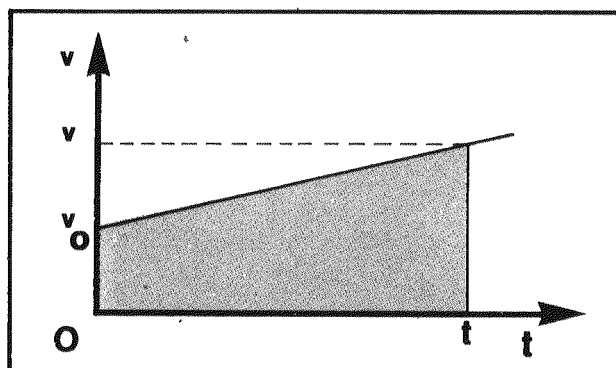


figura 31

RESPOSTAS

R₇₂ -

R₇₃ -

R₇₄ -

R₇₅ -

R₇₆ -

R₇₇ -

R₇₈ -

R₇₉ -

R₈₀ -

R₈₁ -

R24 — a) 12m/s; b) 16m.

R25 — a) 260km;
b) 20km/h/h, 0km/h/h, 10km/h/h,
-20km/h/h.

R26 — a) 55m; b) 8m/s²;
c) no instante zero segundo;
d) nos instantes 2,7s e 3,9s.

R27 — a) 0,030h; b) 300m; c) 0,060h;
d) $\frac{200}{3}$ km/h/h; e) 0km/h/h.

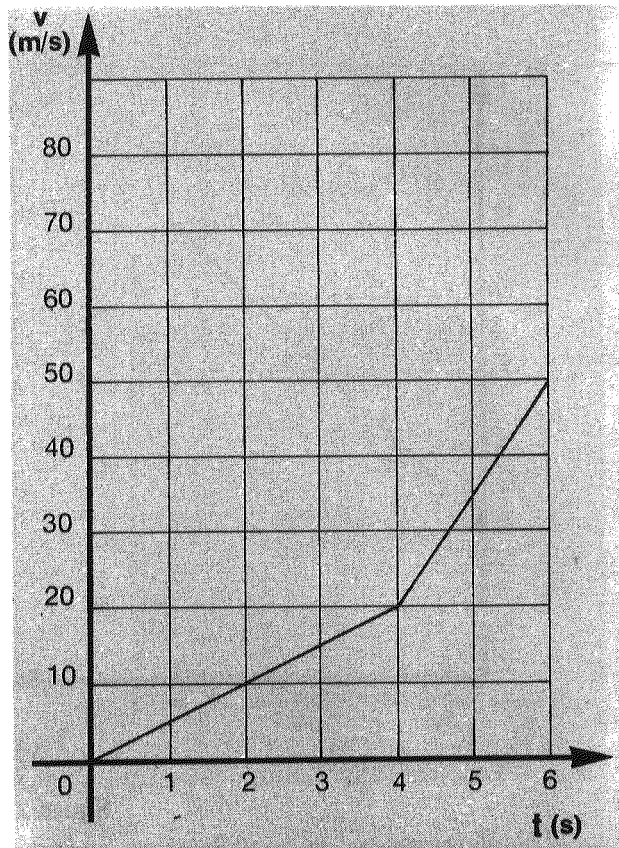


figura 32

do passa por um determinado ponto; ele tem uma aceleração constante, igual a 4m/s^2 . Qual a distância percorrida pelo corpo após 3 segundos?

Devemos substituir na equação

$$e = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

os valores $v_0 = 2\text{m/s}$, $a = 4\text{m/s}^2$ e $t = 3\text{s}$.
Obtemos, assim,

$$e = 2 \times 3 + \frac{1}{2} 4 \times 9 = 6 + 18; e = 24\text{m}.$$

Q82 — Qual o espaço percorrido em 4 segundos por um corpo que, inicialmente parado, foi acelerado com aceleração de 2m/s^2 ?

R72 — Centímetros.

R73 — 77,0cm.

R74 — São aproximadamente iguais.

R75 — 24,0cm.

R76 — 24,0cm.

R77 — Sim, dentro da precisão das medidas.

$$\text{R78 — } e = \frac{(4+12)}{2} \times 4; e = 32\text{m}.$$

$$\text{R79 — } e = \frac{(10+8)}{2} \times 1; e = 9\text{m}.$$

R80 — b) velocidade \times tempo.

$$\text{R81 — } v = 5 + 2 \times 10 = v = 25\text{m/s}.$$

14. Movimento com aceleração variável

Quando um movimento tem aceleração constante, o gráfico da velocidade em função do tempo é uma reta. A aceleração pode ser avaliada pela medida do ângulo que a reta forma com o eixo das abscissas.

Q83 — O movimento representado pelo gráfico $v \times t$ da figura 32 apresentou sempre a mesma aceleração?

Q84 — Em que instante a aceleração mudou de valor?

Q85 — Quais os valores da aceleração em cada um dos trechos retilíneos?

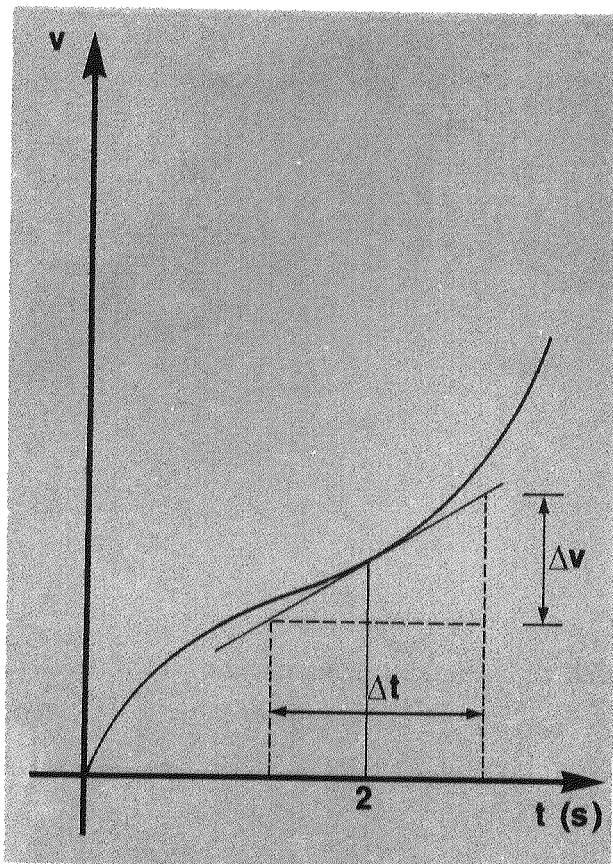


figura 33

Se o gráfico $v \times t$ não apresentar nenhum trecho retilíneo, indica que a aceleração varia continuamente. No entanto, mesmo neste caso, pode-se determinar a aceleração em cada instante. Para isso, basta traçar a tangente à curva no ponto correspondente ao instante em que se quer determinar a aceleração. O ângulo que essa tangente forma com o eixo das abscissas está relacionado com a aceleração do móvel naquele instante.

A figura 33 corresponde ao gráfico $v \times t$ de um movimento, cuja aceleração variou continuamente. Para determinar a aceleração no instante $t = 2s$, por exemplo, traçamos a reta tangente à curva no ponto correspondente a esse instante.

Essa tangente indica como seria o gráfico da velocidade se o móvel tivesse sempre a mesma aceleração que tem no instante 2 segundos.

Para determinar a aceleração, procede-se da seguinte forma em relação à reta tangente. Considera-se dois pontos **sobre a reta tangente**, determina-se Δv e Δt . Dividindo Δv por Δt , obtém-se a aceleração procurada. Para determinar a aceleração em outros instantes, é necessário traçar as tangentes pelos pontos correspondentes e proceder da mesma maneira.

Q86 — A figura 34 corresponde ao gráfico $v \times t$ de um móvel. Determine, pela figura, as acelerações do móvel nos instantes 1, 3 e 5 segundos.

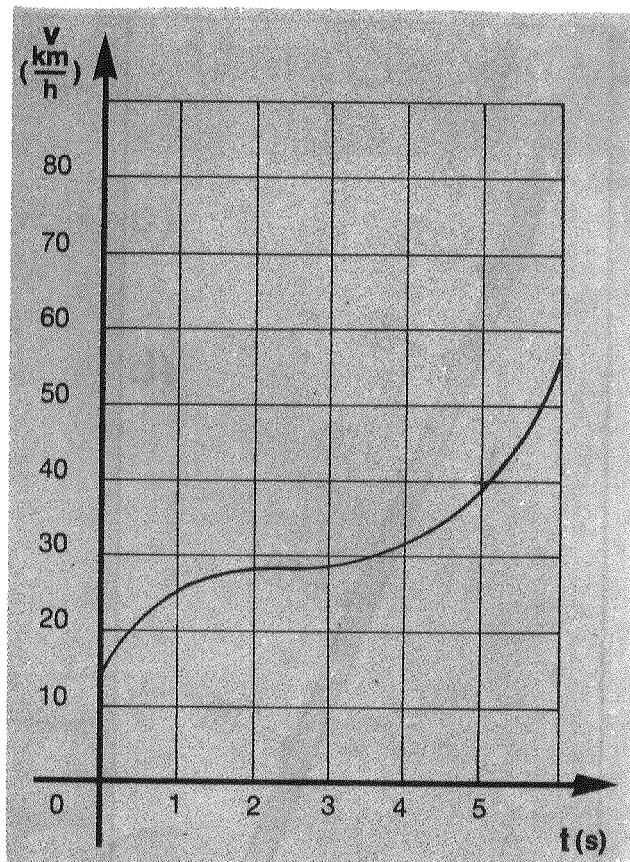


figura 34

RESPOSTAS

R₈₂ -

R₈₃ -

R₈₄ -

R₈₅ -

R₈₆ -

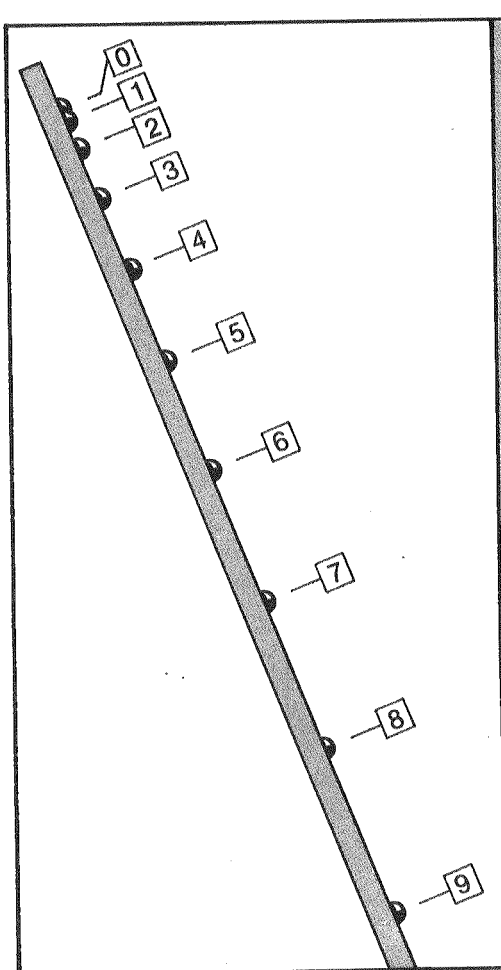
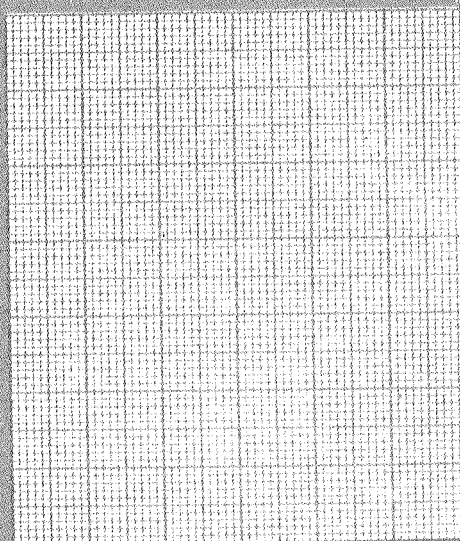


figura 35

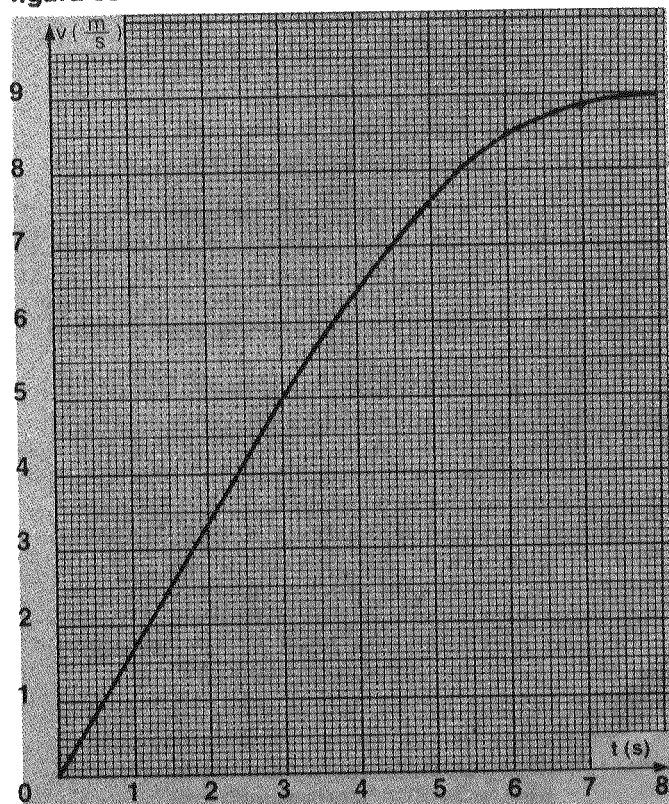
figura 36



Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocidade	0								
Tempo	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40

tabela 7

figura 38



R82 — $e = 0 + \frac{1}{2} \times 2 \times 4^2 = 16m.$

R83 — Não. Sua aceleração é constante de 0 a 4s e novamente constante mas com valor maior de 4 a 6s.

R84 — No instante 4s.

R85 — Entre 0 e 4s a aceleração é constante e vale $5m/s^2$; entre 4 e 6s a aceleração é constante e vale $15m/s^2$.

R86 — $6,3km/h/s$; $1,9km/h/s$; $9,7km/h/s$.

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

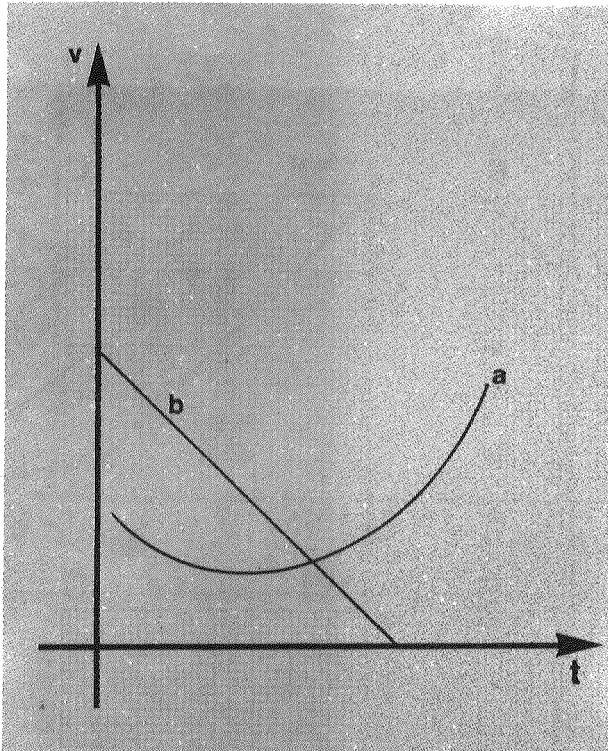


figura 37

15. Exercícios de aplicação III

E17 — A figura 35 é o desenho de uma fotografia estroboscópica de uma esfera rolando em uma calha inclinada. O intervalo de tempo entre instantâneos sucessivos é de 0,05 segundo e cada 1cm do desenho corresponde a 0,07 metro na escala real. Na posição 0 (zero) a esfera estava parada.

- Determine, em m/s, as velocidades instantâneas da esfera nas posições 1, 2 etc. e preencha a tabela 7.
- Construa, na figura 36, o gráfico da velocidade em função do tempo.
- A aceleração da esfera é constante?
- Qual o valor da aceleração?

E18 — Qual dos gráficos $v \times t$ da figura 37 corresponde a um movimento com aceleração constante? Por quê?

E19 — A figura 38 representa o gráfico $v \times t$ do início da subida de um balão.

- Em qual intervalo de tempo a aceleração foi constante?
- Qual foi o valor dessa aceleração?
- Qual foi a aceleração no instante 5 segundos?
- Qual foi a distância percorrida nos dois primeiros segundos?
- Qual foi a distância percorrida desde $t = 5s$ até $t = 8s$?

R₁₇ - c)

d)

R₁₈ -

R₁₉ - a)

b)

c)

d)

e)

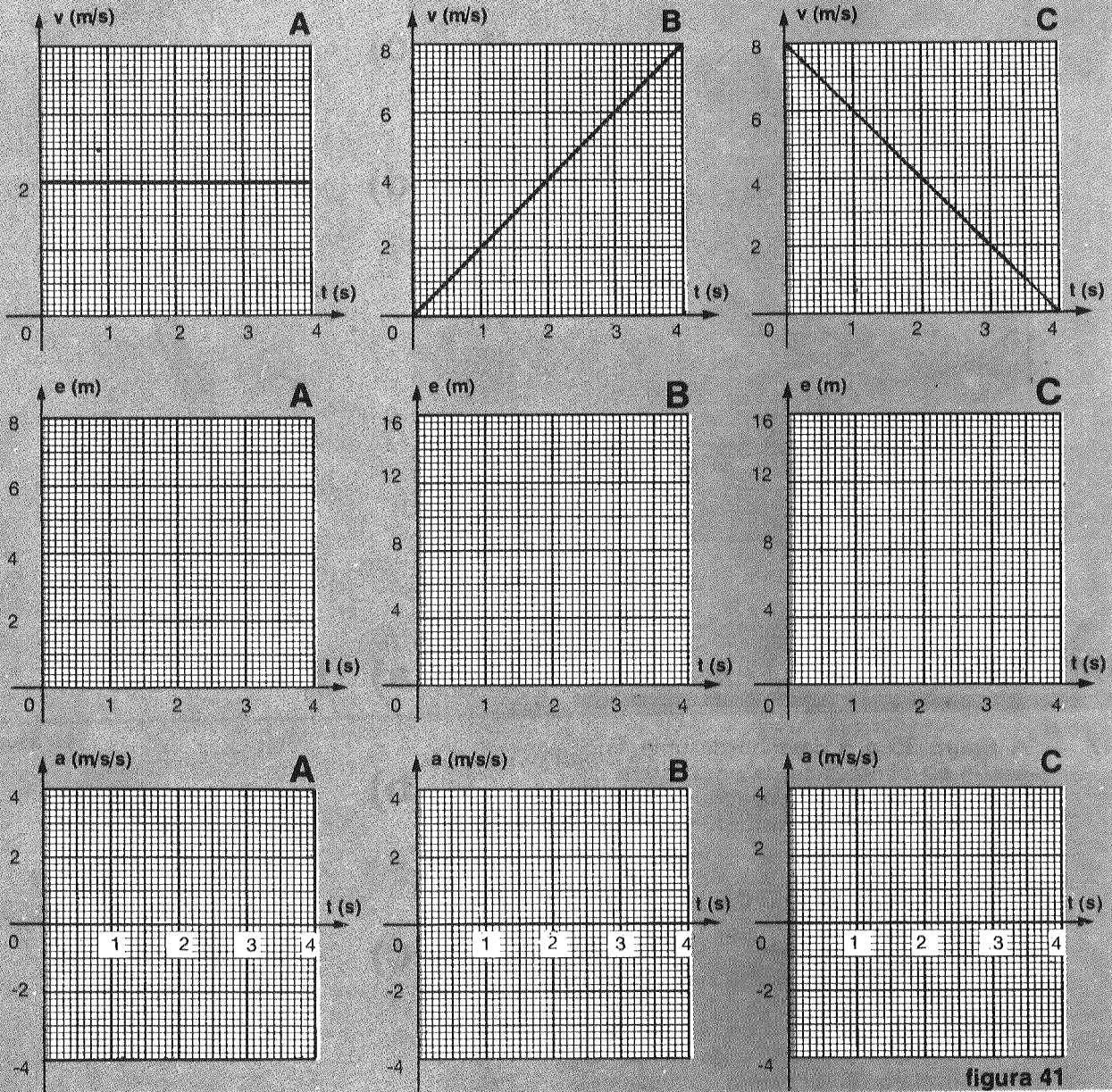


figura 41

- R17 — a) posição 1 — 0,40; 2 — 0,78; 3 — 1,20; 4 — 1,62; 5 — 2,00; 6 — 2,41; 7 — 2,79; 8 — 3,14 m/s.
 b) o gráfico é uma reta que passa pela origem e pelo ponto (0,40; 3,14).
 c) Sim; d) 7,9 m/s/s.
- R18 — O gráfico (b), porque é uma reta e portanto $v = v_0 + at$ (com a negativo).
- R19 — a) 0,0s a 3,0s; b) 5/3 m/s/s;
 c) aproximadamente 1,1 m/s/s;
 d) aproximadamente 3,3m; e) 24,8 m.

tabela 8

Δt \ e	A	B	C
0 — 1			
0 — 2			
0 — 3			
0 — 4			

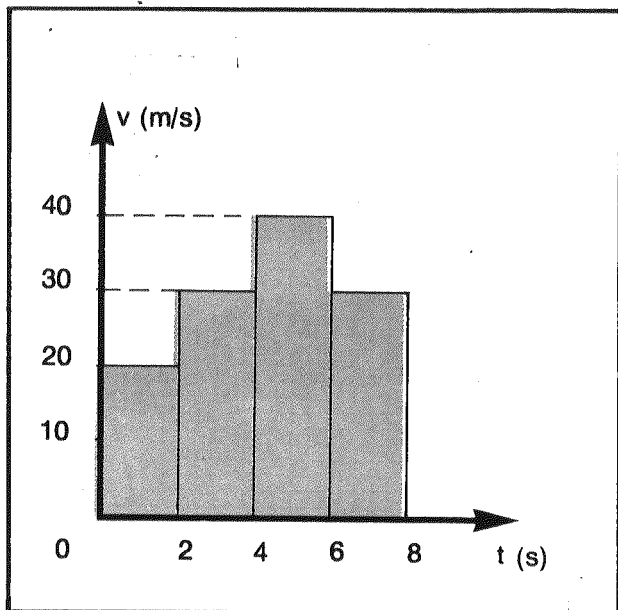


figura 39

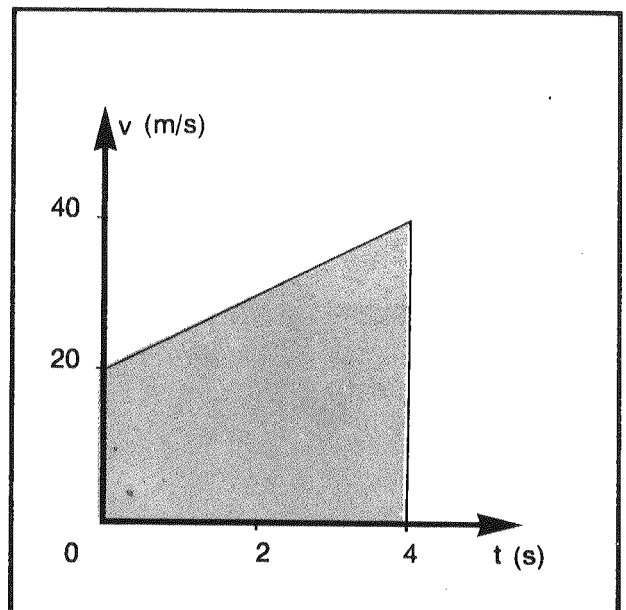


figura 40

- E20** — A figura 39 mostra o gráfico da velocidade em função do tempo para um corpo.
- Determine o espaço percorrido pelo corpo durante os primeiros 4 segundos.
 - Determine o espaço total percorrido pelo corpo durante os 8 segundos.
- E21** — Determine o espaço percorrido no intervalo de tempo de 0 a 4s pelo móvel cujo gráfico $v \times t$ está representado na figura 40.
- E22** — A figura 41 mostra os gráficos de velocidade em função do tempo de três corpos diferentes A, B e C.
- Determine para cada móvel os espaços percorridos desde o instante $t = 0$ até $t = 1s$, $t = 2s$, $t = 3s$ e $t = 4s$. Preencha a tabela 8.
 - Construa na figura 41 os gráficos do espaço $e \times t$ para cada um dos movimentos. Para construir esse gráfico, você deverá colocar a distância total percorrida desde o instante zero até cada um dos instantes da tabela.
 - Construa na figura 41 os gráficos da aceleração $a \times t$ para cada um dos movimentos.
- E23** — Um corpo partiu do repouso, com aceleração constante de $2m/s^2$. Calcule:
- A velocidade do corpo 5 segundos depois.
 - A distância percorrida pelo corpo desde que partiu até 5 segundos depois.

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₂₀ - a)

b)

R₂₁ -

R₂₃ - a)

b)

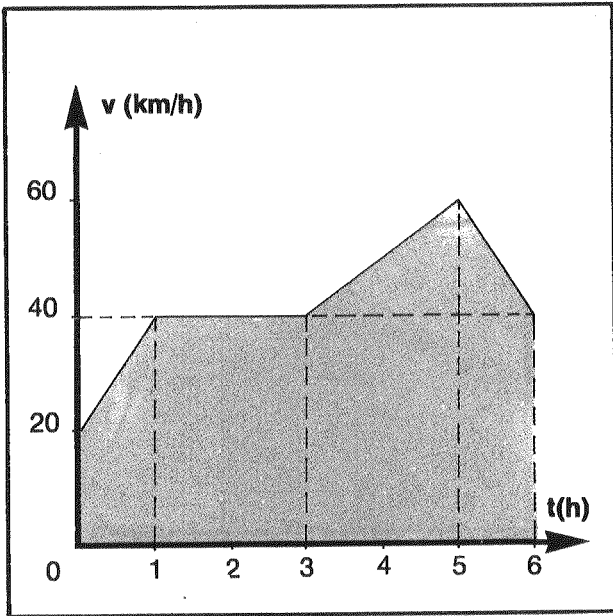


figura 42

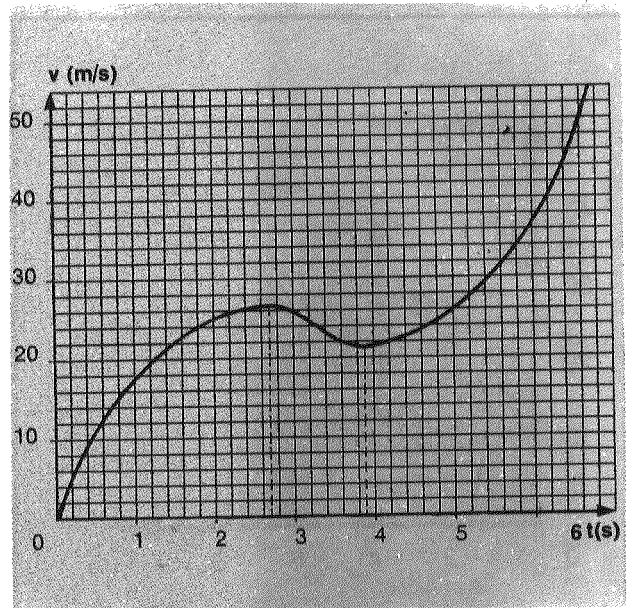


figura 43

R20 — a) 100m;

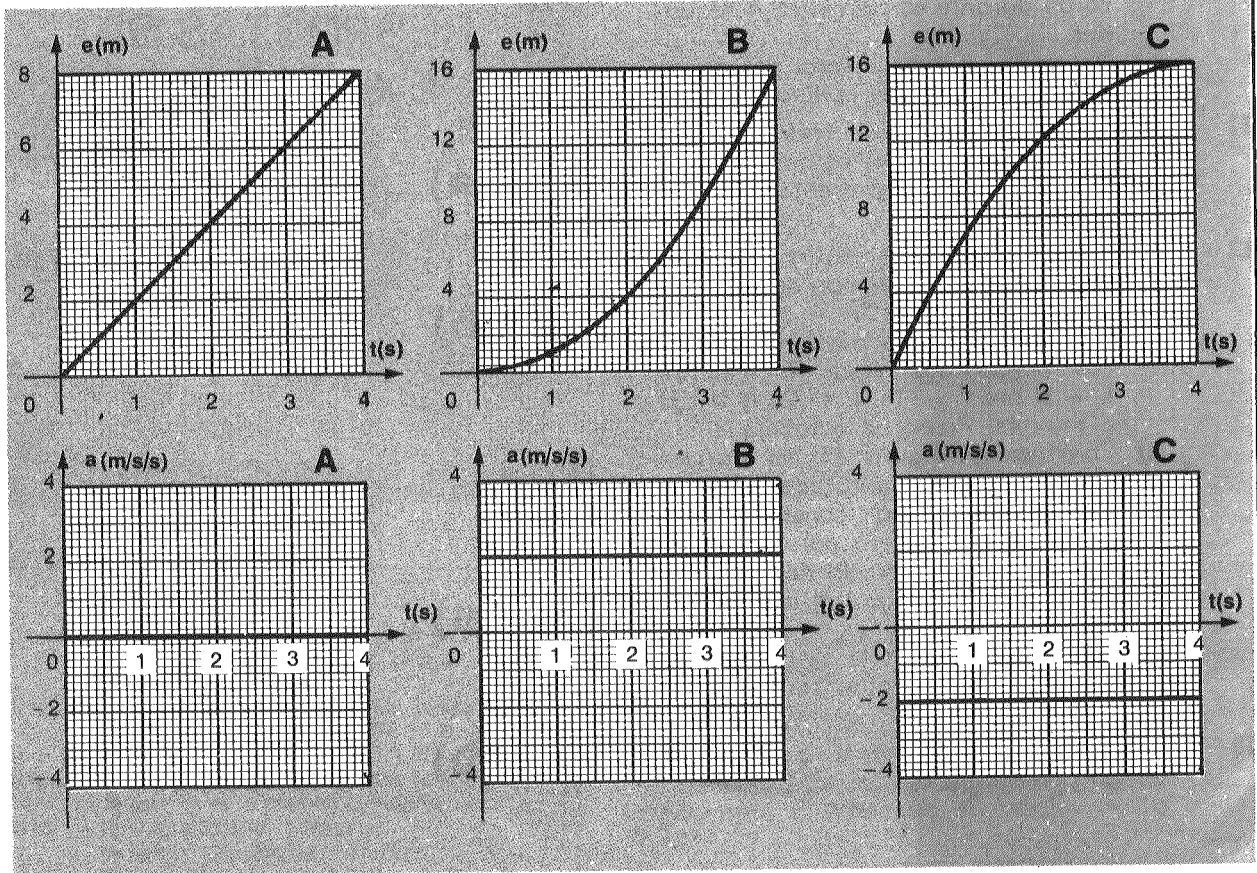
b) 240m.

R21 — 120m.

R23 — a) 10m/s;

b) 25m.

R22



RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

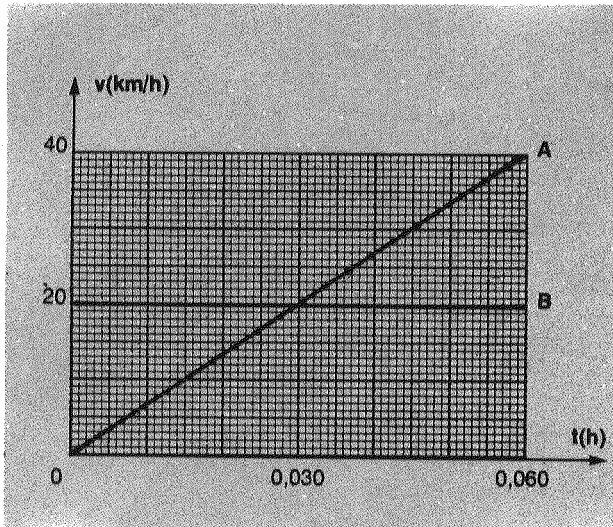


figura 44

- E24** — Um móvel passou por um certo ponto A com velocidade 4m/s . A partir desse ponto, seu movimento apresentou aceleração constante de 4m/s^2 . Calcule:
- A velocidade do corpo 2 segundos após ele ter passado pelo ponto A.
 - A distância percorrida pelo corpo nos 2 primeiros segundos a partir desse ponto.
- E25** — Utilizando o gráfico da figura 42:
- Determine o espaço percorrido nas 6h que durou o movimento.
 - Determine as acelerações nos intervalos de tempo de: 0h a 1h, 1h a 3h, 3h a 5h, 5h a 6h.
 - Construa o gráfico da aceleração em função do tempo.
- E26** — O movimento de um corpo é descrito pelo gráfico da figura 43.
- Determine o espaço percorrido no intervalo de 0 a 3 segundos.
 - Determine a aceleração no instante 1s.
 - Em que instante a aceleração é máxima?
 - Em que instante (ou instantes) a aceleração é nula?
- E27** — O carro A está parado em frente a um sinal de trânsito. Quando a luz verde se acende, A se põe em movimento: nesse instante, um carro B, que se move com velocidade constante, ultrapassa A. A figura 44 mostra os gráficos $v \times t$ de ambos os veículos.
- Em que instante a velocidade de A ficou igual à de B?
 - Nesse instante, qual é a distância entre os carros A e B?
 - Em que instante o carro A alcançará o carro B?
 - Qual a aceleração do carro A?
 - Qual a aceleração do carro B?

R₂₄ - a)

b)

R₂₅ - a)

b)

R₂₆ - a)

b)

c)

d)

R₂₇ - a)

b)

c)

d)

e)

Preço: ver tabela

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.

ISBN 85-222-0160-9