

# Capítulo 2

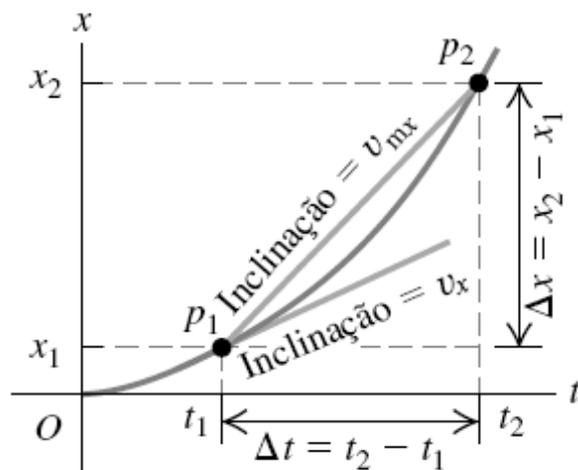
---

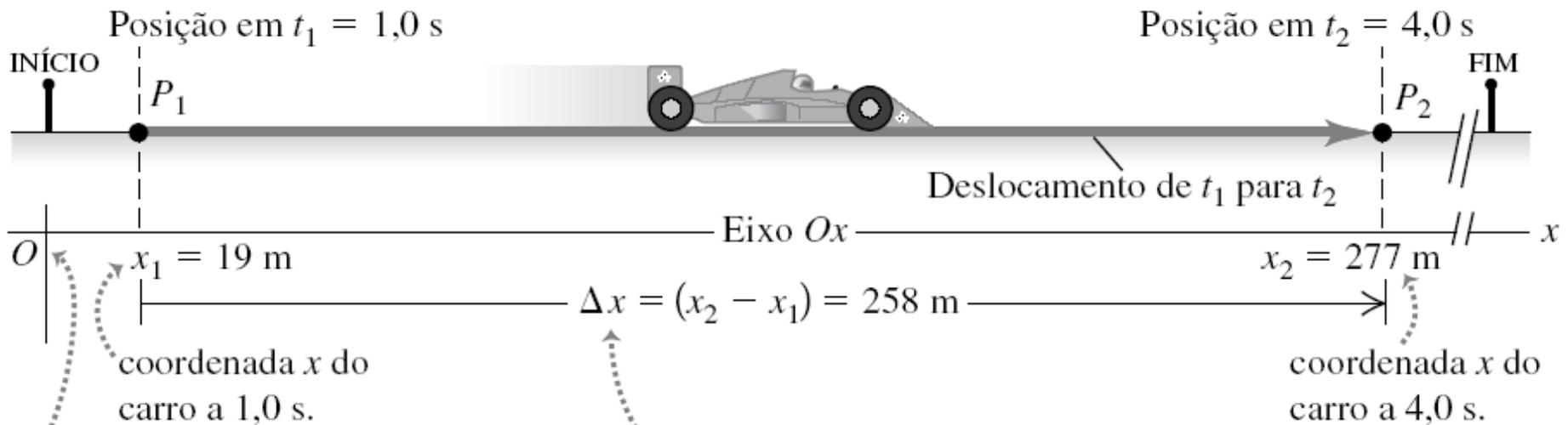
## Movimento Retilíneo

**Movimento retilíneo, velocidade média e velocidade instantânea:** quando uma partícula se move em linha reta, descrevemos sua posição em relação à origem  $O$  especificando uma coordenada tal como  $x$ . A velocidade média da partícula  $v_{mx}$  em um intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$  é igual ao seu deslocamento  $\Delta x = x_2 - x_1$  dividido por  $\Delta t$ . A velocidade instantânea  $v_x$  em qualquer instante  $t$  é igual à velocidade média para o intervalo de tempo entre  $t$  e  $t + \Delta t$  até o limite em que  $\Delta t$  seja zero. Da mesma forma,  $v_x$  é a derivativa da função posição em relação ao tempo.

$$v_{mx} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (2.3)$$



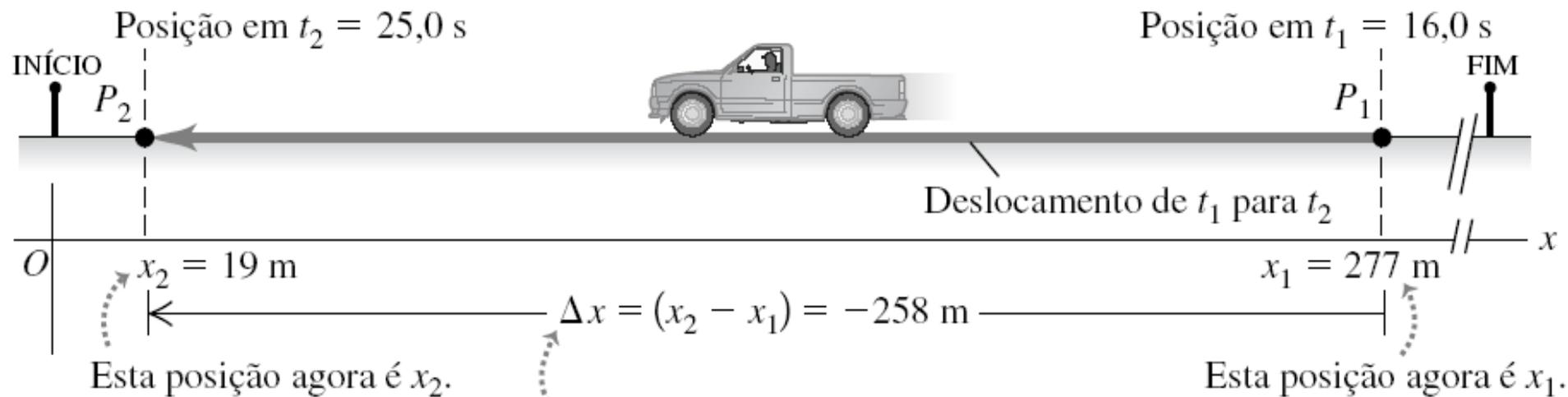


$x$  é positivo à direita do ponto de origem ( $O$ ), e negativo à esquerda dele.

Quando o carro se move na direção  $+x$ , o deslocamento  $\Delta x$  é positivo, assim como a velocidade média  $x$ :

$$v_{mx} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{258 \text{ m}}{3,0 \text{ s}} = 86 \text{ m/s}$$

**Figura 2.1** Posição de um carro de corrida em dois instantes de sua trajetória.

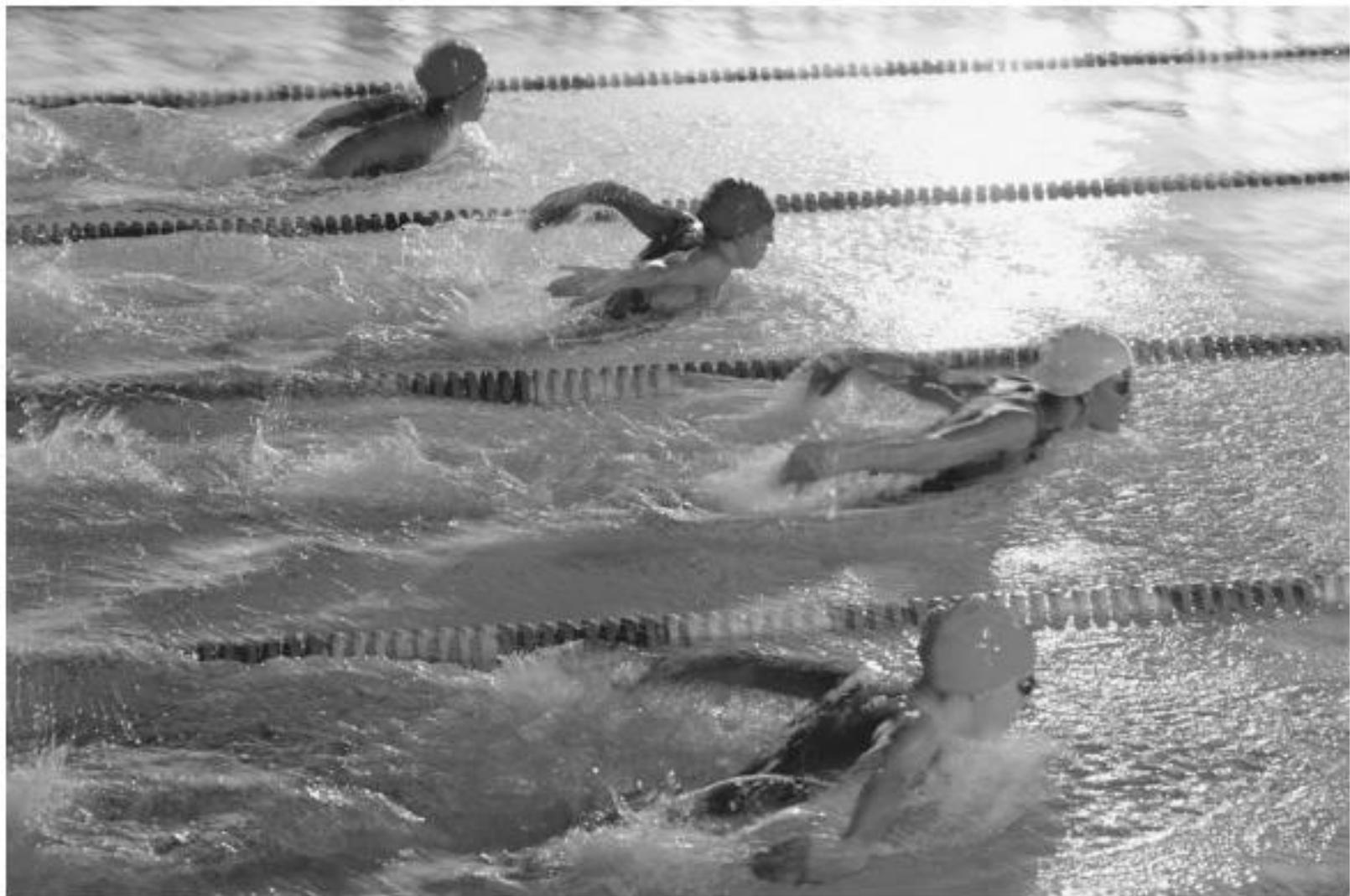


Quando a caminhonete se move na direção  $-x$ , o deslocamento  $\Delta x$  é negativo, assim como a velocidade média é negativa:

$$v_{\text{mx}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-258 \text{ m}}{9,0 \text{ s}} = -29 \text{ m/s}$$

**Figura 2.2** Posições de uma caminhonete em dois instantes durante seu movimento. Os pontos  $P_1$  e  $P_2$  referem-se agora ao deslocamento da caminhonete, de modo que eles são diferentes dos pontos da Figura 2.1.



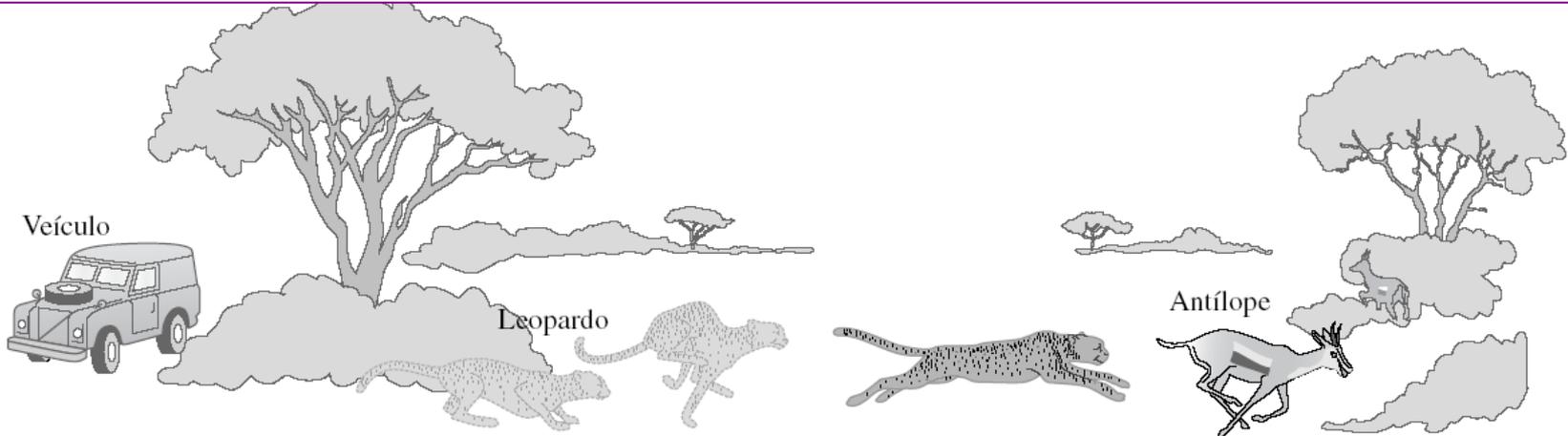


**Figura 2.4** O vencedor de uma competição de natação de 50 m é aquele que possui uma velocidade média cujo módulo é o maior de todos, ou seja, o nadador que percorrer a distância  $\Delta x$  de 50 m no menor intervalo de tempo  $\Delta t$ .

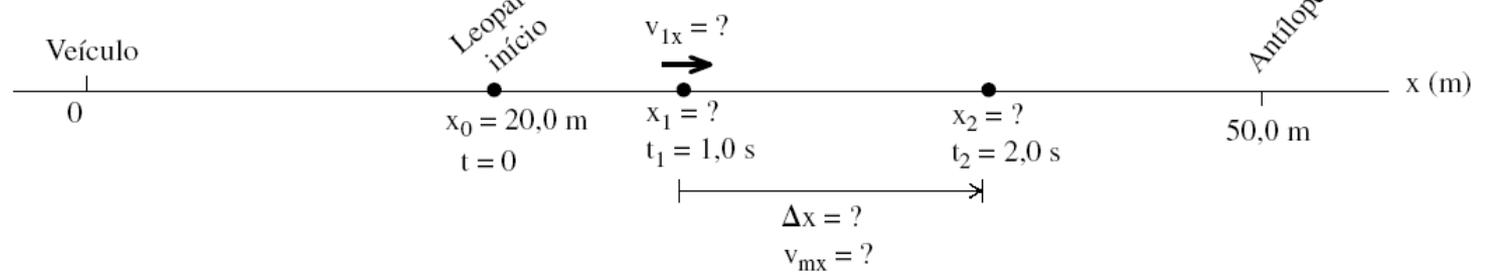


**Figura 2.5** Mesmo quando se move para a frente, a velocidade instantânea deste ciclista pode ser negativa – caso ele se desloque em relação a um eixo orientado no sentido negativo do eixo  $Ox$ . Ao resolver um problema, a escolha de qual sentido é positivo depende exclusivamente de você.

(a) A situação



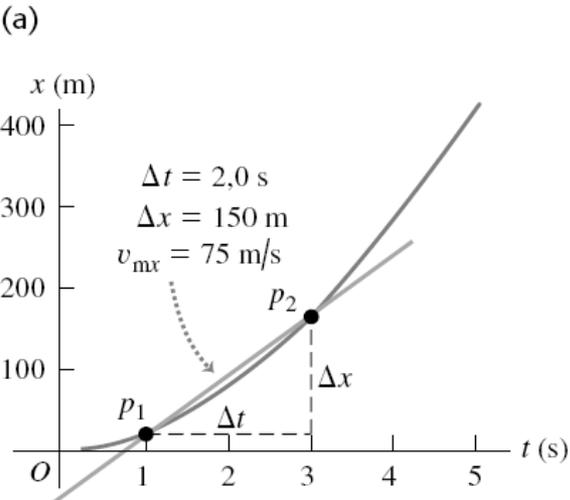
(b) Nosso desenho



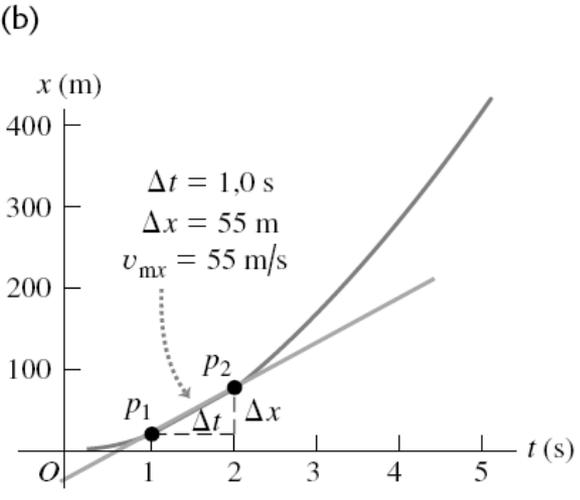
(c) Nosso raciocínio

- ① Traçamos um eixo apontado na direção em que o leopardo corre, de modo que os nossos valores sejam positivos.
- ② Elegemos o veículo como o ponto de origem.
- ③ Marcamos as posições iniciais do leopardo e do antílope. (Não usaremos a posição do antílope, mas não sabemos disso ainda.)
- ④ Estamos interessados no movimento do leopardo entre 1 s e 2 s após ele começar a correr e assinalamos esses pontos.
- ⑤ Acrescentamos símbolos para grandezas conhecidas e desconhecidas. Usamos subscritos 1 e 2 para os pontos em  $t = 1 \text{ s}$  e  $t = 2 \text{ s}$ .

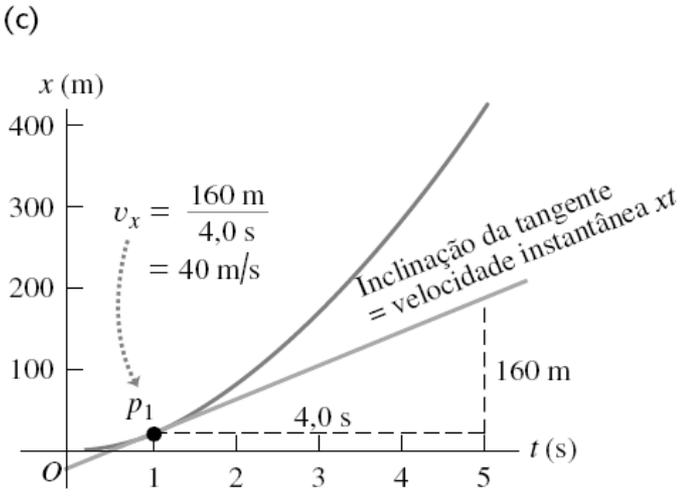
**Figura 2.6** Leopardo atacando um antílope a partir de uma tocaia. Os animais não estão desenhados na mesma escala do eixo.



Enquanto a velocidade média  $v_{mx}$  é calculada em intervalos de tempo cada vez menores...



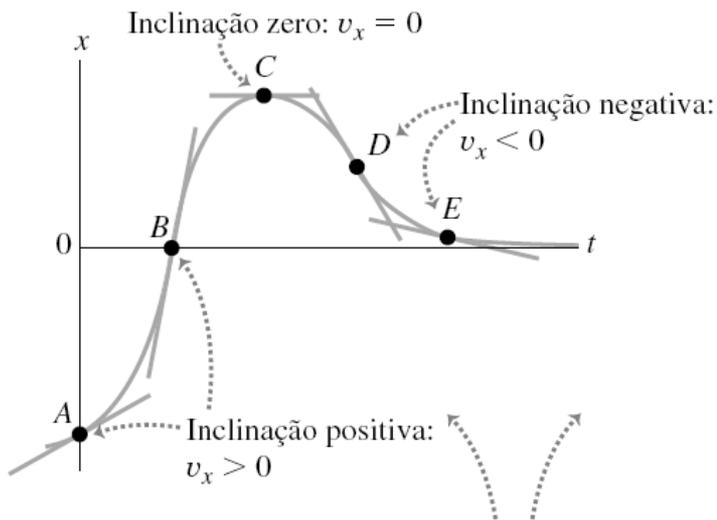
... seu valor  $v_{mx} = \Delta x / \Delta t$  tende para o valor da velocidade instantânea.



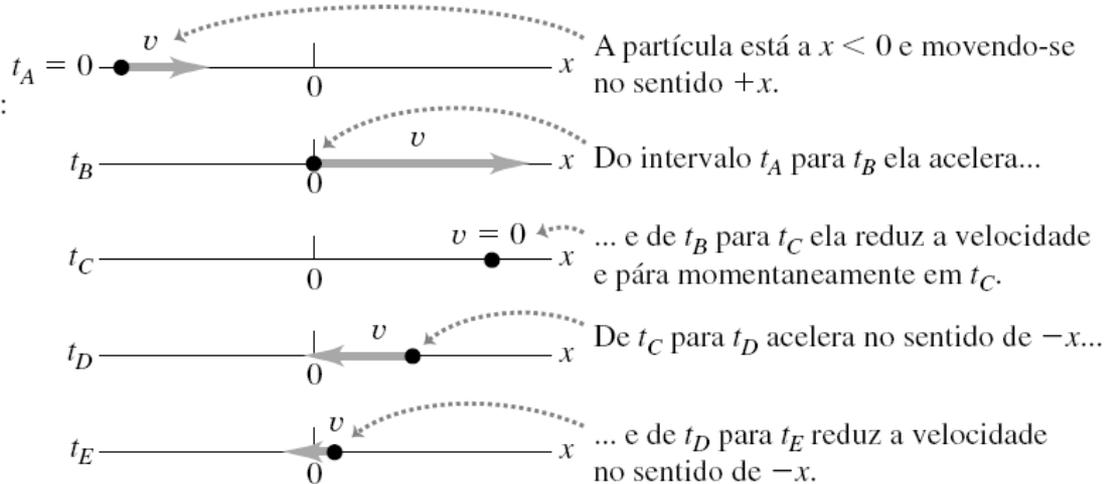
A velocidade instantânea  $v_x$  em qualquer dado ponto é igual à inclinação da tangente da curva  $xt$  nesse ponto.

**Figura 2.7** Usamos um gráfico  $xt$  para ir de (a) e (b), velocidade média, para (c), velocidade instantânea  $v_x$ . Em (c) achamos a inclinação da tangente para a curva  $xt$ , dividindo qualquer intervalo vertical (em unidades de distância) ao longo da tangente pelo intervalo horizontal correspondente (em unidades de tempo).

(a) Gráfico  $xt$

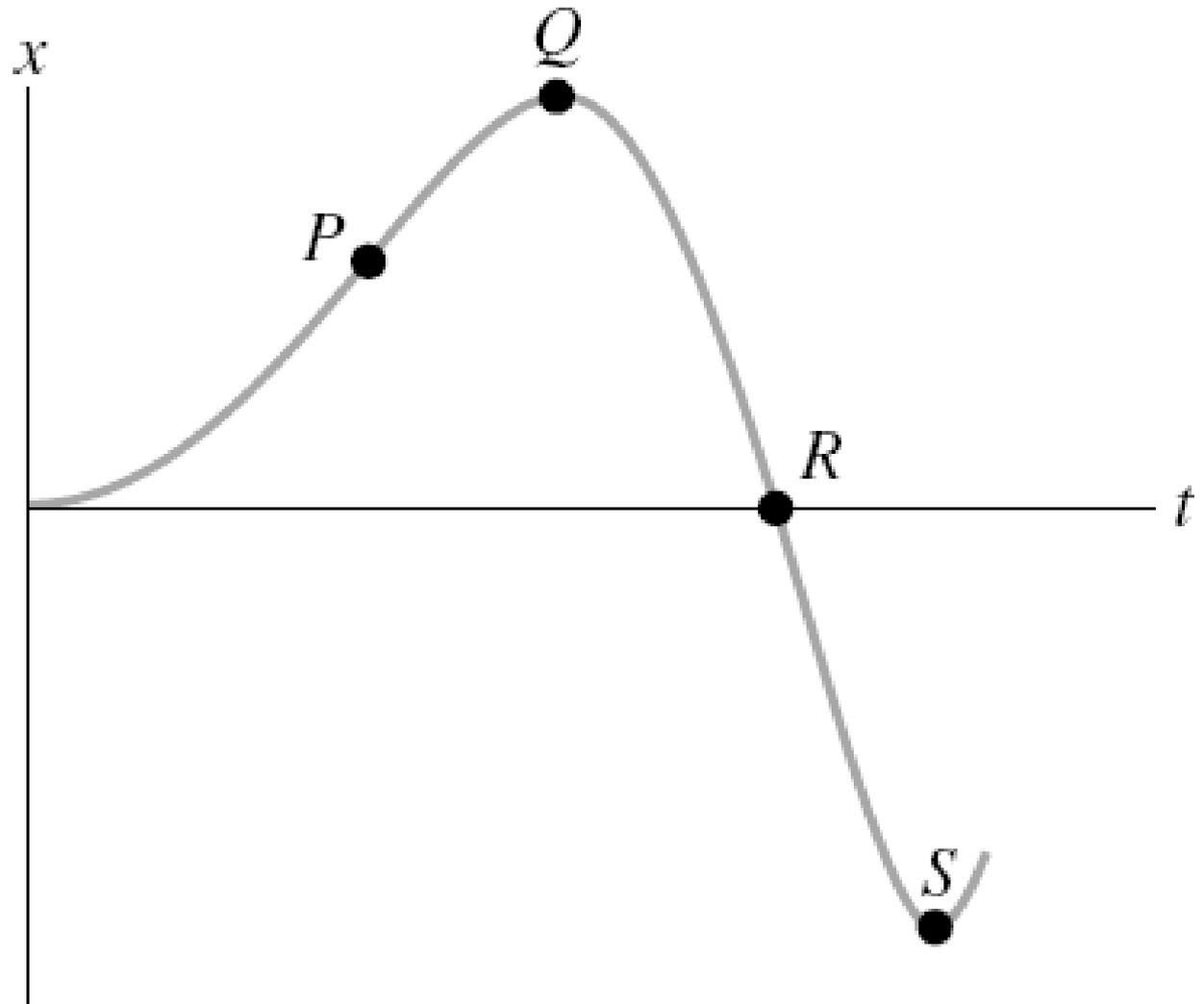


(b) Movimento da partícula



Quanto maior a inclinação (positiva ou negativa) do gráfico  $xt$  de um objeto, maior a velocidade desse objeto no sentido positivo ou negativo de  $x$ .

**Figura 2.8** (a) Gráfico  $xt$  do movimento de uma certa partícula. A inclinação da tangente da curva em qualquer ponto fornece a velocidade nesse ponto. (b) Diagrama do movimento mostrando a posição e a velocidade da partícula em cada um dos cinco instantes indicados no gráfico  $xt$ .

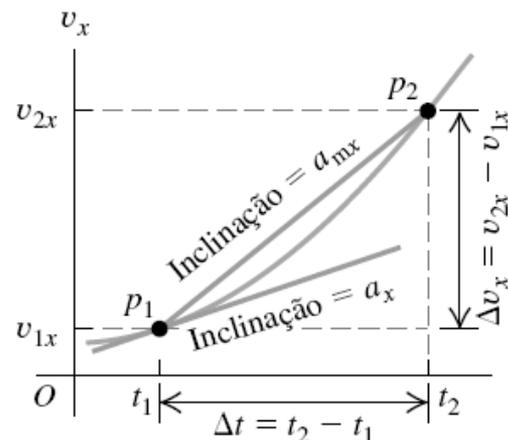


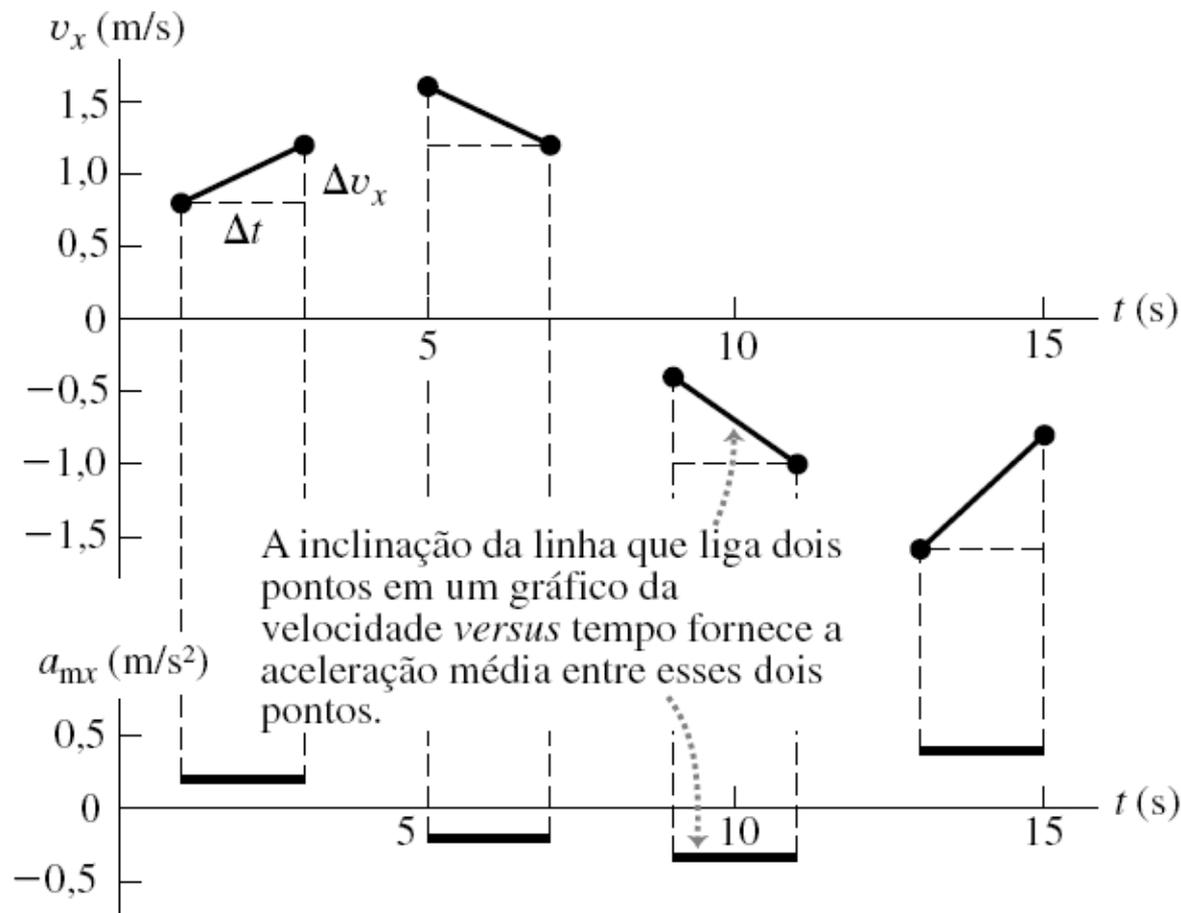
**Figura 2.9** Gráfico  $xt$  para uma partícula.

**Aceleração média e instantânea:** a aceleração média  $a_{mx}$  em um intervalo de tempo  $\Delta t$  é igual à variação em velocidade  $\Delta v_x = v_{2x} - v_{1x}$  no intervalo de tempo dividido por  $\Delta t$ . A aceleração instantânea  $a_x$  é o limite de  $a_{mx}$  conforme  $\Delta t$  tende a zero, ou a derivativa de  $v_x$  em relação a  $t$ .

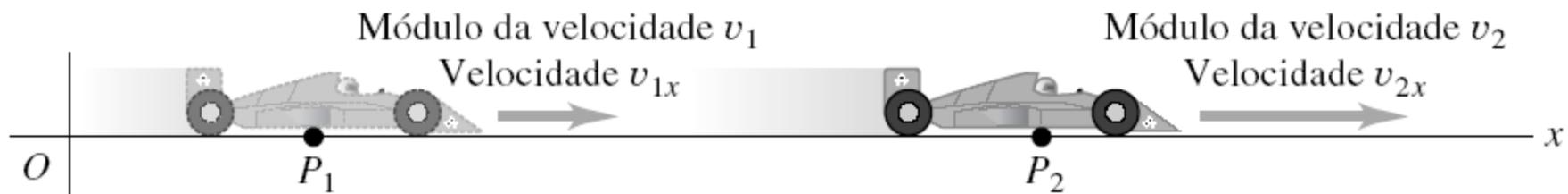
$$a_{mx} = \frac{v_{2x} - v_{1x}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \quad (2.4)$$

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dt} \quad (2.5)$$



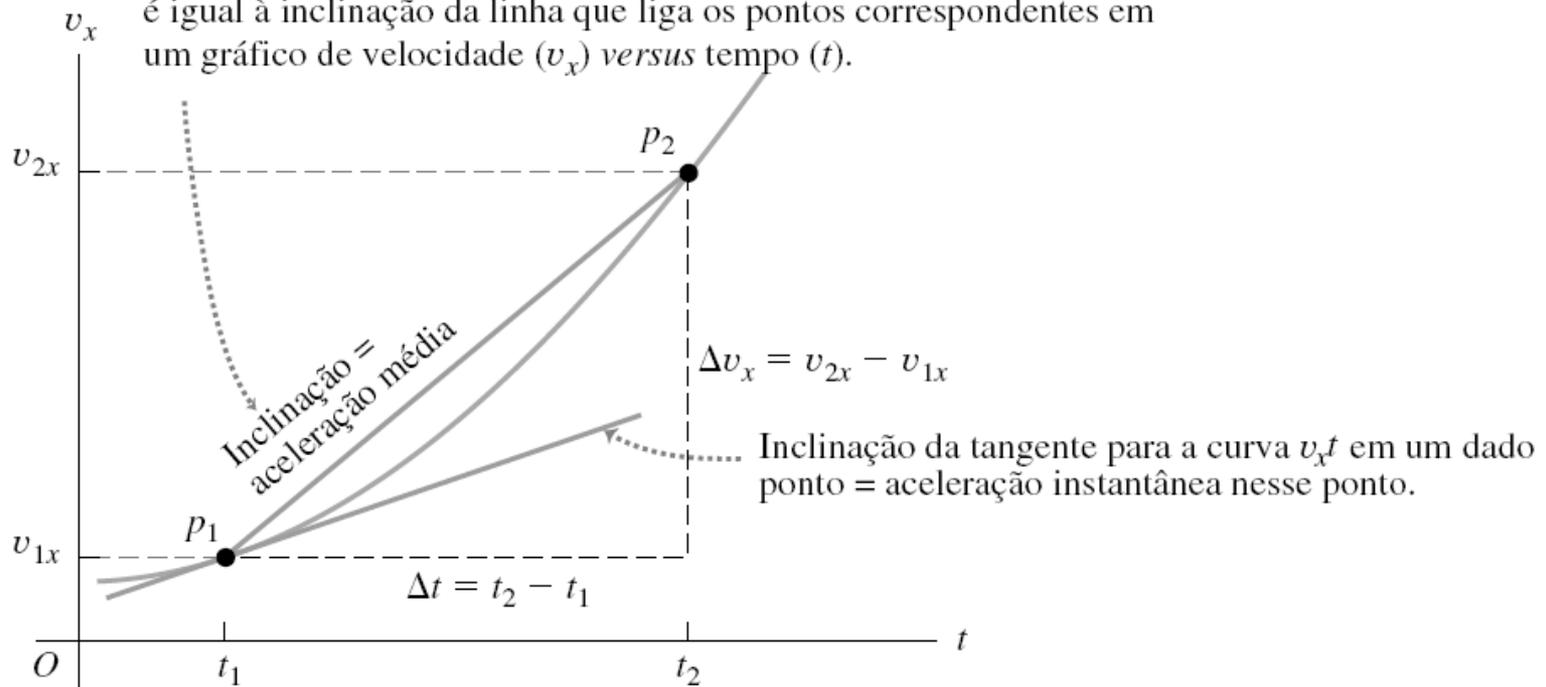


**Figura 2.10** Nossos gráficos de velocidade *versus* tempo (parte superior) e aceleração média *versus* tempo (parte inferior) para a astronauta.



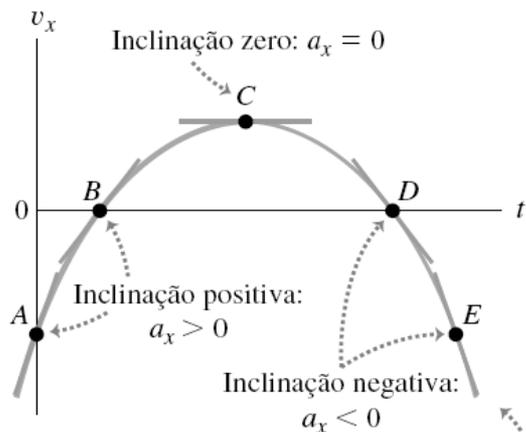
**Figura 2.11** Um carro de corrida do Grande Prêmio na reta final.

Para um deslocamento no eixo  $Ox$ , a aceleração média de um objeto é igual à inclinação da linha que liga os pontos correspondentes em um gráfico de velocidade ( $v_x$ ) versus tempo ( $t$ ).



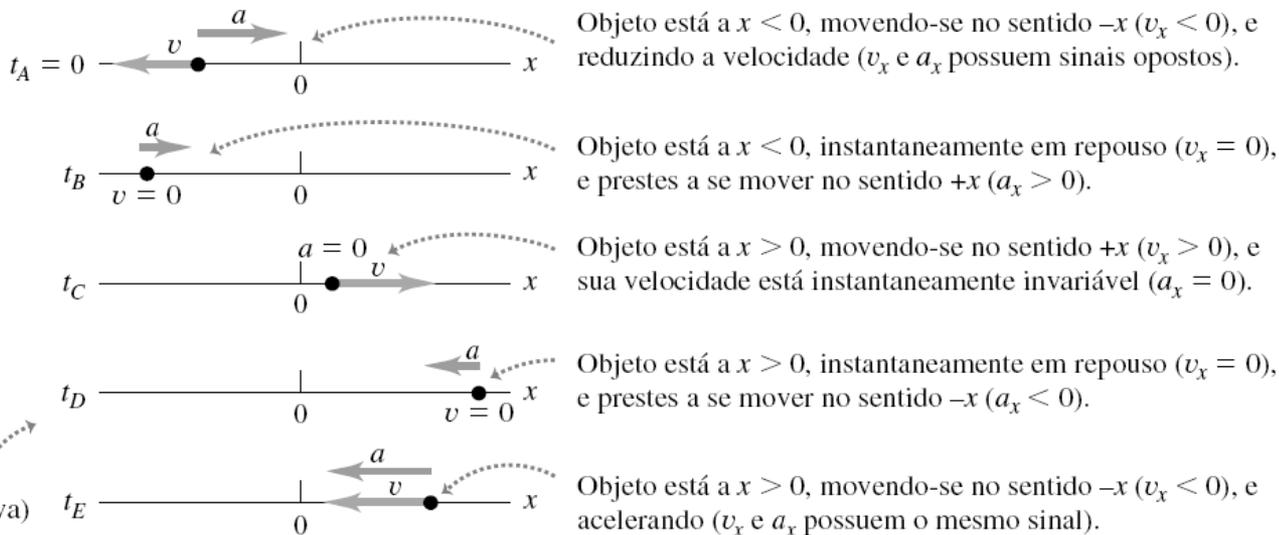
**Figura 2.12** Gráfico  $v_x t$  do movimento indicado na Figura 2.11.

(a) Gráfico  $v_x t$  para o deslocamento de um objeto pelo eixo  $Ox$



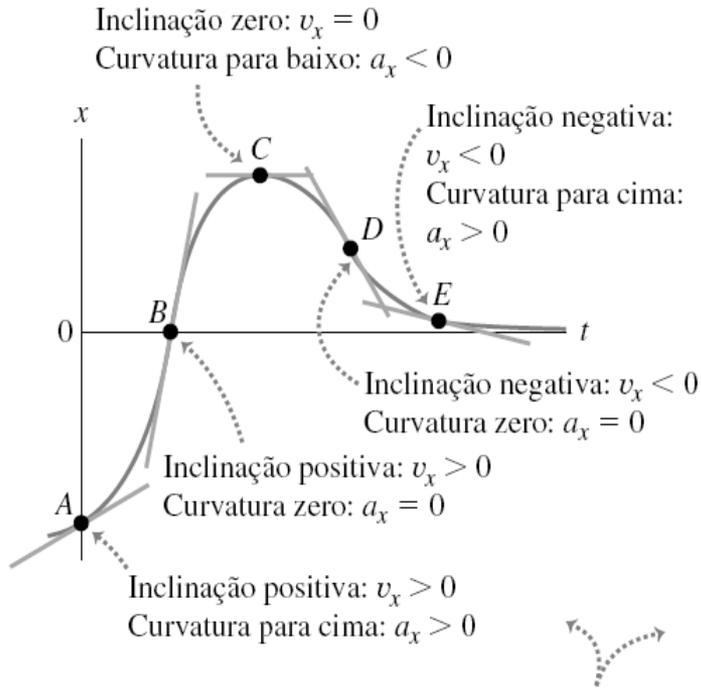
Quanto maior a inclinação (positiva ou negativa) do gráfico  $v_x t$  de um objeto, maior a aceleração do objeto no sentido positivo ou negativo de  $x$ .

(b) Posição, velocidade e aceleração do objeto no eixo  $x$



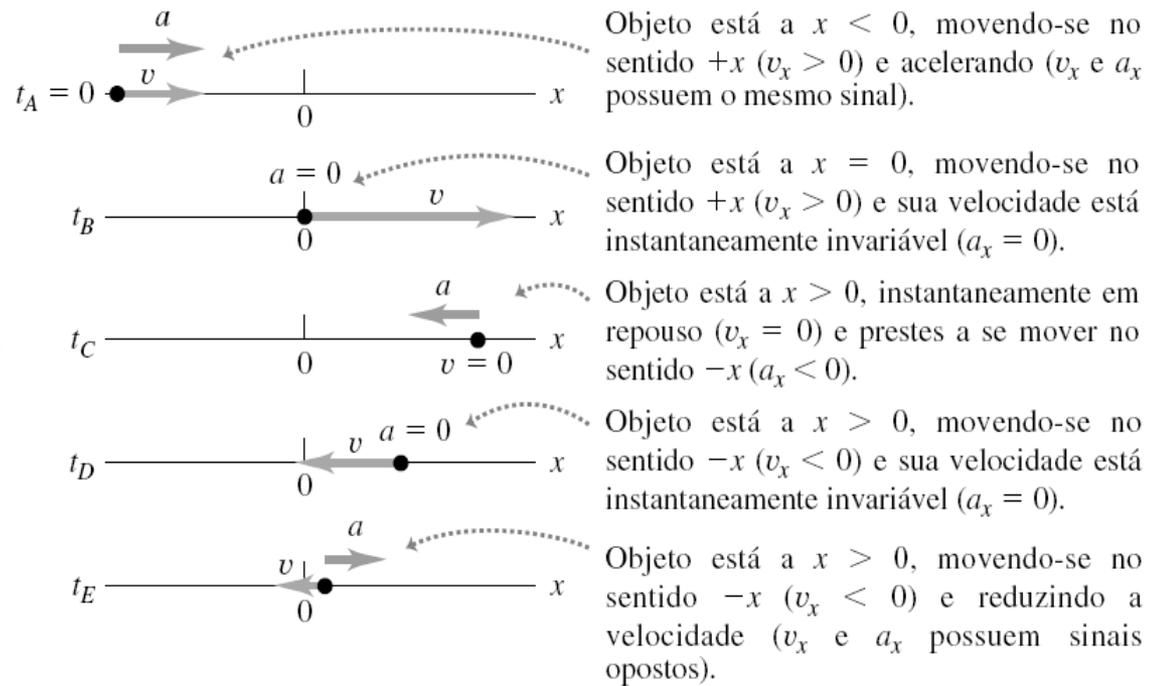
**Figura 2.13** (a) Gráfico  $v_x t$  do movimento de uma partícula diferente daquela mostrada na Figura 2.8. A inclinação da tangente em qualquer ponto é igual à aceleração do ponto considerado. (b) Diagrama do movimento mostrando a posição, a velocidade e a aceleração da partícula em cada um dos instantes indicados no gráfico  $v_x t$ ; por exemplo, de  $t_A$  a  $t_B$  a velocidade é negativa, de modo que em  $t_B$  a partícula possui um valor de  $x$  mais negativo do que em  $t_A$ .

(a) Gráfico  $xt$



Quanto maior a curvatura (para cima ou para baixo) do gráfico  $xt$  de um objeto, maior a aceleração desse objeto no sentido positivo ou negativo de  $x$ .

(b) Movimento do objeto



**Figura 2.14** a) O mesmo gráfico  $xt$  indicado na Figura 2.8a. A velocidade é igual à inclinação do gráfico, e a aceleração é dada pela *concauidade* ou *curvatura* do gráfico. b) Diagrama do movimento mostrando a posição, a velocidade e a aceleração da partícula em cada um dos instantes indicados no gráfico  $xt$ .

**Movimento retilíneo com aceleração constante:** quando a aceleração é constante, quatro equações relacionam a posição  $x$  e a velocidade  $v_x$ , em qualquer instante  $t$ , à posição inicial  $x_0$ , à velocidade inicial  $v_{0x}$  (ambas medidas no instante  $t = 0$ ) e à aceleração  $a_x$ .

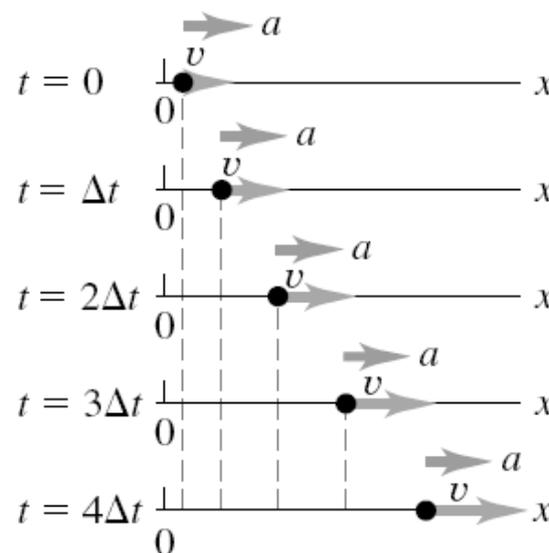
Aceleração constante somente:

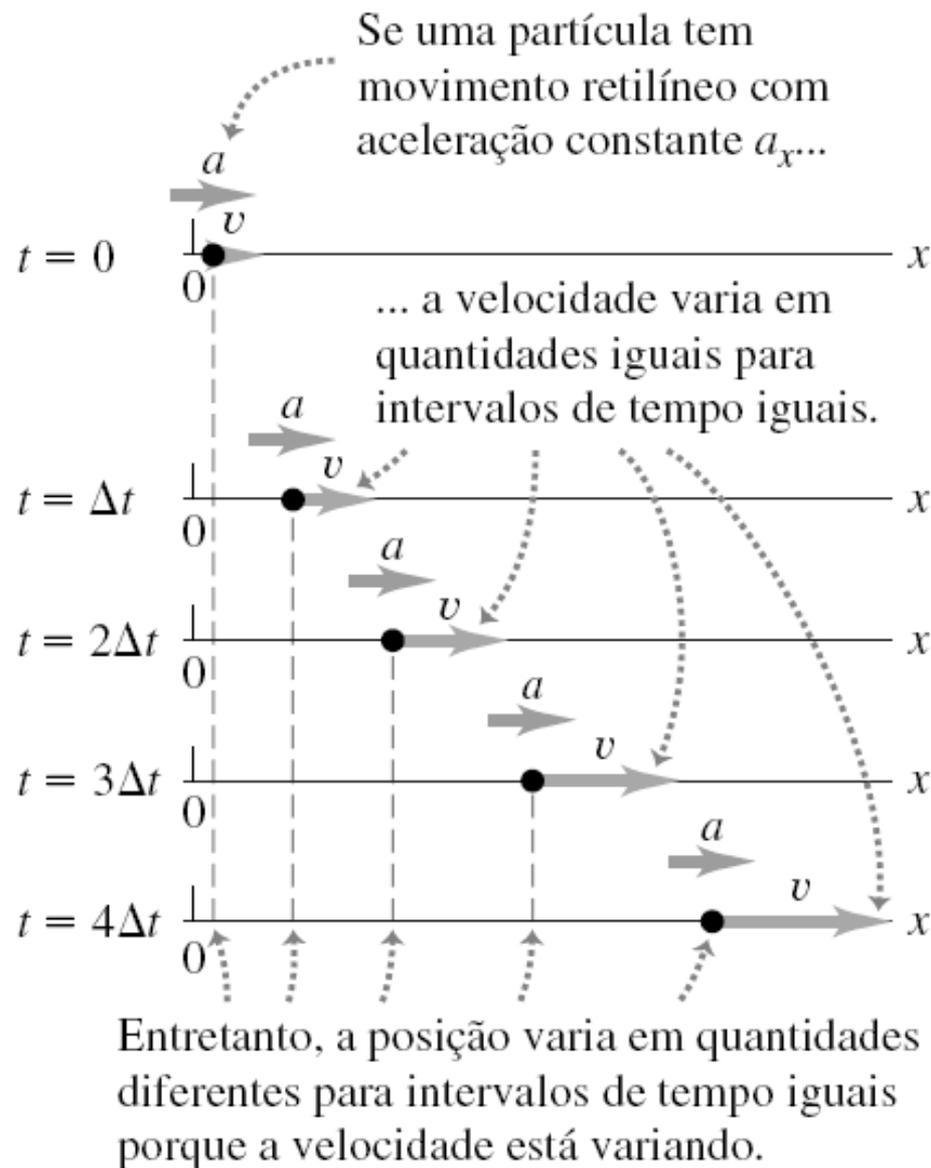
$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad (2.8)$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (2.12)$$

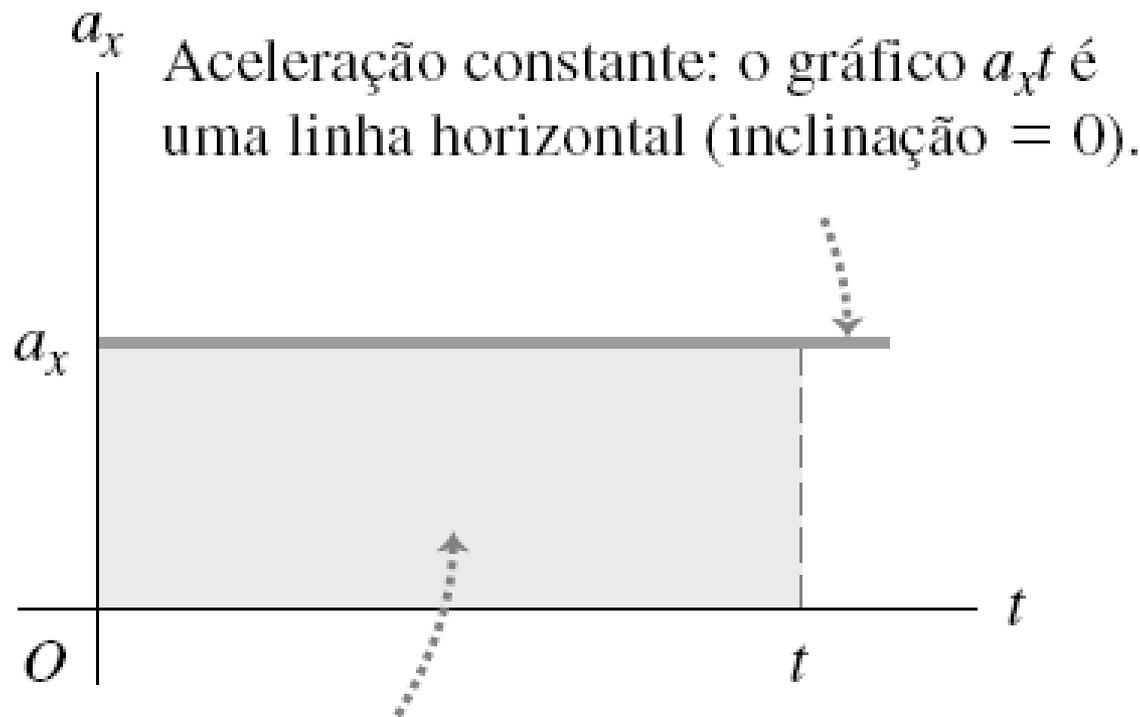
$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x(x - x_0) \quad (2.13)$$

$$x - x_0 = \left( \frac{v_{0x} + v_x}{2} \right) t \quad (2.14)$$



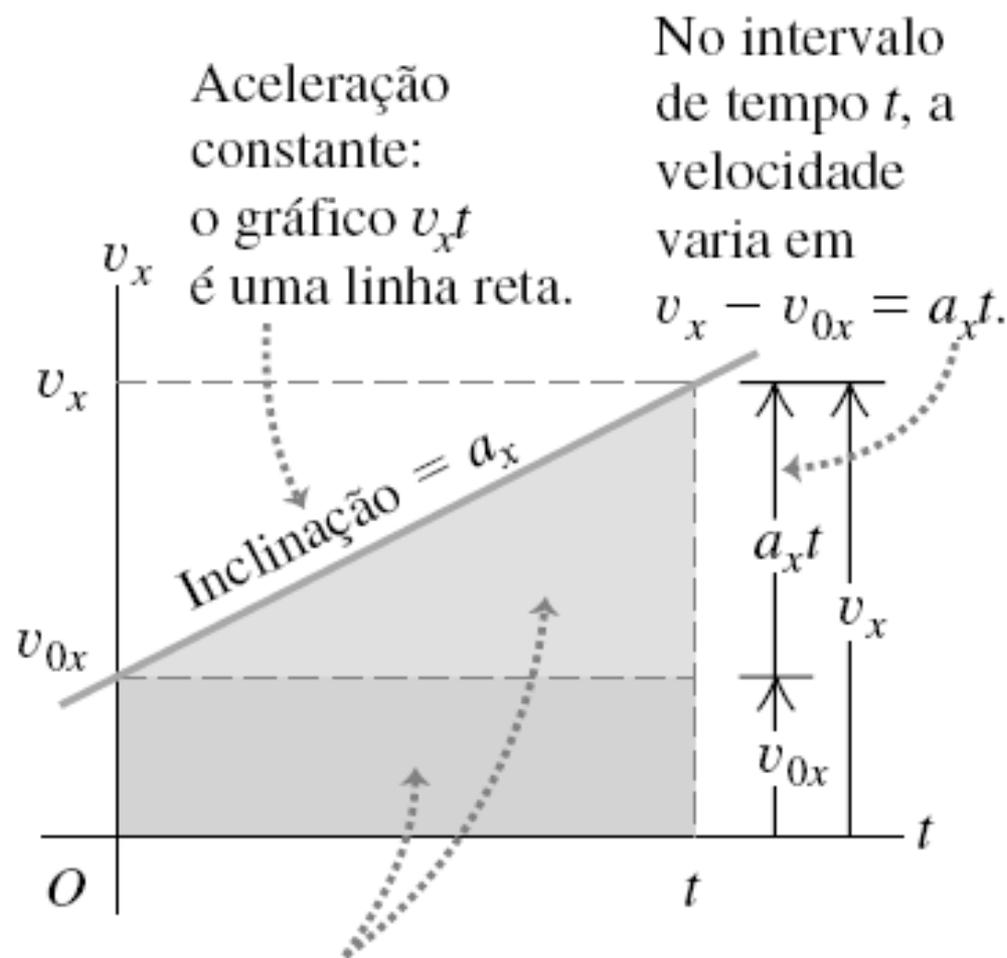


**Figura 2.15** Diagrama do movimento para uma partícula que se move em linha reta na direção positiva de  $x$  com aceleração constante positiva  $a$ . A posição, a velocidade e a aceleração são indicadas em cinco intervalos de tempo iguais.



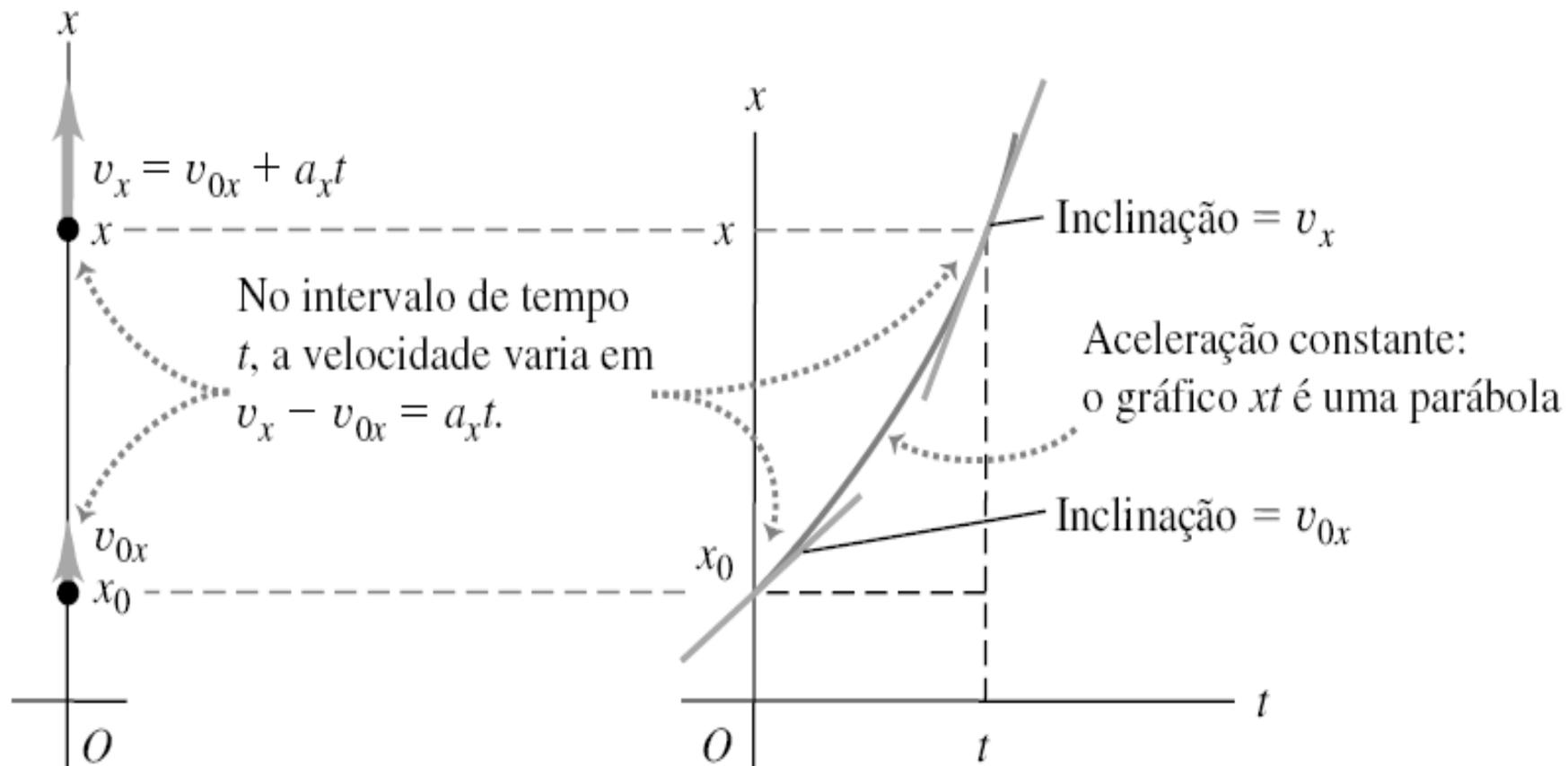
Área sob o gráfico  $a_x t = v_x - v_{0x} =$  variação na velocidade do tempo 0 ao tempo  $t$ .

**Figura 2.16** Gráfico da aceleração *versus* tempo ( $at$ ) para uma partícula que se move em linha reta com aceleração constante positiva  $a_x$ .



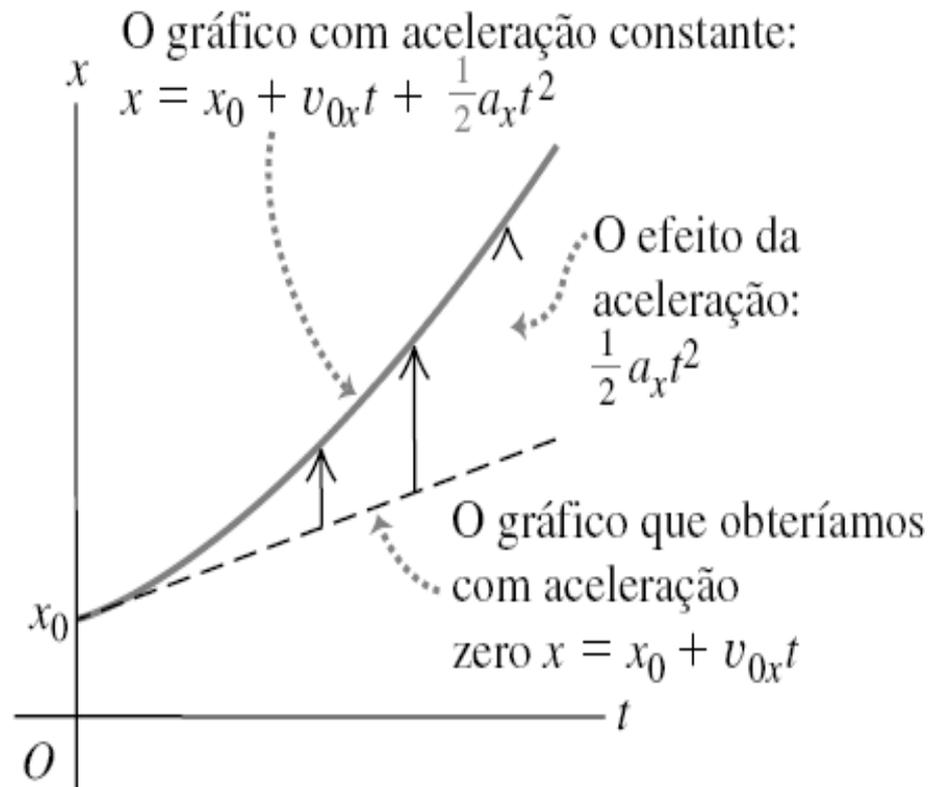
Área total sob o gráfico  $v_x t = x - x_0 =$  variação na coordenada do tempo  $0$  para o tempo  $t$ .

**Figura 2.17** Gráfico da velocidade *versus* tempo ( $v_x t$ ) para uma partícula que se move em linha reta com aceleração constante positiva  $a_x$ . A velocidade inicial  $v_{0x}$  também é positiva neste caso.

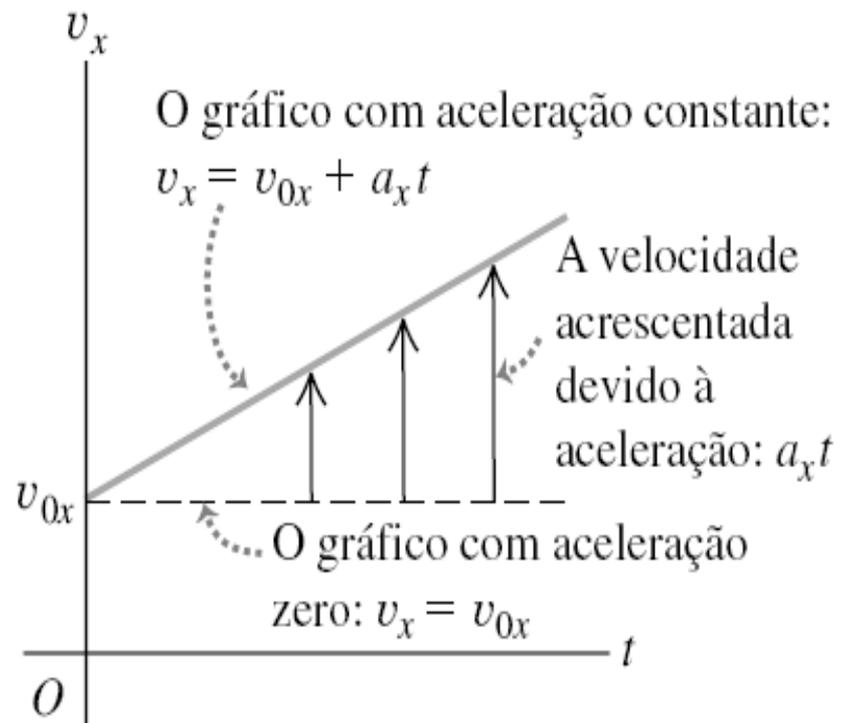


**Figura 2.18** a) Movimento em linha reta com aceleração constante. b) Gráfico de posição *versus* tempo ( $xt$ ) para esse movimento (o mesmo que o mostrado nas figuras 2.15, 2.16 e 2.17). Para esse movimento, a posição inicial  $x_0$ , a velocidade inicial  $v_{0x}$  e a aceleração  $a_x$  são todas positivas.

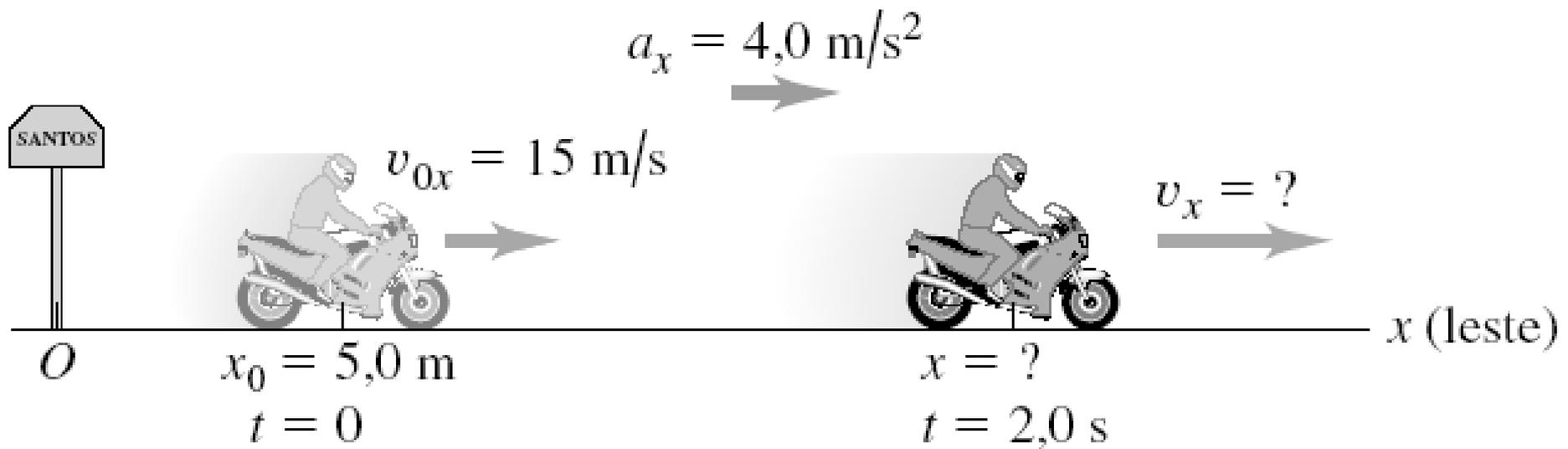
(a) Um gráfico  $xt$  para um objeto que se move a uma aceleração constante positiva



(b) O gráfico  $v_x t$  para o mesmo objeto

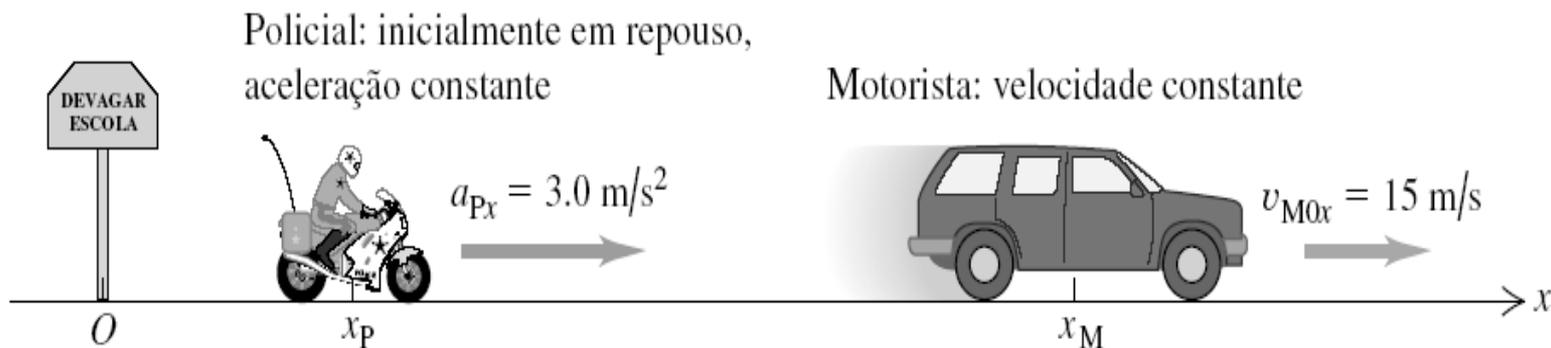


**Figura 2.19** como uma aceleração constante afeta a) o gráfico  $xt$  e b) o gráfico  $v_x t$  de um corpo.



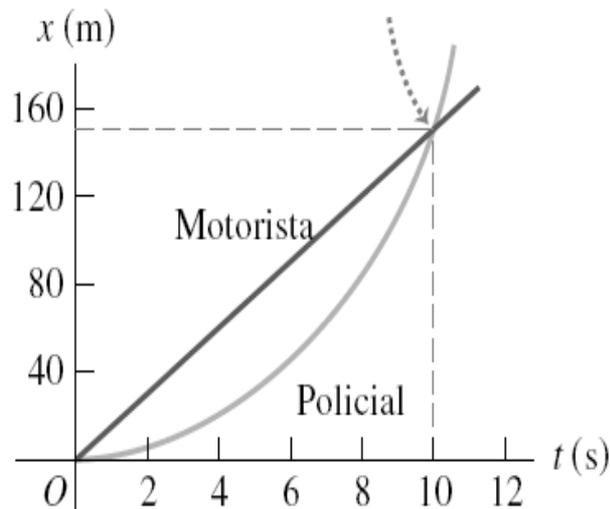
**Figura 2.20** Motociclista deslocando-se com aceleração constante.

(a)



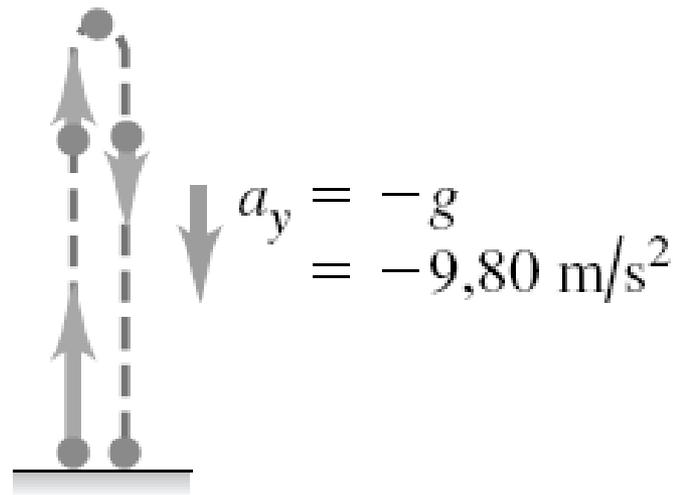
(b)

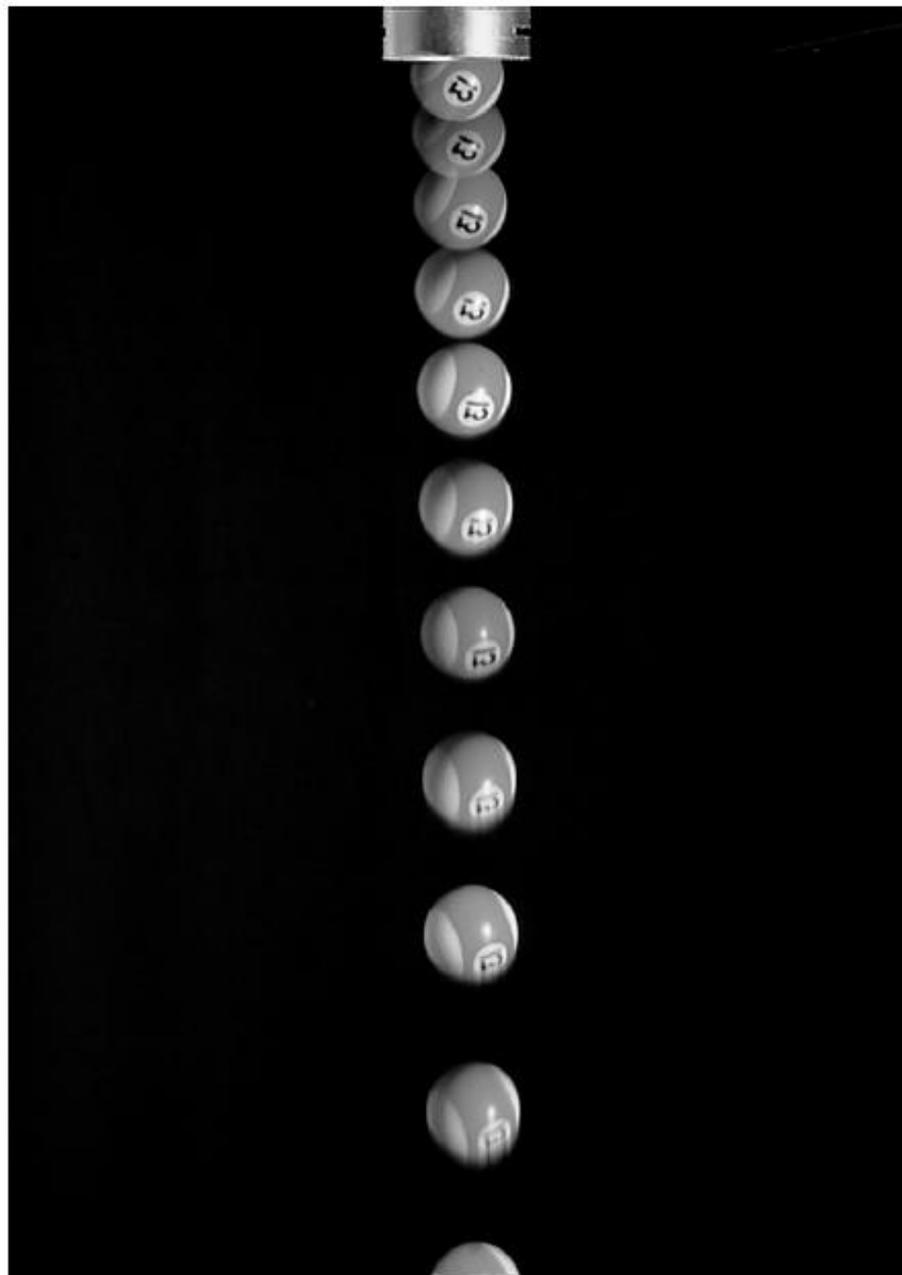
O policial e o motorista se encontram no intervalo  $t$ , onde seus gráficos  $xt$  se cruzam.



**Figura 2.21** (a) Movimento com aceleração constante concomitante a um movimento com velocidade constante. (b) Gráfico de  $x$  em função de  $t$  para cada veículo.

**Corpos em queda livre:** a queda livre é um caso particular de movimento com aceleração constante. O módulo da aceleração da gravidade é uma grandeza positiva,  $g$ . A aceleração de um corpo em queda livre é sempre orientada de cima para baixo.



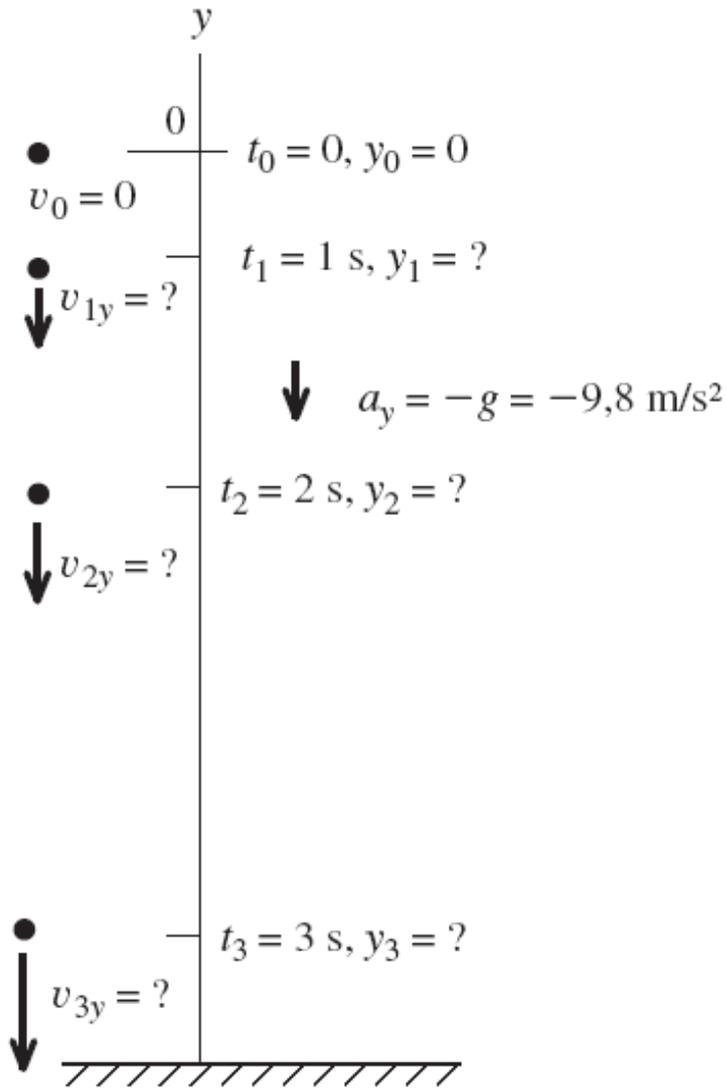


**Figura 2.22** Fotografia de múltipla *exposição* de uma bola em queda livre.

## A Torre de Pisa

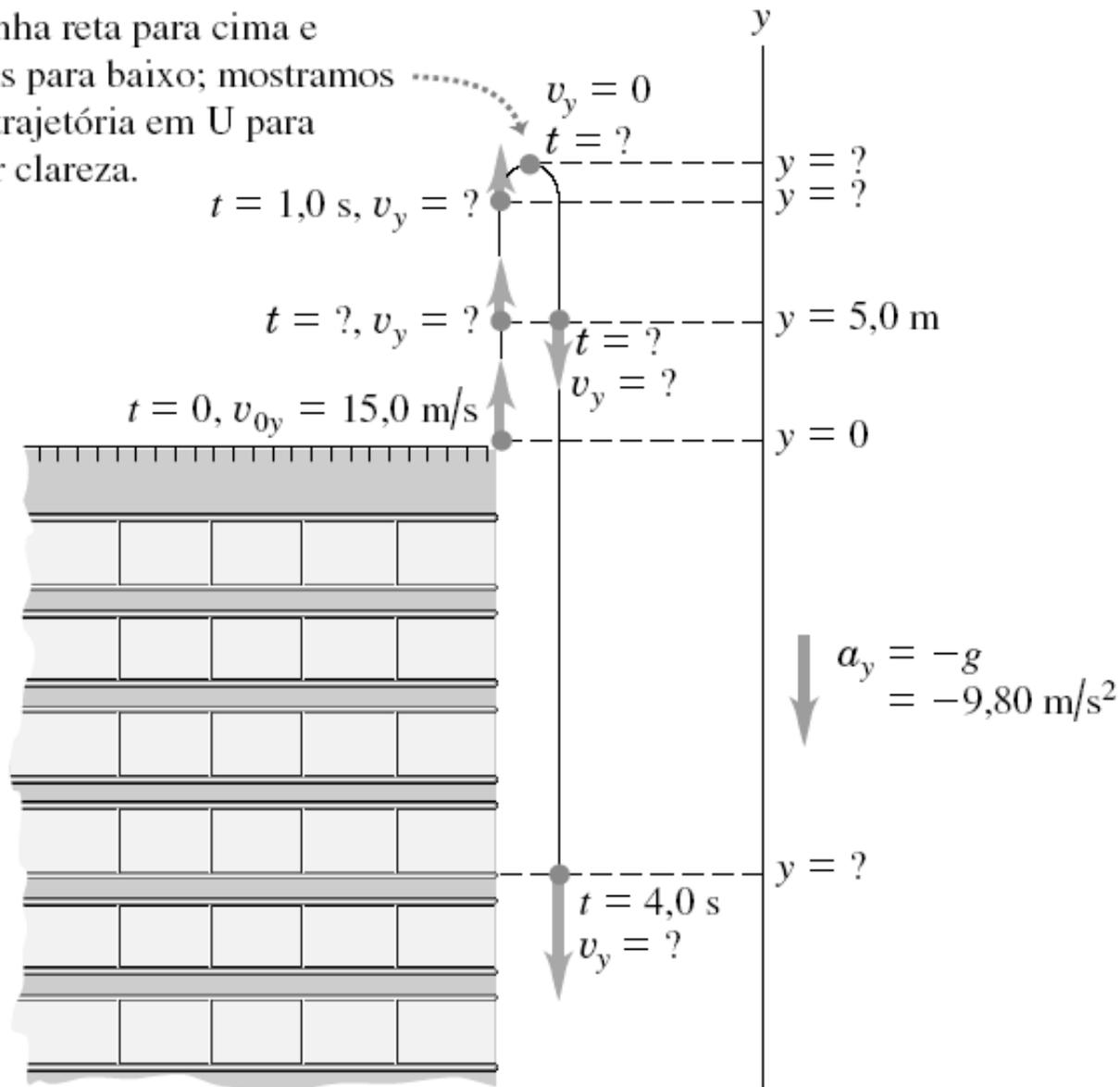


## Nosso desenho do problema



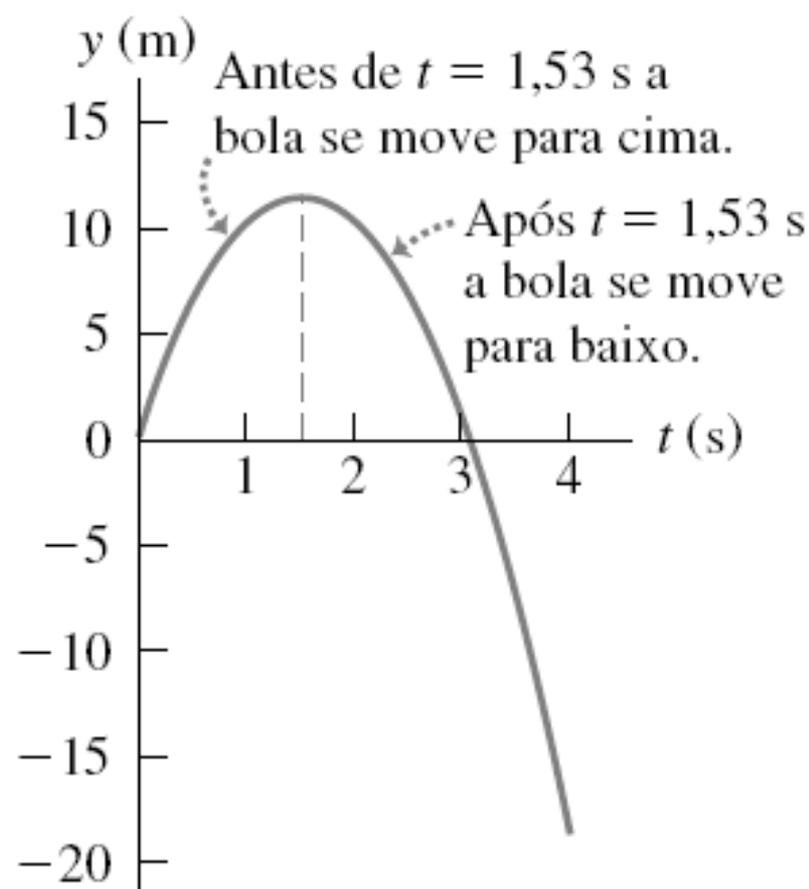
**Figura 2.23** Uma moeda em queda livre a partir do repouso.

A bola efetivamente se move em linha reta para cima e depois para baixo; mostramos uma trajetória em U para maior clareza.

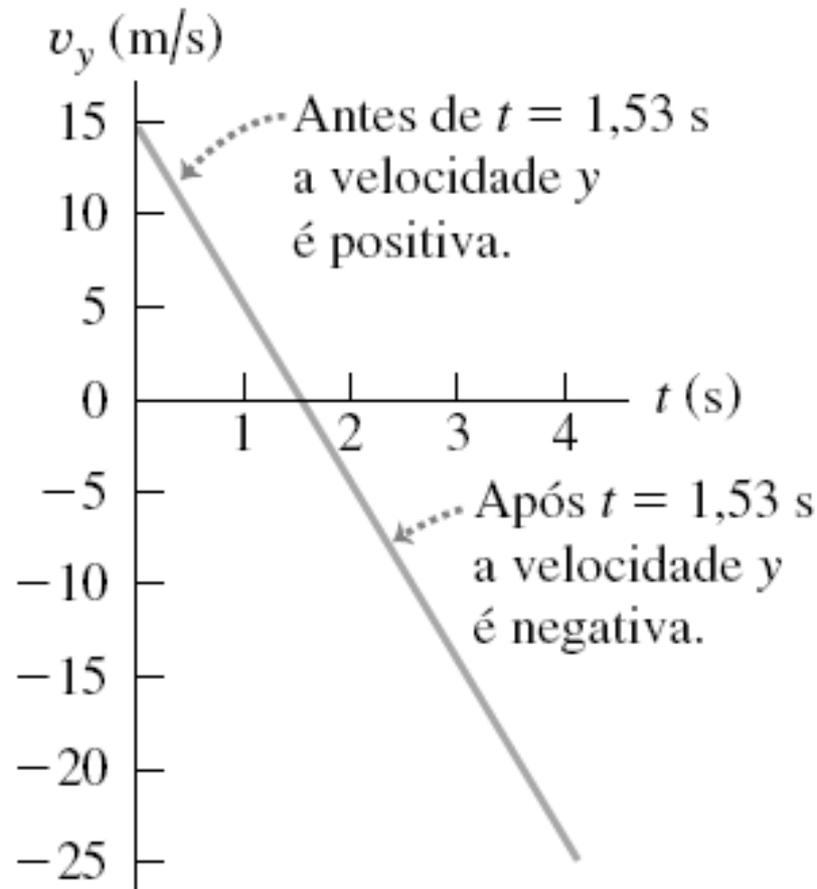


**Figura 2.24** Posição e velocidade de uma bola lançada verticalmente de baixo para cima.

(a) gráfico  $y,t$  (curvatura para baixo porque  $a_y = -g$  é negativo)



(b) gráfico  $v_y,t$  (linha reta com inclinação negativa porque  $a_y = -g$  é constante e negativo)

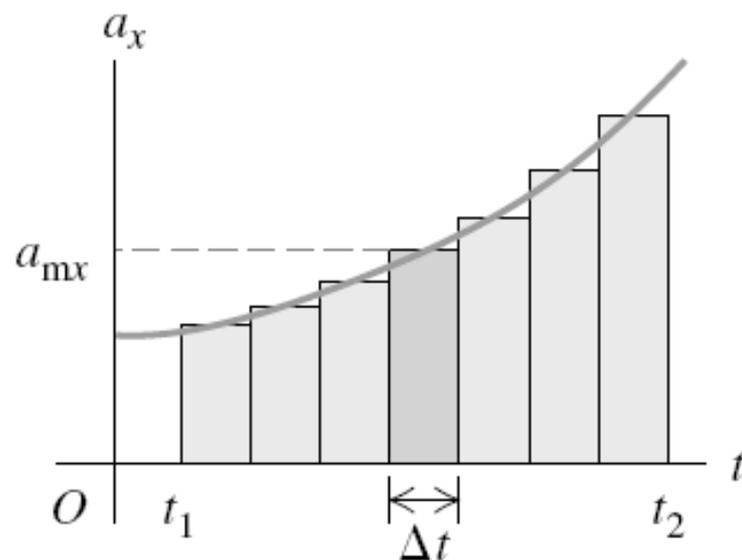


**Figura 2.25** a) Posição e b) velocidade em função do tempo para uma bola lançada verticalmente de baixo para cima com velocidade inicial de 15 m/s.

**Movimento retilíneo com aceleração variada:** quando a aceleração não é constante, mas é conhecida em função do tempo, podemos determinar a velocidade e a posição em função do tempo, integrando a função aceleração.

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt \quad (2.17)$$

$$x = x_0 + \int_0^t v_x dt \quad (2.18)$$





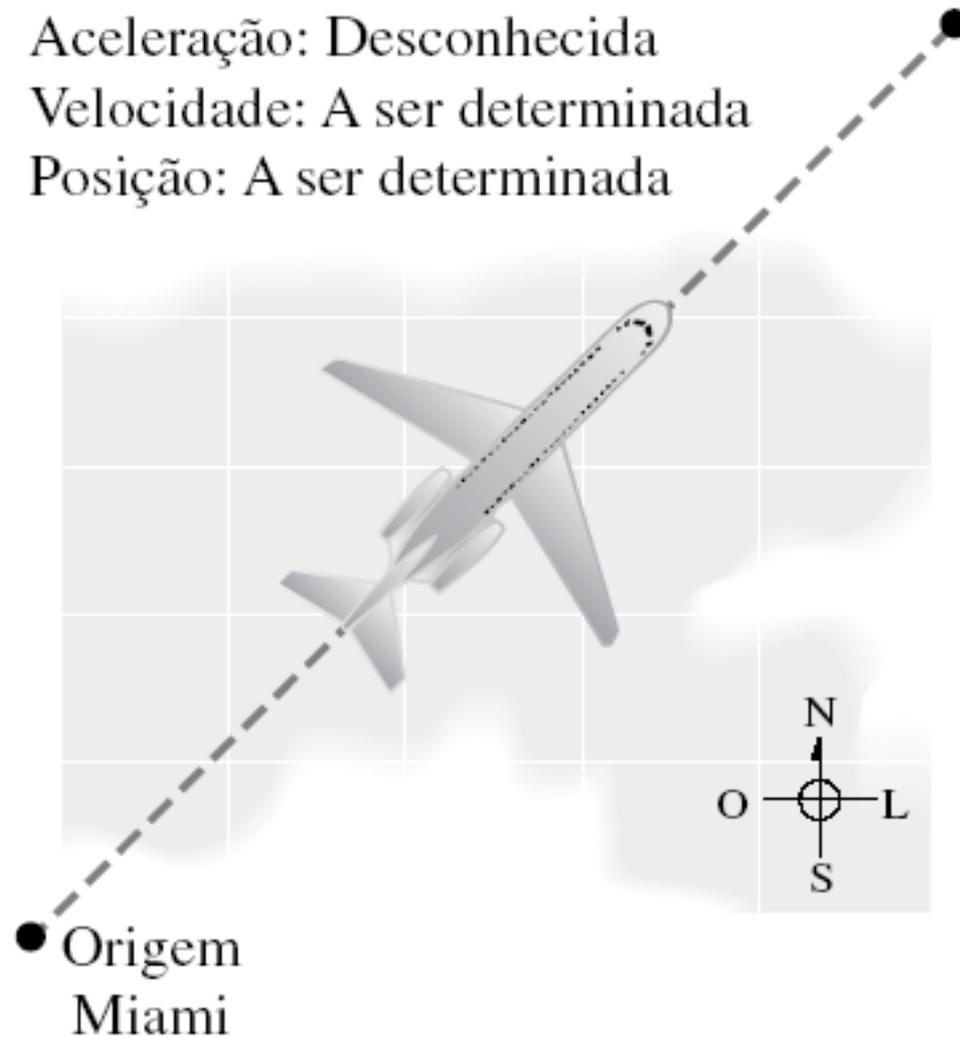
**Figura 2.26** Quando você pisa até o fundo no pedal do acelerador do seu carro, a aceleração resultante *não* é constante: quanto maior a velocidade do carro, mais lentamente ele ganha velocidade adicional. Para um carro comum, o tempo para acelerar de 50 km/h a 100 km/h é igual ao dobro do tempo necessário para acelerar de 0 a 50 km/h.

Destino Londres

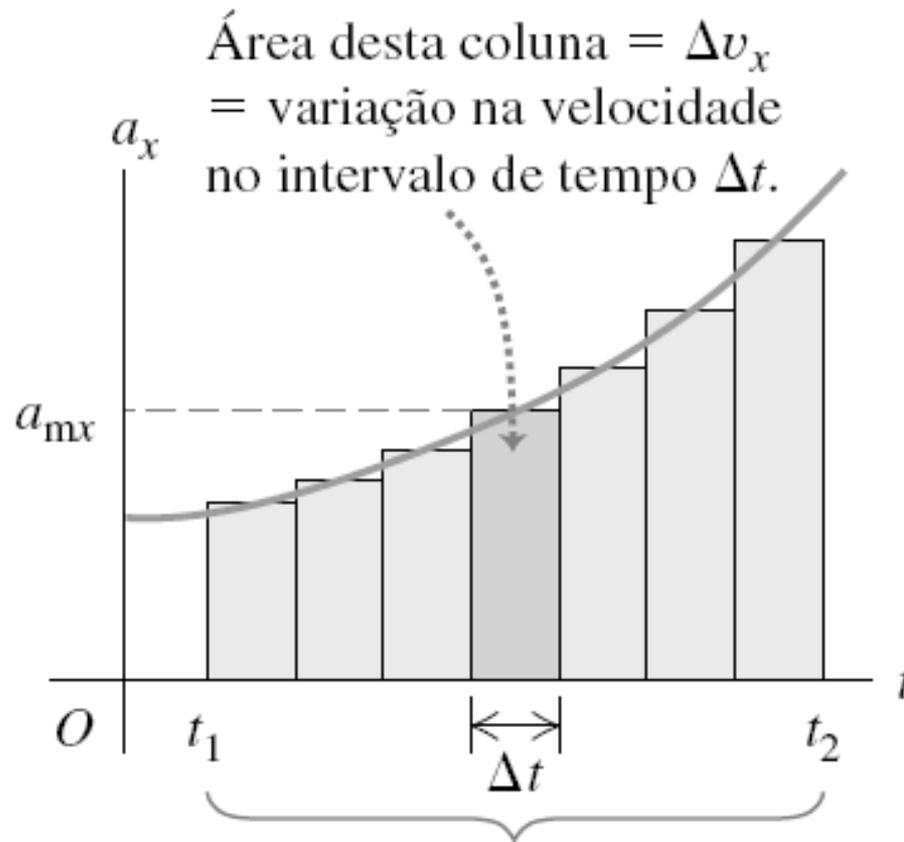
Aceleração: Desconhecida

Velocidade: A ser determinada

Posição: A ser determinada

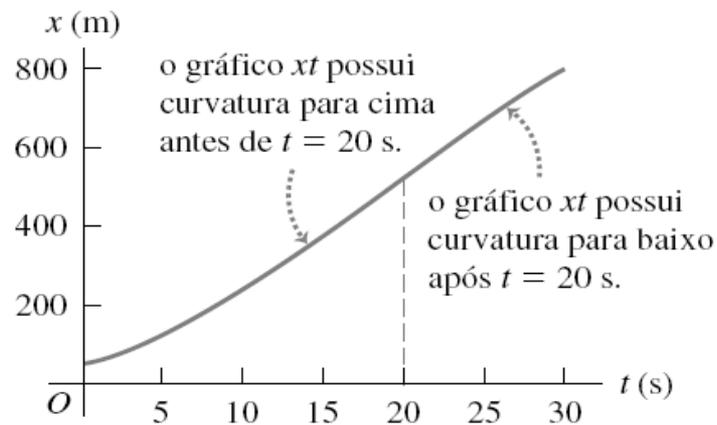
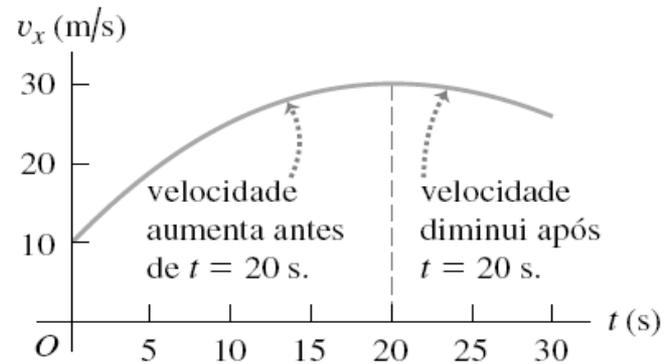
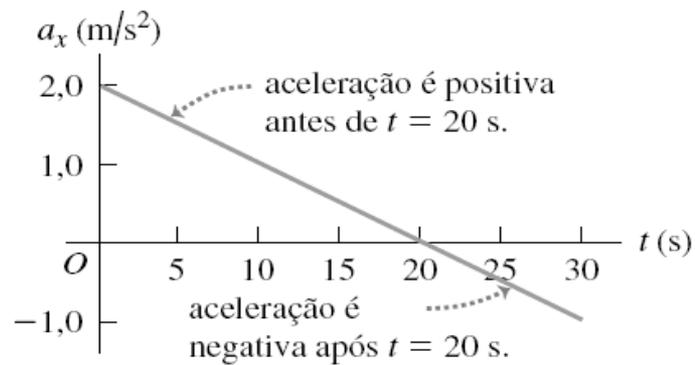


**Figura 2.27** A posição e a velocidade de uma aeronave atravessando o Atlântico são obtidas integrando-se sua aceleração em relação ao tempo.



Área total sob a curva em um gráfico  $xt$  entre os tempos  $t_1$  e  $t_2$   
 $=$  a variação da velocidade que ocorre entre esses limites.

**Figura 2.28** Um gráfico  $a_{xt}$  para um corpo cuja aceleração  $t$  não é constante.



**Figura 2.29** A posição, a velocidade e a aceleração do carro do Exemplo 2.9 em função do tempo. Você é capaz de mostrar que, se esse movimento continuasse, o carro pararia no instante  $t = 44,5$  s?