CAPÍTULO 2

Estes surfistas fazem manobras para evitar quedas e colisões entre eles. Eles fazem isso controlando o deslocamento, a velocidade e a aceleração das suas pranchas de surf. Estes três conceitos e as relações entre eles são o foco deste capítulo. (© Purestock/Getty Images, Inc.)

Cinemática em Uma Dimensão

2.1 Deslocamento

Qualquer movimento apresenta dois aspectos. Em um sentido puramente descritivo, existe o próprio movimento. Por exemplo, ele é rápido ou lento? Depois, existe a questão do que causa o movimento ou o que o altera, que requer a consideração de forças. A ***Cinemática*** lida com os conceitos que são necessários para descrever o movimento, sem qualquer referência a forças. O presente capítulo discute estes conceitos quando eles são aplicados ao movimento em uma dimensão, e o próximo capítulo trata do movimento bidimensional. A ***Dinâmica*** lida com o efeito que as forças têm sobre o movimento, um tópico considerado no Capítulo 4. Juntas, a cinemática e a dinâmica formam um ramo da física conhecido como ***mecânica.***[1] Voltamos agora nossa atenção para o primeiro dos conceitos cinemáticos a ser discutido, que é o deslocamento.

Para descrever o movimento de um objeto, devemos ser capazes de especificar a sua localização em todos os tempos; a Figura 2.1 mostra como isto é feito para o movimento unidimensional. Neste desenho, a posição inicial de um carro é indicada pelo vetor identificado como $\vec{x}_0$. O comprimento de $\vec{x}_0$ é a distância do carro medida a partir de uma origem escolhida arbitrariamente. Em um tempo posterior, o carro se moveu para uma nova posição, que é indicada pelo vetor $\vec{x}$. O ***deslocamento*** do carro $\Delta\vec{x}$ (lido como "delta x" ou "o incremento em x") é um vetor desenhado da posição inicial para a posição final. O deslocamento é uma grandeza vetorial, como discutido na Seção 1.5, pois ele traz informações sobre um módulo (a distância entre as posições inicial e final), uma direção e um sentido. Pode-se relacionar o deslocamento com $\vec{x}_0$ e $\vec{x}$ observando-se, na Figura 2.1, que

Figura 2.1 O deslocamento $\Delta\vec{x}$ é um vetor que aponta da posição inicial $\vec{x}_0$ para a posição final $\vec{x}$.

$$\vec{x}_0 + \Delta\vec{x} = \vec{x} \quad \text{ou} \quad \Delta\vec{x} = \vec{x} - \vec{x}_0$$

Assim, o deslocamento $\Delta\vec{x}$ é a diferença entre $\vec{x}$ e $\vec{x}_0$ e a letra grega Δ (delta) é usada para representar esta diferença. É importante observar que a variação de qualquer variável é sempre o valor final menos o valor inicial.

Definição de Deslocamento

O deslocamento é um vetor que aponta da posição inicial de um objeto para a sua posição final[2] e que possui um módulo igual à menor distância entre as duas posições.

Unidade SI de Deslocamento: metro (m)

[1]Outro ramo importante da Mecânica é a **Estática**, no qual atuam sobre o corpo forças em equilíbrio sem que haja movimento. (N.T.)

[2]A direção é a da reta que une as posições inicial e final; o sentido é da posição inicial para a final. (N.T.)

A unidade SI de deslocamento é o metro (m), mas também existem outras unidades, como o centímetro e a polegada. Ao converter de centímetros (cm) para polegadas (in), ou vice-versa, lembre-se de que 2,54 cm = 1 in.

Frequentemente lidaremos com movimentos ao longo de uma linha reta. Neste caso, um deslocamento em um sentido ao longo da reta recebe um valor positivo, e um deslocamento no sentido contrário recebe um valor negativo. Por exemplo, suponha que um carro esteja se movendo ao longo de uma direção leste-oeste e que um sinal positivo (+) seja usado para representar o sentido para leste. Então, $\Delta\bar{x} = +500$ m representa um deslocamento que aponta para o leste e possui um módulo igual a 500 metros. Já $\Delta\bar{x} = -500$ m é um deslocamento que possui o mesmo módulo, mas que aponta no sentido contrário, para o oeste.

O módulo do vetor deslocamento é a menor distância entre as posições inicial e final do objeto. No entanto, isso não significa que deslocamento e distância sejam a mesma grandeza física. Na Figura 2.1, por exemplo, o carro poderia alcançar sua posição final depois de avançar e recuar várias vezes. Nesse caso, a distância total percorrida pelo carro seria maior do que o módulo do vetor deslocamento.

Verifique Seu Entendimento

(A resposta é dada no final do livro.)

1. Uma abelha sai da colmeia e percorre uma distância total de 2 km antes de voltar à colmeia. Qual é o módulo do vetor deslocamento da abelha?

2.2 Velocidade Escalar e Vetor Velocidade[3]

■ Velocidade Escalar Média

Uma das características mais evidentes de um objeto em movimento é a rapidez com que ele está se movimentando. Se um carro percorre 200 metros em 10 segundos, dizemos que a sua velocidade escalar[4] média é igual a 20 metros por segundo, sendo a ***velocidade escalar média*** igual à distância percorrida dividida pelo tempo necessário para cobrir esta distância:

$$\text{Velocidade escalar média} = \frac{\text{Distância}}{\text{Tempo transcorrido}} \qquad (2.1)$$

A Equação 2.1 indica que a unidade de velocidade escalar média é a unidade de distância dividida pela unidade de tempo, ou metros por segundo (m/s) em unidades SI. O Exemplo 1 ilustra como é usada a ideia de velocidade escalar média.

Exemplo 1 Distância Percorrida por um Corredor

Que distância um corredor percorre em 1,5 h (5400 s) se a sua velocidade escalar média for igual a 2,22 m/s?

Raciocínio A velocidade escalar média do corredor é a distância média por segundo que ele percorre. Logo, a distância coberta pelo corredor é igual à distância média por segundo (sua velocidade escalar média) multiplicada pelo número de segundos (o tempo transcorrido) que ele corre.

Solução Para acharmos a distância percorrida, reescrevemos a Equação 2.1 como

$$\text{Distância} = (\text{Velocidade escalar média})(\text{Tempo transcorrido}) = (2{,}22 \text{ m/s})(5400 \text{ s}) = \boxed{12\,000 \text{ m}}$$

A velocidade escalar é um conceito útil, pois ela indica a rapidez com que um objeto está se movendo. Entretanto, a velocidade escalar não revela nada a respeito da direção nem do sentido do movimento. Para descrever tanto a rapidez com que um objeto se move quanto a direção e o sentido do seu movimento, precisamos do conceito da velocidade vetorial.

[3]Neste capítulo, os vetores deslocamento, velocidade e aceleração possuem a sua direção implícita; a representação de cada uma destas grandezas vetoriais se reduz a uma grandeza algébrica, isto é, dotada de sinal, na qual o sinal indica um dos dois sentidos possíveis. (N.T.)

[4]Como estamos nos referindo à rapidez, sem qualquer menção nem à direção nem ao sentido, esta velocidade é a velocidade escalar (*speed* em inglês). (N.T.)

■ Velocidade Vetorial Média

Para definirmos a velocidade vetorial[5] de um objeto, usaremos dois conceitos que já vimos: deslocamento e tempo. A construção de novos conceitos a partir de conceitos mais básicos é um tema comum na física. Na verdade, o grande poder da física como uma ciência está na sua construção de um entendimento coerente da natureza através do desenvolvimento de conceitos inter-relacionados.

Suponha que a posição inicial do carro da Figura 2.1 seja $\vec{\mathbf{x}}_0$ quando o tempo é t_0. Pouco depois, o carro chega à posição final $\vec{\mathbf{x}}$ no tempo t. A diferença entre estes tempos é o tempo necessário para que o carro se desloque entre as duas posições. Representamos esta diferença pela notação abreviada Δt (ler como "delta t"), em que Δt representa o tempo final t menos o tempo inicial t_0:

$$\Delta t = \underbrace{t - t_0}_{\substack{\text{Tempo}\\ \text{transcorrido}}}$$

Observe que Δt é definido de maneira análoga a $\Delta\vec{\mathbf{x}}$, que é a posição final menos a posição inicial ($\Delta\vec{\mathbf{x}} = \vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{x}}_0$). Dividindo o deslocamento $\Delta\vec{\mathbf{x}}$ do carro pelo tempo transcorrido Δt, obtém-se o ***vetor velocidade média*** do carro. Costuma-se representar o valor médio de uma grandeza colocando-se uma barra horizontal acima do símbolo que representa a grandeza. O vetor velocidade média, portanto, é escrito como $\bar{\vec{\mathbf{v}}}$, como especificado na Equação 2.2:

Figura 2.2 Os barcos nesta fotografia estão se deslocando em sentidos contrários; em outras palavras, o vetor velocidade de um barco aponta em um sentido que é contrário ao do vetor velocidade do outro barco. (© Vadim Kulikov | Dreamstime.com)

Definição de Vetor Velocidade Média

$$\text{Velocidade vetorial média} = \frac{\text{Deslocamento}}{\text{Tempo transcorrido}}$$

$$\bar{\vec{\mathbf{v}}} = \frac{\vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{x}}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\vec{\mathbf{x}}}{\Delta t} \tag{2.2}$$

Unidade SI de Velocidade Média:[6] metro por segundo (m/s)

A Equação 2.2 indica que a unidade do vetor velocidade média é a unidade de comprimento dividida pela unidade de tempo, ou metros por segundo (m/s) em unidades SI. O vetor velocidade também pode ser expresso em outras unidades, como, por exemplo, quilômetros por hora (km/h) ou milhas por hora (mi/h).

O vetor velocidade média é um vetor que aponta na mesma direção e no mesmo sentido que o deslocamento na Equação 2.2. A Figura 2.2 ilustra que o vetor velocidade de um objeto, com a restrição de se mover ao longo de uma reta, pode apontar apenas em um sentido ou no sentido contrário. Como no caso do deslocamento, usaremos os sinais de mais e de menos para indicar os dois sentidos possíveis para uma dada direção. Se o deslocamento apontar no sentido positivo, o vetor velocidade média será positivo. Por outro lado, se o deslocamento apontar no sentido negativo, o vetor velocidade média será negativo. O Exemplo 2 ilustra essas características do vetor velocidade média.

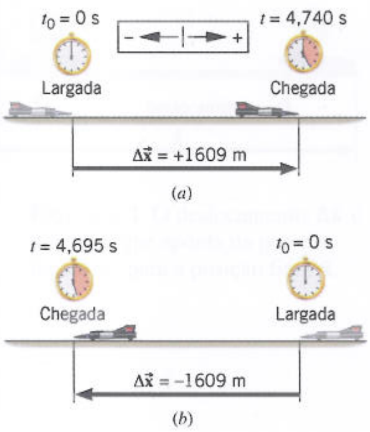

Figura 2.3 As setas dentro da caixa, no alto do desenho, indicam os sentidos positivo e negativo para os deslocamentos do carro, como explicado no Exemplo 2.

Exemplo 2 O Carro com Motor a Jato Mais Rápido do Mundo

Andy Green, no carro *ThrustSSC*, estabeleceu um recorde mundial de 341,1 m/s (763 mi/h) em 1997. O carro era impulsionado por dois motores a jato, e foi o primeiro a ultrapassar oficialmente a velocidade do som. Para estabelecer este recorde, o piloto fez duas corridas pela pista, uma em cada sentido, para anular efeitos do vento. A Figura 2.3*a* mostra que o carro primeiramente se desloca da esquerda para a direita, cobrindo uma distância de 1609 m (1 milha) em um tempo igual a 4,740 s. A Figura 2.3*b* mostra que, no sentido contrário, o carro cobre a mesma distância em 4,695 s. Partindo destes dados, determine a velocidade média (com módulo e sinal correspondente ao sentido) para cada corrida.

Raciocínio A velocidade média algébrica[7] é definida como o deslocamento algébrico dividido pelo tempo transcorrido. Ao usarmos esta definição, reconhecemos que o deslocamento não é o mesmo que a distância percorrida. O deslocamento leva em conta a direção e o sentido do movimento, enquanto a distância percorrida não considera estas informações. Durante as duas corridas, o carro cobre a mesma distância de 1609 m. Entretanto, para a primeira corrida o deslocamento é $\Delta\vec{\mathbf{x}} = +1609$ m,

---

[5]Neste capítulo, a velocidade vetorial, ou vetor velocidade, se reduz à velocidade escalar acrescida de um sinal algébrico que indica o sentido do movimento. (N.T.)

[6]Na verdade, a unidade de velocidade é a mesma tanto para a velocidade escalar quanto para o vetor velocidade; tanto para velocidades médias quanto para velocidades instantâneas. (N.T.)

[7]Representação do vetor velocidade em 1D. (N.T.)

enquanto para a segunda ele é $\Delta\vec{x} = -1609$ m. Os sinais de mais e de menos são essenciais, pois a primeira corrida é para a direita, que está no sentido positivo, e a segunda corrida está no sentido contrário ou sentido negativo.

Solução De acordo com a Equação 2.2, as velocidades algébricas médias são

Corrida 1
$$\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} = \frac{+1609 \text{ m}}{4{,}740 \text{ s}} = \boxed{+339{,}5 \text{ m/s}}$$

Corrida 2
$$\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} = \frac{-1609 \text{ m}}{4{,}695 \text{ s}} = \boxed{-342{,}7 \text{ m/s}}$$

Nestas respostas, os sinais algébricos transmitem informações sobre os sentidos dos vetores velocidade para uma mesma direção. Em particular, o sinal negativo para a corrida 2 indica que o vetor velocidade média, da mesma forma que o vetor deslocamento, aponta para a esquerda na Figura 2.3*b*. Os módulos dos vetores velocidades são iguais a 339,5 e 342,7 m/s. A média destes números é igual a 341,1 m/s e está registrada no livro de recordes.

■ Vetor Velocidade Instantânea

Suponha que o módulo de seu vetor velocidade média para uma viagem longa foi de 20 m/s. Este valor, sendo um valor médio, não transmite nenhuma informação a respeito da rapidez com que você estava se movendo nem da direção e do sentido em nenhum instante durante a viagem. Todos podem mudar de um instante para o outro. Certamente houve instantes em que seu carro se deslocou a mais de 20 m/s e instantes em que ele se deslocou mais lentamente. O ***vetor velocidade instantânea*** $\vec{v}$ do carro informa com que rapidez o carro se move e em que direção e sentido[8] ocorre o movimento em cada instante de tempo. O módulo do vetor velocidade instantânea é chamado de ***velocidade escalar instantânea***, correspondendo ao número (com unidades) que aparece no velocímetro.

O vetor velocidade instantânea em qualquer ponto durante uma viagem pode ser obtido medindo-se o intervalo de tempo Δt necessário para que o carro percorra um deslocamento *muito pequeno* $\Delta\vec{x}$. Podemos, então, calcular o vetor velocidade média neste intervalo. Se o intervalo Δt for suficientemente pequeno, o vetor velocidade instantânea não varia muito durante a medição. Portanto, o vetor velocidade instantânea $\vec{v}$ no ponto de interesse é aproximadamente igual ($\approx$) ao vetor velocidade média $\bar{\vec{v}}$ calculado no intervalo ou $\vec{v} \approx \bar{\vec{v}} = \Delta\vec{x}/\Delta t$ (para Δt suficientemente pequeno). Na verdade, no limite quando Δt se torna infinitesimalmente pequeno, o vetor velocidade instantânea e o vetor velocidade média ficam iguais, de modo que

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} \tag{2.3}$$

A notação $\lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}$ significa que a razão $\Delta\vec{x}/\Delta t$ é definida por um processo limite, no qual valores cada vez menores de Δt são usados, tão pequenos que eles se aproximam de zero. Quando valores menores de Δt são usados, $\Delta\vec{x}$ também se torna menor. No entanto, o quociente $\Delta\vec{x}/\Delta t$ *não* se anula; em vez disso, se aproxima do valor do vetor velocidade instantânea. Por brevidade, usaremos as palavras *vetor velocidade* para significar "vetor velocidade instantânea" e *velocidade escalar* para significar "velocidade escalar instantânea".

Verifique Seu Entendimento

(As respostas são dadas no final do livro.)

2. A velocidade escalar média de um veículo é uma grandeza vetorial ou escalar?
3. Dois ônibus partem de Chicago, um indo para Nova Iorque e outro para São Francisco. Cada ônibus viaja a uma velocidade escalar de 30 m/s. Eles têm as mesmas velocidades vetoriais?
4. Uma das afirmativas a seguir não está correta. (**a**) O carro se deslocou ao redor da pista circular a uma velocidade vetorial constante. (**b**) O carro se deslocou ao redor da pista circular com velocidade escalar constante. Qual afirmativa não está correta?
5. Uma pista reta tem 1600 m de comprimento. Um corredor sai da linha de largada, corre de oeste para leste todo o comprimento da pista, inverte seu sentido de percurso e corre a metade do caminho de volta. O tempo para esta corrida é de cinco minutos. Qual a velocidade vetorial média do corredor e qual a sua velocidade escalar média?
6. A velocidade vetorial média para um passeio tem um valor positivo. É possível que o vetor velocidade instantânea em um ponto durante o passeio tenha um valor negativo?

[8]No movimento unidimensional, ao qual se limita este capítulo, a direção do movimento, por se manter a mesma, está implícita. O vetor fica inteiramente definido pela velocidade escalar, acrescida de um sinal algébrico, que fornece o sentido do movimento. (N.T.)

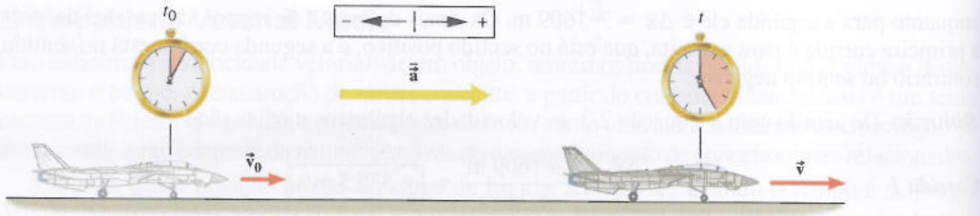

Figura 2.4 Durante a decolagem, o avião acelera de uma velocidade inicial $\vec{v}_0$ até uma velocidade final $\vec{v}$ durante o intervalo de tempo $\Delta t = t - t_0$.

2.3 Aceleração

Em uma vasta variedade de movimentos, o vetor velocidade varia a cada instante. Para descrever a maneira como ele varia, é necessário o conceito de aceleração. O vetor velocidade de um objeto em movimento pode modificar-se de diversas maneiras. Por exemplo, ele pode aumentar quando o motorista de um carro pisa no pedal do acelerador para ultrapassar o carro à sua frente. Ou ele pode diminuir, quando o motorista pisa no freio para parar em um sinal vermelho. Tanto num caso quanto no outro, a variação do vetor velocidade pode ocorrer em um intervalo de tempo curto ou longo. Para descrever como o vetor velocidade de um objeto se modifica durante um dado intervalo de tempo, apresentamos agora a ideia nova de aceleração. Esta ideia depende de dois conceitos que já encontramos anteriormente: velocidade e tempo. Especificamente, a noção de aceleração surge quando a *variação* do vetor velocidade é combinada com o tempo durante o qual ocorre a variação.

O significado de ***vetor aceleração média*** pode ser ilustrado considerando-se um avião durante a decolagem. A Figura 2.4 se concentra em como o vetor velocidade do avião se modifica ao longo da pista de decolagem. Durante um intervalo de tempo transcorrido $\Delta t = t - t_0$, o vetor velocidade varia de um valor inicial $\vec{v}_0$ até um valor final de velocidade $\vec{v}$. A variação $\Delta\vec{v}$ da velocidade do avião é a sua velocidade final menos a sua velocidade inicial, de modo que $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$. O vetor aceleração média $\vec{\bar{a}}$ é definido da seguinte maneira, a fim de fornecer uma medida de quanto o vetor velocidade varia por unidade de tempo transcorrido.

Definição de Vetor Aceleração Média

$$\text{Vetor aceleração média} = \frac{\text{Variação do vetor velocidade}}{\text{Tempo transcorrido}}$$

$$\vec{\bar{a}} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Unidade SI de Aceleração Média: metro por segundo ao quadrado (m/s^2).

O vetor aceleração média $\vec{\bar{a}}$ é um vetor que aponta na mesma direção e no mesmo sentido que $\Delta\vec{v}$, a variação da velocidade. Seguindo o costume usual, sinais de mais e de menos indicam os dois sentidos possíveis para o vetor aceleração quando o movimento ocorre ao longo de uma linha reta.

Frequentemente estamos interessados na aceleração de um objeto em um instante particular de tempo. O ***vetor aceleração instantânea*** $\vec{a}$ pode ser definido por analogia com o procedimento usado na Seção 2.2 para o vetor velocidade instantânea:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \tag{2.5}$$

A Equação 2.5 indica que a aceleração instantânea é um caso limite da aceleração média. Quando o intervalo de tempo Δt para medição da aceleração se torna extremamente pequeno (aproximando-se de zero no limite), a aceleração média e a aceleração instantânea se tornam iguais. Além disso, em muitas situações a aceleração é constante, portanto a aceleração possui o mesmo valor em qualquer instante de tempo. No resto do texto, usaremos a palavra *aceleração* para significar "aceleração instantânea". O Exemplo 3 trata da aceleração de um avião durante a decolagem.

Exemplo 3 Aceleração e Velocidade Crescente

Suponha que o avião da Figura 2.4 parta do repouso ($\vec{v}_0 = 0$ m/s) quando $t_0 = 0$ s. O avião acelera na pista de decolagem e no tempo $t = 29$ s atinge uma velocidade $\vec{v} = +260$ km/h, em que o sinal de mais indica que o vetor velocidade aponta para a direita. Determine a aceleração média do avião.

Raciocínio O vetor aceleração média do avião é definido como a variação do seu vetor velocidade dividida pelo tempo transcorrido. A variação da velocidade do avião é a sua velocidade final $\vec{v}$ menos a sua velocidade inicial $\vec{v}_0$, ou $\vec{v} - \vec{v}_0$. O tempo transcorrido é o tempo final t menos o tempo inicial t_0, ou $t - t_0$.

Solução A aceleração média é expressa pela Equação 2.4 como[9]

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}\ \ \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{260\ \text{km/h} - 0\ \text{km/h}}{29\ \text{s} - 0\ \text{s}} = \boxed{+9{,}0\ \frac{\text{km/h}}{\text{s}}}$$

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** A variação de qualquer variável no tempo é o valor final menos o valor inicial: por exemplo, a variação da velocidade é $\Delta\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ e a variação do tempo é $(\Delta t = t - t_0)$.

A aceleração média calculada no Exemplo 3 é lida como "nove quilômetros por hora por segundo". Supondo que a aceleração do avião seja constante, um valor de +9,0 (km/h)/s significa que a velocidade varia em +9,0 km/h a cada segundo do movimento. Durante o primeiro segundo, a velocidade aumenta de 0 até 9,0 km/h; durante o segundo seguinte, a velocidade aumenta outros 9,0 km/h até 18 km/h, e assim por diante. A Figura 2.5 ilustra como a velocidade varia durante os dois primeiros segundos. Ao fim do 29º segundo, a velocidade é igual a 260 km/h.

É comum expressar a aceleração unicamente em termos de unidades SI. Uma forma de se obter unidades SI para a aceleração no Exemplo 3 é converter as unidades de velocidade de km/h para m/s:

$$\left(260\ \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}}\right)\left(\frac{1000\ \text{m}}{1\ \cancel{\text{km}}}\right)\left(\frac{1\ \cancel{\text{h}}}{3600\ \text{s}}\right) = 72\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Portanto, a aceleração média passa a ser

$$\vec{a} = \frac{72\ \text{m/s} - 0\ \text{m/s}}{29\ \text{s} - 0\ \text{s}} = +2{,}5\ \text{m/s}^2$$

em que usamos 2,5 (m/s)/s = 2,5 m/(s · s) = 2,5 m/s². Uma aceleração de 2,5 m/s² é lida como "2,5 metros por segundo ao quadrado" (ou "2,5 metros por segundo por segundo") e significa que a velocidade varia em 2,5 m/s a cada segundo do movimento.

O Exemplo 4 trata de um caso em que o movimento se torna mais lento com o passar do tempo.

Exemplo 4 Aceleração e Velocidade Decrescente

Um piloto de provas de aceleração cruza a linha de chegada, quando ele abre um paraquedas e pisa no freio para reduzir a velocidade, como ilustrado na Figura 2.6. O piloto começa a reduzir sua velocidade quando $t_0 = 9{,}0$ s e a velocidade do carro é $\vec{v}_0 = +28$ m/s. Quando $t = 12{,}0$ s, a velocidade se reduziu para $\vec{v} = +13$ m/s. Qual é a aceleração média do piloto?

Raciocínio A aceleração média de um objeto é sempre especificada como sua variação de velocidade, $\vec{v} - \vec{v}_0$, dividida pelo tempo transcorrido, $t - t_0$. Isto é verdade tanto se a velocidade final for menor do que a velocidade inicial, quanto se for maior do que a velocidade inicial.

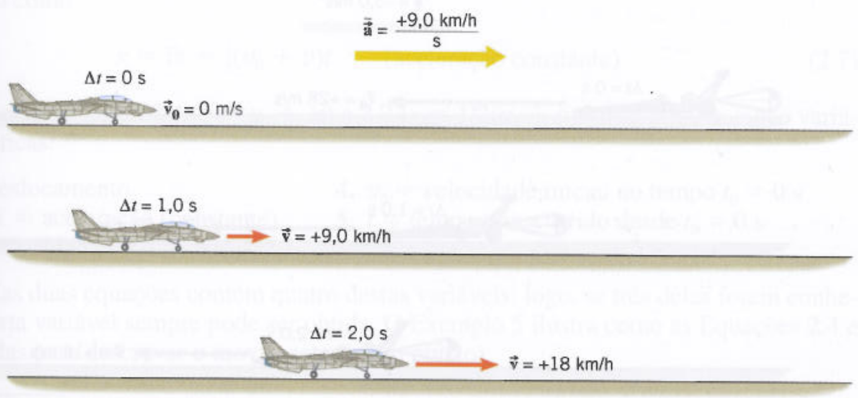

Figura 2.5 Uma aceleração de $+9{,}0\ \frac{\text{km/h}}{\text{s}}$ significa que, durante cada segundo do movimento, a velocidade do avião varia em +9,0 km/h. O sentido "+" para $\vec{a}$ e $\vec{v}$ é para a direita.

[9] O resultado final é o módulo do vetor aceleração. (N.T.)

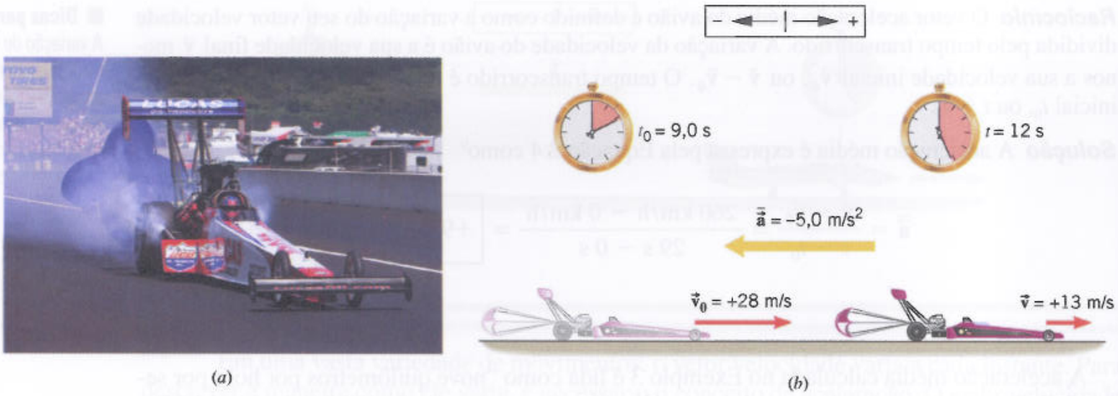

Figura 2.6 (*a*) Para reduzir sua velocidade, um piloto de velocidade abre um paraquedas e pisa no freio. (*b*) A velocidade do carro está diminuindo, dando origem a um vetor aceleração média $\vec{\bar{a}}$ que aponta na mesma direção mas no sentido contrário ao do vetor velocidade. (a. © Christopher Szagola/CSM/Landov LLC)

Solução A aceleração média é, de acordo com a Equação 2.4,

$$\vec{\bar{a}} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{13\ \text{m/s} - 28\ \text{m/s}}{12{,}0\ \text{s} - 9{,}0\ \text{s}} = \boxed{-5{,}0\ \text{m/s}^2}$$

■ Dicas para a Solução de Problemas.

A Figura 2.7 mostra como o vetor velocidade do piloto no Exemplo 4 varia durante a frenagem, supondo que a aceleração seja constante durante todo o movimento. A aceleração calculada no Exemplo 4 é negativa, indicando no desenho que a aceleração aponta para a esquerda. Consequentemente, os vetores aceleração e velocidade apontam na mesma direção mas em sentidos *contrários*. ***Sempre que os vetores aceleração e velocidade tiverem a mesma direção e sentidos contrários, o objeto está se movendo mais lentamente e diz-se que ele está "desacelerando"***. Em contraste, os vetores aceleração e velocidade na Figura 2.5 possuem a mesma direção e apontam no *mesmo* sentido, e o objeto está acelerado.

Verifique Seu Entendimento

(As respostas são dadas no final do livro.)

7. Em um instante de tempo, um carro e um caminhão estão trafegando lado a lado em faixas de rolamento adjacentes de uma autoestrada. O carro tem um vetor velocidade maior do que o caminhão. O carro tem necessariamente a maior aceleração?
8. Dois carros estão se movendo no mesmo sentido (positivo) em uma estrada reta. A aceleração de cada carro também aponta no sentido positivo. A aceleração do primeiro carro é maior do que a aceleração do segundo carro. Quais das afirmações a seguir são verdadeiras? **(a)** A velocidade

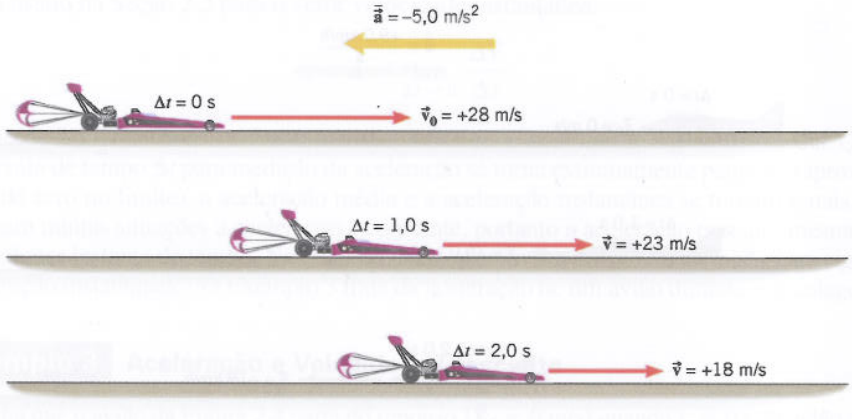

Figura 2.7 Neste caso, uma aceleração de −5,0 m/s² significa que o módulo do vetor velocidade diminui em 5,0 m/s durante cada segundo de tempo transcorrido.

do carro 1 é sempre maior que a velocidade do carro 2. (**b**) A velocidade do carro 2 é sempre maior que a velocidade do carro 1. (**c**) No mesmo intervalo de tempo, a velocidade do carro 1 varia mais que a velocidade do carro 2. (**d**) No mesmo intervalo de tempo, a velocidade do carro 2 varia mais que a velocidade do carro 1.

9. Um objeto se movendo com aceleração constante reduz a sua velocidade se a aceleração apontar no sentido contrário ao da velocidade. Mas é possível que um objeto fique parado permanentemente se a sua aceleração realmente permanecer constante?
10. Uma corredora corre metade da distância que resta para a linha de chegada a cada dez segundos. Ela corre em linha reta e nunca inverte seu sentido de percurso. A aceleração dela tem um módulo constante?

2.4 Equações da Cinemática para Aceleração Constante

Agora é possível descrever o movimento de um objeto que se movimenta com aceleração constante ao longo de uma linha reta. Para isso, usaremos um conjunto de equações conhecido como as equações da cinemática para aceleração constante.[10] Estas equações não incorporam novos conceitos, pois serão obtidas combinando-se as ideias já familiares de deslocamento, velocidade e aceleração. No entanto, elas fornecerão uma forma muito conveniente de se determinar certos aspectos do movimento, como a posição final e a velocidade de um objeto em movimento.

Ao discutir as equações da cinemática, será conveniente supor que o objeto está localizado na origem $\vec{\mathbf{x}}_0 = 0$ m quando $t_0 = 0$ s. Com esta hipótese, o deslocamento $\Delta\vec{\mathbf{x}} = \vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{x}}_0$ passa a ser $\Delta\vec{\mathbf{x}} = \vec{\mathbf{x}}$. Além disso, é comum omitir os símbolos em negrito com pequenas setas para os vetores deslocamento, velocidade e aceleração nas equações a seguir. Entretanto, continuaremos informando os sentidos destes vetores por meio dos sinais de mais e de menos.

Considere um objeto que possui uma velocidade inicial v_0 no tempo $t_0 = 0$ s e que se move durante um tempo t com uma aceleração constante a. Para uma descrição completa do movimento, também é necessário saber a velocidade e o deslocamento finais no tempo t. A velocidade final v pode ser obtida diretamente da Equação 2.4:

$$\bar{a} = a = \frac{v - v_0}{t} \quad \text{ou} \quad v = v_0 + at \qquad \text{(aceleração constante)} \tag{2.4}$$

O deslocamento x no tempo t pode ser obtido da Equação 2.2, se um valor para a velocidade média $\bar{v}$ puder ser obtido. Considerando a hipótese de que $\vec{\mathbf{x}}_0 = 0$ m em $t_0 = 0$ s, temos

$$\bar{v} = \frac{x - x_0}{t - t_0} = \frac{x}{t} \quad \text{ou} \quad x = \bar{v}t \tag{2.2}$$

Pelo fato de a aceleração ser constante, a velocidade aumenta a uma taxa constante. Portanto, a velocidade média $\bar{v}$ é o valor médio entre as velocidades inicial e final:

$$\bar{v} = \tfrac{1}{2}(v_0 + v) \qquad \text{(aceleração constante)} \tag{2.6}$$

A Equação 2.6, como a Equação 2.4, só se aplica se a aceleração for constante, não podendo ser usada quando a aceleração estiver variando. O deslocamento no tempo t pode agora ser determinado como

$$x = \bar{v}t = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \qquad \text{(aceleração constante)} \tag{2.7}$$

Observe nas Equações 2.4 ($v = v_0 + at$) e 2.7 [$x = 1/2(v_0 + v)t$] que existem cinco variáveis cinemáticas:

1. x = deslocamento
2. $a = \bar{a}$ = aceleração (constante)
3. v = velocidade final no tempo t
4. v_0 = velocidade inicial no tempo $t_0 = 0$ s
5. t = tempo transcorrido desde $t_0 = 0$ s

Cada uma das duas equações contém quatro destas variáveis; logo, se três delas forem conhecidas, a quarta variável sempre pode ser obtida. O Exemplo 5 ilustra como as Equações 2.4 e 2.7 são usadas para descrever o movimento de um objeto.

[10] Também conhecidas como equações do movimento retilíneo uniformemente variado (acelerado se a velocidade escalar estiver aumentando e retardado se ela estiver diminuindo). Nestas equações, o deslocamento, a velocidade e a aceleração devem ser considerados com um sinal que leva em conta o sentido destes vetores. (N.T.)

Análise de Problemas com Múltiplos Conceitos

Exemplo 5 Deslocamento de uma Lancha de Corrida

A lancha de corrida na Figura 2.8 possui uma aceleração constante de $+2{,}0\ \text{m/s}^2$. Determine o deslocamento da lancha após 8,0 segundos se a velocidade inicial da lancha for igual a $+6{,}0$ m/s.

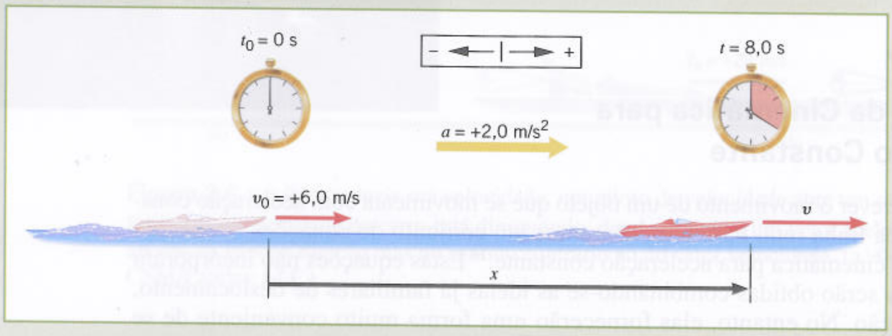

Figura 2.8 Uma lancha de corrida acelerando. O deslocamento x da lancha pode ser determinado se a aceleração, a velocidade inicial e o tempo de percurso da lancha forem conhecidos.

Raciocínio Enquanto a lancha de corrida acelera, sua velocidade está variando. O deslocamento da lancha de corrida em um dado intervalo de tempo é igual ao produto da sua velocidade média durante esse intervalo pelo tempo. A velocidade média, por sua vez, é simplesmente a metade da soma das velocidades inicial e final da lancha. Para obtermos a velocidade final, usaremos a definição de aceleração constante dada na Equação 2.4.

Dados Conhecidos e Incógnitas Os valores numéricos para as três variáveis conhecidas estão listados na tabela:

Descrição	Símbolo	Valor	Comentário
Aceleração	a	$+2{,}0\ \text{m/s}^2$	Positiva, pois a lancha está acelerando para a direita, que é o sentido positivo. Veja a Figura 2.8.
Velocidade inicial	v_0	$+6{,}0$ m/s	Positiva, pois a lancha está se movendo para a direita, que é o sentido positivo. Veja a Figura 2.8.
Intervalo de tempo	t	8,0 s	
Variável Desconhecida			
Deslocamento da lancha	x	?	

Modelando o Problema

PASSO 1 **Deslocamento** Como a aceleração é constante, o deslocamento x da lancha é dado pela Equação 2.7, na qual v_0 e v são as velocidades inicial e final, respectivamente. Nesta equação, duas das variáveis, v_0 e t, são conhecidas (veja a tabela de Dados Conhecidos e Incógnitas), mas a velocidade final é uma incógnita. No entanto, a velocidade final pode ser determinada empregando-se a definição de aceleração, como mostra o Passo 2.

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \quad (2.7)$$

?

PASSO 2 **Aceleração** De acordo com a Equação 2.4, que é simplesmente a definição de aceleração constante, a velocidade final v da lancha é

$$\boxed{v = v_0 + at} \quad (2.4)$$

Todas as variáveis do lado direito do sinal de igualdade são conhecidas, e podemos substituir esta relação no lugar de v na Equação 2.7, como mostrado à direita.

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \quad (2.7)$$

$$\boxed{v = v_0 + at} \quad (2.4)$$

Solução Combinando algebricamente os resultados dos Passos 1 e 2, obtemos

PASSO 1 PASSO 2

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t = \tfrac{1}{2}[v_0 + (v_0 + at)]t = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$$

O deslocamento da lancha após 8,0 s é

$$x = v_0t + \tfrac{1}{2}at^2 = (+6{,}0\ \text{m/s})(8{,}0\ \text{s}) + \tfrac{1}{2}(+2{,}0\ \text{m/s}^2)(8{,}0\ \text{s})^2 = \boxed{+112\ \text{m}}$$

Trabalho a Ser Resolvido em Casa Associado: ***Problemas 39 e 55*** ■

No Exemplo 5, combinamos duas equações [$x = 1/2(v_0 + v)t$ e $v = v_0 + at$] em uma única equação eliminando algebricamente a velocidade final v da lancha de corrida (que era desconhecida). O resultado foi a seguinte expressão para o deslocamento x da lancha de corrida:

$$x = v_0t + \tfrac{1}{2}at^2 \qquad \text{(aceleração constante)} \tag{2.8}$$

O primeiro termo (v_0t) do lado direito desta equação representa o deslocamento que ocorreria se a aceleração fosse nula e a velocidade permanecesse constante com seu valor inicial igual a v_0. O segundo termo ($(1/2)at^2$) fornece o deslocamento adicional que surge pelo fato de a velocidade variar (a aceleração a não ser nula), assumindo valores que são diferentes de seu valor inicial. Agora voltamos nossa atenção para outro exemplo de movimento acelerado.

Análise de Problemas com Múltiplos Conceitos

Exemplo 6 A Física de Catapultar um Jato

Um jato está decolando do convés de um porta-aviões, como mostrado na Figura 2.9. Partindo do repouso, o jato é catapultado com uma aceleração constante de $+31\ \text{m/s}^2$ ao longo de uma reta e alcança uma velocidade de $+62$ m/s. Determine o deslocamento do jato.

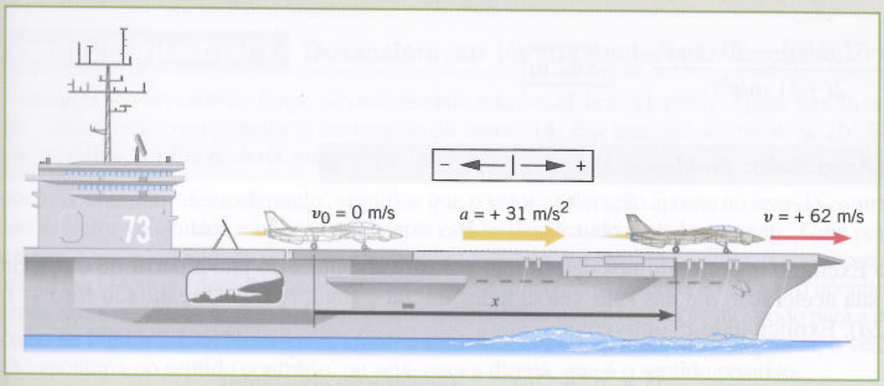

Figura 2.9 Um jato está sendo lançado de um porta-aviões. Durante o lançamento, uma catapulta acelera o jato ao longo do convés de voo.

Raciocínio Quando o jato está sendo acelerado, sua velocidade está variando. O deslocamento do jato durante um dado intervalo de tempo é igual ao produto da sua velocidade média durante esse intervalo pelo tempo, a velocidade média sendo igual à metade da soma das velocidades inicial e final do jato. As velocidades inicial e final são conhecidas, mas não o tempo. O tempo, entretanto, pode ser determinado a partir do conhecimento da aceleração do jato.

Dados Conhecidos e Incógnitas Os dados para este problema estão listados a seguir

Descrição	Símbolo	Valor	Comentário
Dados Explícitos			
Aceleração	a	$+31\ \text{m/s}^2$	Positiva, pois a aceleração aponta no sentido positivo. Veja a Figura 2.9.
Velocidade final	v	$+62$ m/s	Positiva, pois a velocidade final aponta no sentido positivo. Veja a Figura 2.9.
Dados Implícitos			
Velocidade inicial	v_0	0 m/s	O jato parte do repouso
Incógnita			
Deslocamento do jato	x	?	

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** Dados implícitos são importantes. Por exemplo, no Exemplo 6 a expressão "partindo do repouso" significa que a velocidade inicial é igual a zero ($v_0 = 0$ m/s).

Continua

Modelando o Problema

PASSO 1 **Deslocamento** O deslocamento x do jato é dado pela Equação 2.7, já que a aceleração é constante durante o lançamento. Consultando a tabela Dados Conhecidos e Incógnitas, vemos que as velocidades inicial e final, v_0 e v, nesta relação são conhecidas. O tempo t é uma incógnita que pode ser determinada usando-se a definição de aceleração (veja o Passo 2).

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \qquad (2.7)$$

?

PASSO 2 **Aceleração** A aceleração de um objeto é definida pela Equação 2.4 como a variação da velocidade, $v - v_0$, dividida pelo tempo transcorrido t:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \qquad (2.4)$$

Explicitando t fornece

$$\boxed{t = \frac{v - v_0}{a}}$$

Todas as variáveis do lado direito do sinal de igualdade são conhecidas, e podemos substituir este resultado para t na Equação 2.7, como mostrado à direita.

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \qquad (2.7)$$

$$\boxed{t = \frac{v - v_0}{a}}$$

Solução Combinando algebricamente os resultados dos Passos 1 e 2, concluímos que

PASSO 1 PASSO 2

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)\left(\frac{v - v_0}{a}\right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

O deslocamento do jato é

$$x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(+62\text{ m/s})^2 - (0\text{ m/s})^2}{2(+31\text{ m/s}^2)} = \boxed{+62\text{ m}}$$

Trabalho a Ser Resolvido em Casa Associado: *Problemas 27 e 51* ■

No Exemplo 6, conseguimos determinar o deslocamento x do jato a partir do conhecimento da sua aceleração a e das suas velocidades inicial e final, v_0 e v. O resultado foi $x = (v^2 - v_0^2)/(2a)$. Explicitando v^2 obtivemos

$$v^2 = v_0^2 + 2ax \qquad \text{(aceleração constante)} \qquad (2.9)$$

A Equação 2.9 é frequentemente usada quando não se conhece o tempo envolvido no movimento, isto é, ele é uma incógnita.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo das equações que empregamos até agora. Estas equações são conhecidas como ***equações da cinemática***. Cada equação contém quatro das cinco variáveis cinemáticas, indicadas pelo símbolo de verificado (✓) na tabela. A próxima seção mostra como aplicar as equações da cinemática.

Tabela 2.1 Equações da Cinemática para Aceleração Constante

Número da Equação	Equação	Variáveis x	a	v	v_0	t
(2.4)	$v = v_0 + at$	—	✓	✓	✓	✓
(2.7)	$x = 1/2\,(v_0 + v)t$	✓	—	✓	✓	✓
(2.8)	$x = v_0 t + 1/2 at^2$	✓	✓	—	✓	✓
(2.9)	$v^2 = v_0^2 + 2ax$	✓	✓	✓	✓	—

Verifique Seu Entendimento

(As respostas são dadas no final do livro.)

11. A velocidade de saída de uma arma é a velocidade do projétil quando ele sai do cano. A velocidade de saída de um rifle com um cano curto é maior do que a velocidade de saída de outro rifle que possui um cano mais longo. Em qual rifle a aceleração do projétil é maior?
12. Uma motocicleta parte do repouso e mantém uma aceleração constante. Em um intervalo de tempo t, ela sofre um deslocamento x e atinge uma velocidade final v. O tempo t é então aumentado de modo que o deslocamento seja igual a $3x$. Neste mesmo intervalo de tempo ampliado, qual a velocidade final que a motocicleta alcança?

2.5 Aplicações das Equações da Cinemática

As equações da cinemática podem ser usadas para qualquer objeto em movimento, contanto que a aceleração do objeto seja constante. Lembre-se, no entanto, de que cada equação contém quatro variáveis. Consequentemente, valores numéricos de três das quatro variáveis devem estar disponíveis para que uma equação seja usada para calcular o valor da incógnita restante. A fim de evitar erros ao usar estas equações, é sempre útil seguir algumas diretrizes de bom senso e estar atento para algumas situações que podem surgir durante seus cálculos.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** ***Decida, logo no início, que sentidos serão chamados de positivo (+) e de negativo (−) em relação a uma origem de coordenadas escolhida convenientemente.*** Esta decisão é arbitrária, mas importante, pois o deslocamento, a velocidade e a aceleração são vetores, e os seus sentidos devem ser sempre levados em conta. Nos exemplos a seguir, os sentidos positivo e negativo serão mostrados nos desenhos que acompanham os problemas. Não importa que sentido foi escolhido como positivo. Entretanto, uma vez feita a escolha, ela não deveria ser alterada durante o processo de cálculo.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** ***Ao raciocinar sobre um problema antes de tentar resolvê-lo, não se esqueça de interpretar corretamente os termos "desacelerando" ou "desaceleração", caso eles apareçam no enunciado do problema.*** Estes termos são frequentemente fonte de confusão, e o Exemplo Conceitual 7 fornece ajuda para entendê-los.

Exemplo Conceitual 7 Desaceleração *Versus* Aceleração Negativa

Um carro está se movendo ao longo de uma estrada reta e está desacelerando. Quais das afirmações a seguir descrevem corretamente a aceleração do carro? **(a)** Ela tem que ser positiva. **(b)** Ela tem que ser negativa. **(c)** Ela poderia ser positiva ou negativa.

Raciocínio O termo "desacelerando" significa que o vetor aceleração aponta no sentido contrário ao sentido do vetor velocidade e indica que o carro está se deslocando mais lentamente. Uma possibilidade é que o vetor velocidade do carro aponte para a direita, no sentido positivo, como mostrado na Figura 2.10*a*. O termo "desacelerando" implica, então, que o vetor aceleração do carro aponta para a esquerda, que é o sentido negativo. Outra possibilidade é que o carro esteja se movendo para a esquerda, como na Figura 2.10*b*. Neste caso, como o vetor velocidade aponta para a esquerda, o vetor aceleração apontaria no sentido contrário, ou seja, para a direita, que é o sentido positivo.

As respostas (a) e (b) estão incorretas. O termo "desacelerando" significa apenas que o vetor aceleração aponta no sentido contrário ao do vetor velocidade. Ele não especifica se o vetor velocidade do carro aponta no sentido positivo ou negativo. Portanto, não é possível saber se a aceleração é positiva ou negativa.

A resposta (c) está correta. Como mostrado na Figura 2.10, o vetor aceleração do carro poderia apontar no sentido positivo ou negativo, de modo que a aceleração poderia ser positiva ou negativa, dependendo do sentido em que o carro esteja se movendo.

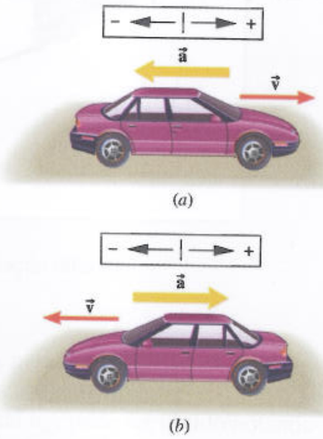

Figura 2.10 Quando um carro desacelera ao longo de uma estrada reta, o vetor aceleração aponta no sentido contrário ao do vetor velocidade, como discutido no Exemplo Conceitual 7.

Trabalho a Ser Resolvido em Casa Associado: *Problemas 14 e 73* ■

Às vezes existem duas respostas possíveis para um problema de cinemática, cada resposta correspondendo a uma situação diferente. O Exemplo 8 discute um caso onde ocorre esta situação.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.**

Exemplo 8 A Física de Retrofoguetes de uma Espaçonave

A espaçonave mostrada na Figura 2.11*a* está viajando com uma velocidade de +3250 m/s. Subitamente, os retrofoguetes são disparados, e a espaçonave começa a se mover mais lentamente com uma aceleração cujo módulo é igual a 10,0 m/s². Qual a velocidade da espaçonave quando o deslocamento da nave é igual a +215 km, em relação ao ponto onde os retrofoguetes começaram a atuar?

Raciocínio Como a espaçonave está reduzindo sua velocidade, o vetor aceleração tem que ser contrário ao vetor velocidade. A velocidade aponta para a direita no desenho, logo a aceleração aponta para a esquerda, no sentido negativo; assim, $a = -10{,}0\ \text{m/s}^2$. As três variáveis conhecidas estão listadas na tabela a seguir:

Dados da Espaçonave

x	a	v	v_0	t
+215 000 m	−10,0 m/s²	?	+3250 m/s	

A velocidade final v da espaçonave pode ser calculada usando-se a Equação 2.9, já que ela contém as quatro variáveis pertinentes.

Solução Da Equação 2.9 ($v^2 = v_0^2 + 2ax$), obtivemos

$$v = \pm\sqrt{v_0^2 + 2ax} = \pm\sqrt{(3250\ \text{m/s})^2 + 2(-10{,}0\ \text{m/s}^2)(215\ 000\ \text{m})}$$
$$= \boxed{+2500\ \text{m/s}} \quad \text{e} \quad \boxed{-2500\ \text{m/s}}$$

Estas duas respostas correspondem ao *mesmo* deslocamento ($x = +215$ km), mas cada uma ocorre em uma parte diferente do movimento. A resposta $v = +2500$ m/s corresponde à situação da Figura 2.11*a*, na qual a espaçonave reduziu o módulo de sua velocidade para 2500 m/s, mas ainda está se deslocando para a direita. A resposta $v = -2500$ m/s surge porque os retrofoguetes, após certo tempo, trazem a espaçonave a uma parada momentânea e fazem com que ela inverta seu sentido de movimento. A partir deste ponto, ela se move para a esquerda e o módulo de sua velocidade (ou seja, sua velocidade escalar) aumenta pelo fato de os foguetes estarem funcionando continuamente. Após certo tempo, a velocidade da nave passa a ser $v = -2500$ m/s, dando origem à situação da Figura 2.11*b*. Nas duas partes do desenho, a espaçonave possui o mesmo deslocamento, mas na parte *b* é necessário um tempo de viagem maior quando comparado com o da parte *a*. ■

■ Dicas para a Solução de Problemas.

O movimento de dois objetos pode estar inter-relacionado e, neste caso, eles compartilham uma variável comum. O fato de os movimentos estarem inter-relacionados é uma informação importante. Nestes casos, dados para apenas duas variáveis precisam ser especificados para cada objeto.

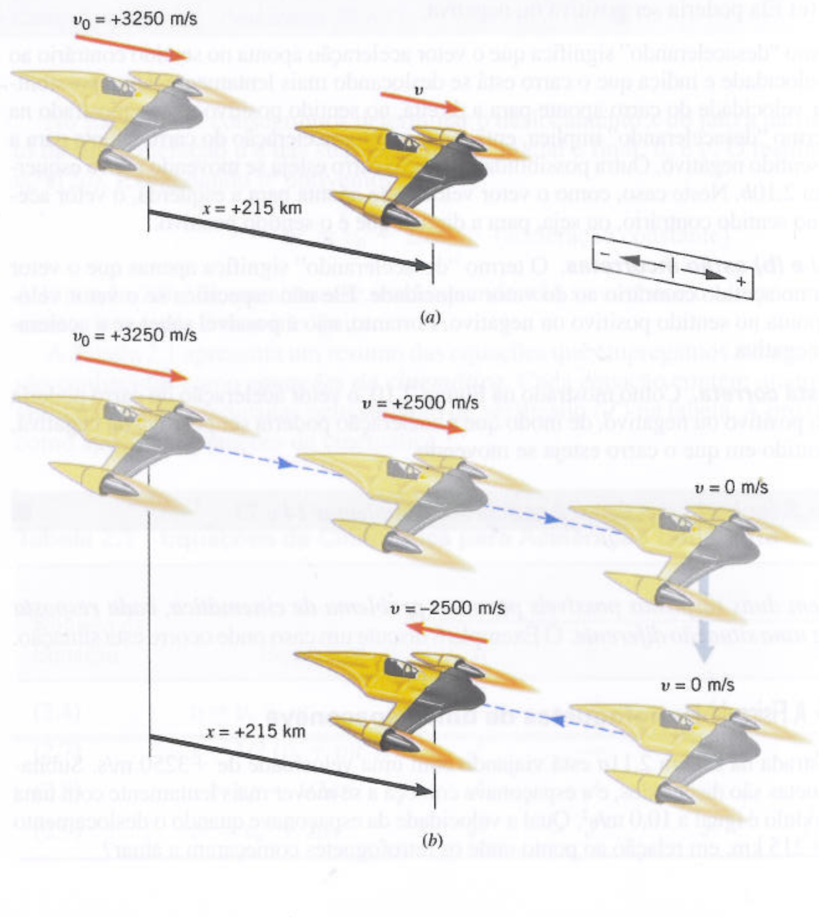

Figura 2.11 (*a*) Por causa de uma aceleração de $-10{,}0\ \text{m/s}^2$, a espaçonave altera sua velocidade de v_0 para v. (*b*) O funcionamento contínuo dos retrofoguetes altera o sentido do movimento da nave.

Frequentemente, o movimento de um objeto é dividido em dois trechos, cada um com uma aceleração diferente. Ao resolver tais problemas, é importante levar em conta que a velocidade final para um trecho é a velocidade inicial para o trecho seguinte, como ilustrado no Exemplo 9.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.**

Análise de Problemas com Múltiplos Conceitos

Exemplo 9 Um Passeio de Motocicleta

Um passeio de motocicleta consiste em dois trechos, como mostrado na Figura 2.12*a*. Durante o trecho 1, a motocicleta parte do repouso, tem uma aceleração de $+2{,}6\ \text{m/s}^2$ e um deslocamento de $+120$ m. Imediatamente após o trecho 1, a motocicleta entra no trecho 2 e começa a diminuir sua velocidade com uma aceleração de $-1{,}5\ \text{m/s}^2$ até que a sua velocidade seja igual a $+12$ m/s. Qual o deslocamento da motocicleta durante o trecho 2?

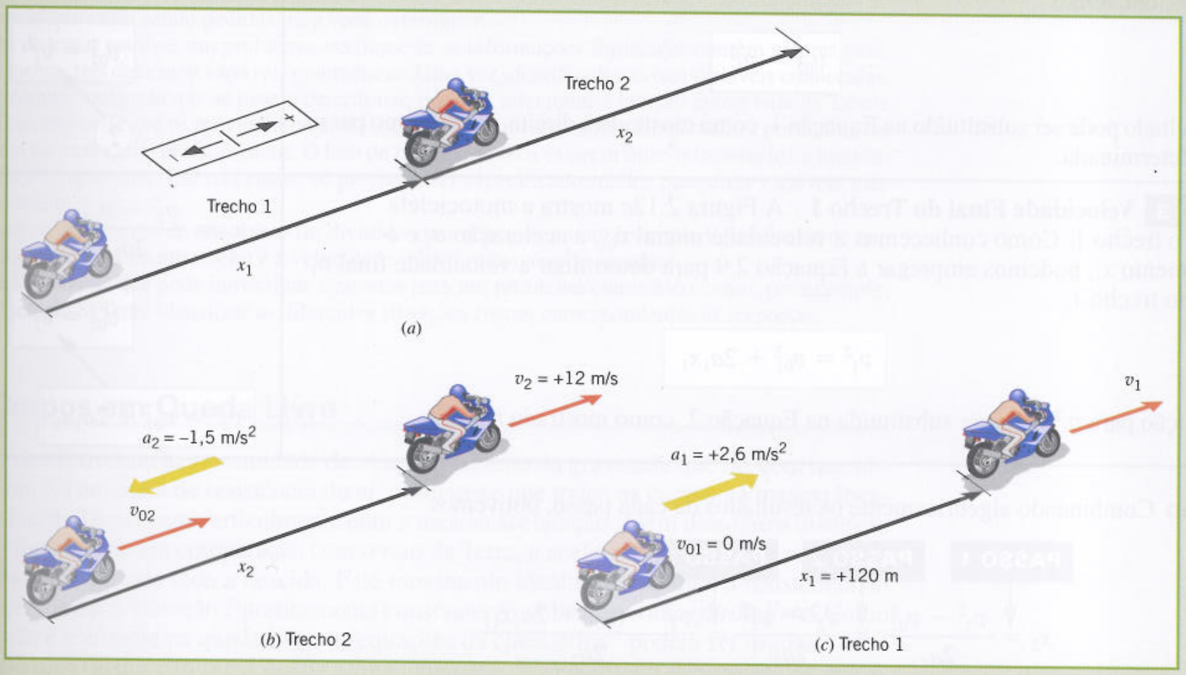

Figura 2.12 (*a*) Este passeio de motocicleta é composto de dois trechos, cada um com uma aceleração diferente. (*b*) As variáveis para o trecho 2. (*c*) As variáveis para o trecho 1.

Raciocínio Podemos usar uma equação da cinemática da Tabela 2.1 para achar o deslocamento x_2 para o trecho 2. Para fazermos isso, será necessário conhecer valores de três das variáveis que aparecem na equação. Valores para a aceleração ($a_2 = -1{,}5\ \text{m/s}^2$) e velocidade final ($v_2 = +12$ m/s) são fornecidos. Um valor para a terceira variável, a velocidade inicial v_{02}, pode ser obtido notando-se que ela também é a velocidade final do trecho 1. A velocidade final do trecho 1 pode ser determinada usando-se uma equação da cinemática apropriada, já que três variáveis (x_1, a_1 e v_{01}) são conhecidas para este trecho do movimento, como revela a tabela a seguir.

Dados Conhecidos e Incógnitas Os dados para este problema estão listados na tabela:

Descrição	Símbolo	Valor	Comentário
Dados Explícitos			
Deslocamento para o trecho 1	x_1	$+120$ m	
Aceleração para o trecho 1	a_1	$+2{,}6\ \text{m/s}^2$	Positiva, pois a motocicleta se move no sentido positivo da direção x e está aumentando sua velocidade.
Aceleração para o trecho 2	a_2	$-1{,}5\ \text{m/s}^2$	Negativa, pois a motocicleta se move no sentido positivo da direção x e está diminuindo sua velocidade
Velocidade final para o trecho 2	v_2	$+12$ m/s	
Dados Implícitos			
Velocidade inicial para o trecho 1	v_{01}	0 m/s	A motocicleta parte do repouso.
Incógnita			
Deslocamento para o trecho 2	x_2	?	

Continua

Modelando o Problema

PASSO 1 Deslocamento Durante o Trecho 2 A Figura 2.12*b* mostra a situação durante o trecho 2. Duas das variáveis—a velocidade final v_2 e a aceleração a_2—são conhecidas, e por conveniência escolhemos a Equação 2.9 para obtermos o deslocamento x_2 da motocicleta:

$$v_2^2 = v_{02}^2 + 2a_2x_2 \quad (2.9)$$

Explicitamos x_2 nesta relação para obter a Equação 1 à direita. Embora a velocidade inicial v_{02} do trecho 2 não seja conhecida, conseguiremos determinar seu valor a partir do conhecimento do movimento durante o trecho 1, como esquematizado nos Passos 2 e 3.

$$x_2 = \frac{v_2^2 - v_{02}^2}{2a_2} \quad (1)$$

?

PASSO 2 Velocidade Inicial do Trecho 2 Como a motocicleta entra no trecho 2 imediatamente após deixar o trecho 1, a velocidade inicial v_{02} do trecho 2 é igual à velocidade final v_1 do trecho 1, ou $v_{02} = v_1$. Elevando ambos os lados desta equação ao quadrado, obtivemos

$$\boxed{v_{02}^2 = v_1^2}$$

Este resultado pode ser substituído na Equação 1, como mostrado à direita. No próximo passo, v_1 será determinada.

$$x_2 = \frac{v_2^2 - v_{02}^2}{2a_2} \quad (1)$$

$$\boxed{v_{02}^2 = v_1^2} \quad (2)$$

?

PASSO 3 Velocidade Final do Trecho 1 A Figura 2.12*c* mostra a motocicleta durante o trecho 1. Como conhecemos a velocidade inicial v_{01}, a aceleração a_1 e o deslocamento x_1, podemos empregar a Equação 2.9 para determinar a velocidade final v_1 no fim do trecho 1:

$$\boxed{v_1^2 = v_{01}^2 + 2a_1x_1}$$

Esta relação para v_1^2 pode ser substituída na Equação 2, como mostrado à direita.

$$x_2 = \frac{v_2^2 - v_{02}^2}{2a_2} \quad (1)$$

$$\boxed{v_{02}^2 = v_1^2} \quad (2)$$

$$\boxed{v_1^2 = v_{01}^2 + 2a_1x_1} \quad (3)$$

Solução Combinando algebricamente os resultados de cada passo, obtivemos

$$x_2 \overset{\text{PASSO 1}}{=} \frac{v_2^2 - v_{02}^2}{2a_2} \overset{\text{PASSO 2}}{=} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_2} \overset{\text{PASSO 3}}{=} \frac{v_2^2 - (v_{01}^2 + 2a_1x_1)}{2a_2}$$

O deslocamento x_2 da motocicleta durante o trecho 2 é

$$x_2 = \frac{v_2^2 - (v_{01}^2 + 2a_1x_1)}{2a_2}$$

$$= \frac{(+12\ \text{m/s})^2 - [(0\ \text{m/s})^2 + 2(+2{,}6\ \text{m/s}^2)(+120\ \text{m})]}{2(-1{,}5\ \text{m/s}^2)} = \boxed{+160\ \text{m}}$$

HABILIDADES MATEMÁTICAS A Figura 2.12*a* mostra qual sentido foi escolhido como positivo e a escolha leva a um valor de $x_2 = +160$ m para o deslocamento da motocicleta durante o trecho 2. Esta resposta significa que o deslocamento é de 160 m no sentido positivo, que é voltado para cima e para a direita no desenho. A escolha do sentido positivo, no entanto, é completamente arbitrária. O significado da resposta do problema será o mesmo, não importando qual escolha seja feita. Suponha que a escolha para o sentido positivo fosse contrária àquela mostrada na Figura 2.12*a*. Então, todos os dados listados na tabela Dados Conhecidos e Incógnitas apareceriam com sinais algébricos contrários àqueles especificados, e o cálculo do deslocamento x_2 apareceria da seguinte maneira:

$$x_2 = \frac{(-12\ \text{m/s})^2 - [(0\ \text{m/s})^2 + 2(-2{,}6\ \text{m/s}^2)(-120\ \text{m})]}{2(+1{,}5\ \text{m/s}^2)} = \boxed{-160\ \text{m}}$$

O valor de x_2 tem o mesmo módulo de 160 m obtido anteriormente, mas agora ele é negativo. O sinal negativo significa que o deslocamento da motocicleta durante o trecho 2 é igual a 160 m ***no sentido negativo***. Mas o sentido negativo agora é para cima e para a direita na Figura 2.12*a*, de modo que ***o significado*** do resultado é exatamente o mesmo que antes.

Trabalho a Ser Resolvido em Casa Associado: ***Problemas 59 e 80*** ■

Agora que vimos como as equações da cinemática são aplicadas a várias situações, é uma boa ideia resumir a estratégia de raciocínio que foi usada até agora. Esta estratégia, resumida a seguir, também será usada ao considerarmos corpos em queda livre na Seção 2.6 e o movimento bidimensional no Capítulo 3.

Estratégia de Raciocínio Aplicando as Equações da Cinemática

1. Faça um desenho para representar a situação que está sendo estudada. Um desenho nos ajuda a ver o que está acontecendo.
2. Decida que sentidos serão chamados de positivo (+) e de negativo (−), em relação a uma origem de coordenadas escolhida convenientemente. Não modifique a sua decisão durante os cálculos.
3. Escreva, de forma organizada, os valores (com os sinais apropriados de mais e de menos) fornecidos para qualquer uma das cinco variáveis cinemáticas (x, a, v, v_0 e t). Fique atento para os dados implícitos, como a expressão "parte do repouso", que significa que o valor da velocidade inicial é $v_0 = 0$ m/s. As tabelas de resumo de dados usadas nos exemplos apresentados no texto são uma boa forma de armazenar estas informações, facilitando a sua recuperação. Além disso, identifique as variáveis que estão sendo pedidas para você determinar.
4. Antes de tentar resolver um problema, verifique se as informações fornecidas contêm valores para, pelo menos, três das cinco variáveis cinemáticas. Uma vez identificadas as três variáveis conhecidas, bem como a incógnita que se deseja determinar, pode-se selecionar a relação apropriada na Tabela 2.1. Lembre-se de que os movimentos de dois objetos podem estar inter-relacionados, portanto, eles podem ter uma variável em comum. O fato de os movimentos estarem inter-relacionados é uma informação importante. Em tais casos, só precisam ser especificados dados para duas variáveis para cada objeto.
5. Quando o movimento de um objeto for dividido em trechos, como no Exemplo 9, lembre-se de que a velocidade final de um trecho é a velocidade inicial para o trecho seguinte.
6. Tenha em mente que pode haver duas respostas para um problema cinemático como, por exemplo, no Exemplo 8. Tente visualizar as diferentes situações físicas correspondentes às respostas.

2.6 Corpos em Queda Livre

Todos já tiveram a oportunidade de observar o efeito da gravidade que faz com que objetos caiam. Na ausência de resistência do ar, observa-se que todos os corpos na mesma localidade acima da Terra caem verticalmente com a mesma aceleração. Além disso, se a distância da queda for pequena em comparação com o raio da Terra, a aceleração permanece essencialmente constante durante toda a descida. Este movimento idealizado, no qual a resistência do ar é desprezada e a aceleração é praticamente constante, é conhecido como ***queda livre***. Como a aceleração é constante na queda livre, as equações da cinemática[11] podem ser usadas.

A aceleração de um corpo em queda livre é chamada de ***aceleração decorrente da gravidade***, e o seu módulo (sem qualquer sinal algébrico) é representado pelo símbolo g. A aceleração decorrente da gravidade é dirigida para baixo, em direção ao centro da Terra. Próximo à superfície da Terra, g é aproximadamente

$$g = 9{,}80 \text{ m/s}^2 \quad \text{ou} \quad 32{,}2 \text{ ft/s}^2$$

A menos que haja circunstâncias que justifiquem o uso de outro valor, usaremos um destes dois valores para g nos cálculos subsequentes. Na verdade, no entanto, g diminui à medida que a altitude aumenta e varia ligeiramente com a latitude.

A Figura 2.13*a* mostra o fenômeno bem conhecido de uma pedra caindo mais rápido do que uma folha de papel. O efeito da resistência do ar é responsável pela queda mais lenta do papel, pois quando o ar é removido do tubo, como na Figura 2.13*b*, a pedra e o papel possuem exatamente a mesma aceleração decorrente da gravidade. Na ausência de ar, tanto a pedra quanto o papel exibem movimentos de queda livre. A queda livre é uma aproximação muito boa para descrever o movimento de objetos caindo nas proximidades da superfície da Lua, onde não existe ar para retardar o movimento. Uma bela demonstração da queda livre lunar foi encenada pelo astronauta David Scott, que soltou ao mesmo tempo um martelo e uma pena da mesma altura. Os dois objetos experimentaram a mesma aceleração decorrente da gravidade lunar e, consequentemente, atingiram o solo ao mesmo tempo. A aceleração decorrente da gravidade nas proximidades da superfície da Lua é aproximadamente um sexto da correspondente na superfície terrestre.

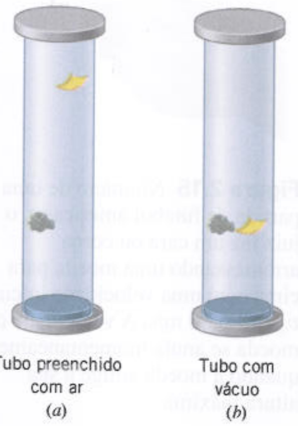

Figura 2.13 (*a*) Em presença da resistência do ar, a aceleração da pedra é maior do que a do papel. (*b*) Sem resistência do ar, tanto a pedra quanto o papel têm a mesma aceleração.

Quando as equações da cinemática são aplicadas ao movimento de queda livre, é natural usarmos o símbolo y para o deslocamento, já que o movimento ocorre na direção vertical, ou direção y. Assim, ao usarmos as equações da Tabela 2.1 para o movimento de queda livre, sim-

[11] Mais precisamente, equações da cinemática com aceleração constante. Quando a aceleração variar no tempo, essas equações não podem ser aplicadas! (N.T.)

plesmente trocaremos x por y. Esta mudança de símbolos em nada altera o significado das equações. As equações possuem a mesma forma algébrica, tanto para a direção horizontal quanto para a direção vertical, desde que a aceleração permaneça constante durante o movimento. Agora voltamos nossa atenção para diversos exemplos que ilustram como as equações da cinemática se aplicam a corpos em queda livre.

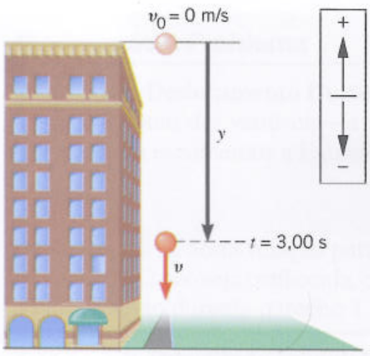

Figura 2.14 A pedra, partindo com velocidade nula no alto do edifício, é acelerada para baixo pela gravidade.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** Apenas quando valores para pelo menos três das cinco variáveis cinemáticas (y, a, v, v_0 e t) estão disponíveis é que as Equações na Tabela 2.1 podem ser usadas para determinar as quarta e quinta variáveis.

Exemplo 10 Uma Pedra Caindo

Uma pedra é solta do repouso do topo de um edifício alto, como indicado na Figura 2.14. Após 3,00 s de queda livre, qual o deslocamento y da pedra?

Raciocínio O sentido para cima é escolhido como o sentido positivo. As três variáveis conhecidas são mostradas na tabela a seguir. A velocidade inicial da pedra v_0 é nula, pois ela é solta do repouso. A aceleração decorrente da gravidade é negativa, já que ela aponta para baixo no sentido negativo.

Dados da Pedra

y	a	v	v_0	t
?	−9,80 m/s²		0 m/s	3,00 s

A Equação 2.8 contém as variáveis apropriadas e oferece uma solução direta para o problema. Como a pedra se move para baixo e o sentido positivo é para cima, é de se esperar que o deslocamento y tenha um valor negativo.

Solução Usando a Equação 2.8, obtivemos

$$y = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 = (0\ \text{m/s})(3{,}00\ \text{s}) + \tfrac{1}{2}(-9{,}80\ \text{m/s}^2)(3{,}00\ \text{s})^2 = \boxed{-44{,}1\ \text{m}}$$

A resposta para y é negativa, como esperado.

Figura 2.15 No início de uma partida de futebol americano, o juiz faz um cara ou coroa arremessando uma moeda para cima com uma velocidade inicial $v_0 = +5{,}00$ m/s. A velocidade da moeda se anula momentaneamente quando a moeda atinge a sua altura máxima.

■ **Dicas para a Solução de Problemas.** Dados implícitos são importantes. No Exemplo 12, por exemplo, a expressão "até que altura a moeda sobe" se refere à altura máxima, que ocorre quando a velocidade final v na direção vertical é v = 0 m/s.

Exemplo 11 Velocidade de uma Pedra Caindo

Após 3,00 s de queda livre, qual a velocidade v da pedra representada na Figura 2.14?

Raciocínio Por causa da aceleração decorrente da gravidade, o módulo da velocidade para baixo da pedra aumenta de 9,80 m/s a cada segundo de queda livre. Os dados para a pedra são os mesmos que os do Exemplo 10, e a Equação 2.4 oferece uma solução direta para a velocidade final. Como a pedra está se movendo para baixo no sentido negativo, o valor determinado para v deveria ser negativo[12].

Solução Usando a Equação 2.4, obtivemos

$$v = v_0 + at = 0\ \text{m/s} + (-9{,}80\ \text{m/s}^2)(3{,}00\ \text{s}) = \boxed{-29{,}4\ \text{m/s}}$$

A velocidade é negativa, como esperado.

A aceleração decorrente da gravidade é sempre um vetor que aponta para baixo. Ele descreve como a velocidade escalar aumenta para um objeto que está caindo livremente em direção à Terra. Esta mesma aceleração também descreve como a velocidade escalar diminui para um objeto que está se movendo para cima sob influência apenas da gravidade; neste caso, o objeto acaba dando uma parada momentânea e passa a cair em direção à Terra. Os Exemplos 12 e 13 mostram como as equações da cinemática são aplicadas a um objeto que está se movendo para cima sob a influência da gravidade.

Exemplo 12 Até que Altura Ela Sobe?

Uma partida de futebol americano normalmente começa com o arremesso de uma moeda para se determinar quem dará o chute inicial. O juiz arremessa a moeda para cima com uma velocidade escalar inicial de 5,00 m/s. Na ausência de resistência do ar, até que altura a moeda chega acima do seu ponto de lançamento?

Raciocínio A moeda recebe uma velocidade inicial para cima, como na Figura 2.15. Mas a aceleração decorrente da gravidade está voltada para baixo. Como os vetores velocidade e aceleração

[12]Evidentemente trata-se do vetor velocidade e não da velocidade escalar, pois o valor contém um sinal. (N.T.)

apontam em sentidos contrários, a moeda diminui de velocidade durante o seu movimento para cima. Passado algum tempo, a velocidade da moeda se torna $v = 0$ m/s no ponto mais alto. Supondo que o sentido para cima seja positivo, os dados podem ser resumidos como mostrado na tabela a seguir:

Dados da Moeda				
y	a	v	v_0	t
?	$-9{,}80$ m/s²	0 m/s	$+5{,}00$ m/s	

Com estes dados, podemos usar a Equação 2.9 ($v^2 = v_0^2 + 2ay$) para determinar a altura máxima y.

Solução Rearranjando a Equação 2.9, concluímos que a altura máxima da moeda acima do seu ponto de lançamento é

$$y = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(0 \text{ m/s})^2 - (5{,}00 \text{ m/s})^2}{2(-9{,}80 \text{ m/s}^2)} = \boxed{1{,}28 \text{ m}}$$

HABILIDADES MATEMÁTICAS O rearranjo de equações algébricas é um passo que ocorre com frequência na solução de problemas. A regra norteadora em um procedimento como este é que tudo o que você fizer de um lado da equação, você tem que fazer também do outro lado. Aqui no Exemplo 12, precisamos rearranjar $v^2 = v_0^2 + 2ay$ (Equação 2.9) a fim de determinar y. A parte da equação que contém y é $2ay$, e começamos isolando essa parte de um lado do sinal de igualdade. Para fazer isso subtraímos v_0^2 de ambos os lados da equação:

$$v^2 - v_0^2 = \cancel{v_0^2} + 2ay - \cancel{v_0^2} = 2ay$$

Dessa forma, vemos que $2ay = v^2 - v_0^2$. Depois, eliminamos o termo $2a$ do lado esquerdo do sinal de igualdade dividindo ambos os lados da equação por $2a$.

$$\frac{\cancel{2a}y}{\cancel{2a}} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad \text{ou} \quad y = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

O termo $2a$ ocorre tanto no numerador quanto no denominador do lado esquerdo deste resultado e pode ser eliminado algebricamente, resultando na expressão desejada para y.

Exemplo 13 Durante quanto Tempo Ela Permanece no Ar?

Na Figura 2.15, qual o tempo total que a moeda permanece no ar antes de voltar ao seu ponto de lançamento?

Raciocínio Durante o tempo em que a moeda se move para cima, a gravidade faz com que a sua velocidade se reduza a zero. No seu caminho de volta para baixo, no entanto, a gravidade faz com que a moeda volte a recuperar a velocidade perdida (sua velocidade escalar aumenta). Assim, o tempo necessário para que a moeda suba é igual ao tempo para que ela desça. Em outras palavras, o tempo total de movimento é duas vezes o tempo gasto para o movimento para cima. Os dados para a moeda durante o trecho de subida são os mesmos do Exemplo 12. Com estes dados, podemos usar a Equação 2.4 ($v = v_0 + at$) para determinar a duração do movimento para cima.

Solução Rearranjando a Equação 2.4, encontramos

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{0 \text{ m/s} - 5{,}00 \text{ m/s}}{-9{,}80 \text{ m/s}^2} = 0{,}510 \text{ s}$$

O tempo total para cima e para baixo é igual a duas vezes este valor, ou $\boxed{1{,}02 \text{ s.}}$

É possível determinar o tempo total por outro método. Quando a moeda é arremessada para cima e volta ao seu ponto de lançamento, o deslocamento para o *percurso completo* é $y = 0$ m. Com este valor para o deslocamento, a Equação 2.8 ($y = v_0 t + (1/2)at^2$) pode ser usada para determinar diretamente o tempo total de movimento.

Os Exemplos 12 e 13 servem para ilustrar que a expressão "em queda livre" não significa necessariamente que um objeto está caindo. Um objeto em queda livre é qualquer objeto que esteja se movendo, seja para cima ou para baixo, sob a influência só da gravidade. Em qualquer um dos casos, o objeto sempre experimenta a mesma *aceleração para baixo* decorrente da gravidade, um fato que é o foco do próximo exemplo.

Exemplo Conceitual 14 Aceleração *Versus* Velocidade

Existem três partes que compõem o movimento da moeda da Figura 2.15, no qual a resistência do ar está sendo ignorada. No seu percurso para cima, a moeda possui um vetor velocidade voltado para cima e um módulo decrescente. No ponto mais alto da sua trajetória, a moeda possui instantaneamente uma velocidade nula. No seu caminho para baixo, a moeda possui um vetor velocidade voltado para baixo com um módulo que está aumentando. Compare o vetor aceleração da moeda com o vetor velocidade. **(a)** O sentido e o módulo do vetor aceleração se comportam da mesma maneira que o sentido e o módulo do vetor velocidade? ou **(b)** o vetor aceleração tem um sentido constante e um módulo constante ao longo de todo o movimento?

Raciocínio Como a resistência do ar está sendo ignorada, a moeda está em movimento de queda livre. Isso significa que o vetor aceleração da moeda é a aceleração decorrente da gravidade. Aceleração é a taxa com que a velocidade *varia* no tempo, que é um conceito diferente da própria velocidade.

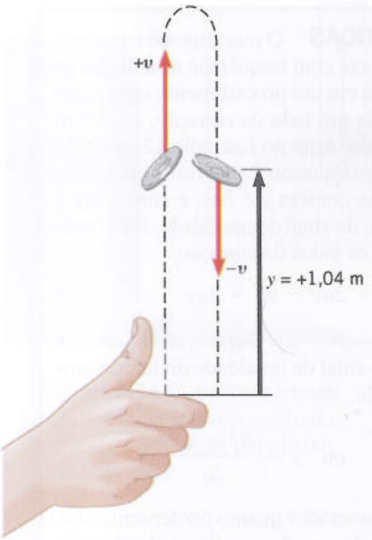

Figura 2.16 Para um dado deslocamento ao longo da trajetória do movimento, a velocidade escalar da moeda para cima é igual à sua velocidade escalar para baixo, mas os dois vetores velocidade apontam em sentidos contrários.

A resposta (a) está incorreta. Durante as partes do movimento para cima e para baixo, e também no ponto mais alto da trajetória, a aceleração decorrente da gravidade teve um sentido constante para baixo e um módulo constante de 9,80 m/s². Em outras palavras, o vetor aceleração da moeda não se comporta como o vetor velocidade. Em particular, o vetor aceleração não é igual a zero no ponto mais alto da trajetória do movimento só porque o vetor velocidade é zero naquele ponto. Aceleração é a taxa com que a velocidade está variando no tempo, e a velocidade está variando no ponto mais alto mesmo que em um instante ela seja igual a zero.

A resposta (b) está correta. A aceleração decorrente da gravidade tem sentido constante para baixo e um módulo constante de 9,80 m/s² em todos os instantes durante o movimento.

O movimento de um objeto que é arremessado para cima e que acaba voltando à Terra tem uma simetria que vale a pena ter em mente do ponto de vista da solução de problemas. Os cálculos que acabamos de completar indicam que existe uma simetria de tempo no movimento de queda livre, no sentido de que o tempo necessário para que o objeto alcance a altura máxima é igual ao tempo para que ele volte ao seu ponto de partida.

Também existe um tipo de simetria envolvendo a velocidade escalar. A Figura 2.16 mostra a moeda considerada nos Exemplos 12 e 13. Em qualquer deslocamento y acima do ponto de lançamento, a velocidade escalar da moeda durante a subida é igual à velocidade escalar no mesmo ponto durante a descida. Por exemplo, quando $y = +1{,}04$ m, a Equação 2.9 fornece dois valores possíveis para a velocidade final v, supondo que a velocidade inicial seja $v_0 = +5{,}00$ m/s:

$$v^2 = v_0^2 + 2ay = (5{,}00 \text{ m/s})^2 + 2(-9{,}80 \text{ m/s}^2)(1{,}04 \text{ m}) = 4{,}62 \text{ m}^2/\text{s}^2$$
$$v = \pm 2{,}15 \text{ m/s}$$

O valor $v = +2{,}15$ m/s é a velocidade da moeda na subida e $v = -2{,}15$ m/s é a velocidade na descida. A velocidade escalar em ambos os casos é idêntica e igual a 2,15 m/s. Da mesma forma, a velocidade escalar exatamente no instante em que a moeda retorna ao seu ponto de lançamento é de 5,00 m/s, que é igual à velocidade escalar inicial. Esta simetria envolvendo a velocidade escalar surge porque a moeda perde 9,80 m/s do módulo de sua velocidade a cada segundo na subida e volta a ganhar a mesma quantidade a cada segundo na descida. No Exemplo Conceitual 15, usamos exatamente este tipo de simetria para guiar o nosso raciocínio ao analisarmos o movimento de uma bala disparada de uma arma.

Exemplo Conceitual 15 Tirando Partido da Simetria

A Figura 2.17*a* mostra uma bala que foi disparada para cima de uma arma movendo-se exatamente na direção vertical a partir da beira de um penhasco. A velocidade escalar inicial da bala é de 30 m/s. Ela sobe e depois volta a cair e, por fim, acaba batendo no chão abaixo do penhasco. Na Figura 2.17*b*, a bala foi disparada verticalmente para baixo com a mesma velocidade escalar inicial. Na ausência de resistência do ar, a bala na Figura 2.17*b* bate no chão com **(a)** uma velocidade escalar menor, **(b)** a mesma velocidade escalar, ou **(c)** uma velocidade escalar maior do que a da bala na Figura 2.17*a*?

Raciocínio Na ausência de resistência do ar, o movimento é de queda livre, e a simetria inerente no movimento de queda livre oferece uma resposta imediata.

As respostas (a) e (c) estão incorretas. Estas respostas estão incorretas porque elas são inconsistentes com a simetria que é discutida a seguir em conexão com a resposta correta.

A resposta (b) está correta. A Figura 2.17*c* mostra a bala depois de ter sido disparada para cima e após ter caído de volta ao ponto de partida. A simetria indica que a velocidade escalar na Figura 2.17*c* é a mesma que na Figura 2.17*a* — mais precisamente, 30 m/s, que é também o caso quando a bala foi realmente disparada para baixo. Consequentemente, no caso de a bala ser disparada como

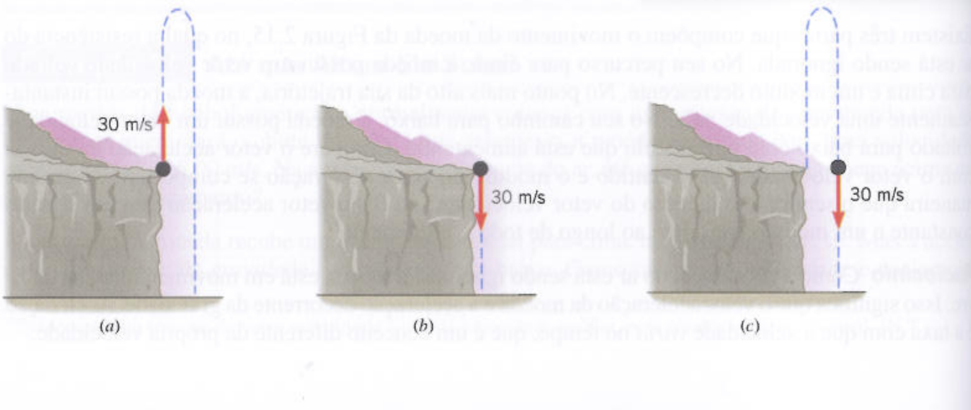

Figura 2.17 (*a*) Uma espingarda dispara, da beira de um penhasco, um tiro verticalmente para cima. A velocidade escalar inicial da bala é igual a 30 m/s. (*b*) A bala é disparada verticalmente para baixo com uma velocidade inicial de 30 m/s. (*c*) No Exemplo Conceitual 15, este desenho desempenha o papel central no raciocínio que tem por base a simetria.

na Figura 2.17*a* ou *b*, ela começa a se mover para baixo a partir da beira do penhasco com uma velocidade escalar de 30 m/s. Tanto num caso quanto no outro, existe a mesma aceleração decorrente da gravidade e o mesmo deslocamento a partir da beira do penhasco até o chão abaixo. Sob tais circunstâncias, quando a bala atinge o chão, ela tem a mesma velocidade escalar tanto na Figura 2.17*a* quanto na Figura 2.17*b*.

Trabalho a Ser Resolvido em Casa Associado: *Problemas 47 e 54* ■

Verifique Seu Entendimento

(As respostas são dadas no final do livro.)

13. Um veículo experimental passa a se mover mais lentamente e chega ao repouso com uma aceleração cujo módulo é de 9,80 m/s². Após inverter seu sentido de movimento em um intervalo de tempo desprezível, o veículo aumenta sua velocidade escalar com uma aceleração de 9,80 m/s². Exceto pelo fato de ser horizontal, este movimento é **(a)** igual a ou **(b)** diferente do movimento de uma bola que é arremessada verticalmente para cima, chega ao repouso, e cai novamente em direção à Terra? Ignore a resistência do ar.
14. Uma bola é arremessada verticalmente para cima com uma velocidade $\vec{v}_0$ e em um tempo t atinge o ponto mais alto de sua trajetória de voo, que é um deslocamento $\vec{y}$ acima do ponto de lançamento. Com uma velocidade de lançamento igual a $2\vec{v}_0$, qual seria o tempo necessário para ela atingir o ponto mais alto de sua trajetória de voo e qual seria o deslocamento do ponto mais alto acima do ponto de lançamento? **(a)** $4t$ e $2\vec{y}$ **(b)** $2t$ e $4\vec{y}$ **(c)** $2t$ e $2\vec{y}$ **(d)** $4t$ e $4\vec{y}$ **(e)** t e $2\vec{y}$
15. Dois objetos são lançados verticalmente para cima, primeiro um, e pouco depois o outro. **(a)** É possível ou **(b)** é impossível que os dois objetos atinjam a mesma altura máxima no mesmo instante de tempo?
16. Uma bola é solta do repouso do alto de um edifício e bate no solo com uma velocidade escalar v_f. Do nível do solo, uma segunda bola é lançada verticalmente para cima no mesmo instante em que a primeira bola é solta. A velocidade escalar inicial da segunda bola é $v_0 = v_f$, a mesma velocidade escalar com que a primeira bola acaba batendo no solo. Ignorando a resistência do ar, decida se as bolas cruzam suas trajetórias **(a)** na metade da altura do edifício, **(b)** acima do ponto médio, ou **(c)** abaixo do ponto médio.

2.7 Análise Gráfica da Velocidade e da Aceleração

Técnicas gráficas ajudam a entender os conceitos dos vetores velocidade e aceleração. Suponha que um ciclista esteja pedalando com uma velocidade constante $v = +4$ m/s. A posição x da bicicleta pode ser representada no eixo vertical de um gráfico, enquanto o tempo t é representado no eixo horizontal. Como a posição da bicicleta aumenta em 4 m a cada segundo, o gráfico de x contra t é uma linha reta. Além disso, com a hipótese de que a bicicleta está em $x = 0$ m quando $t = 0$ s, a reta passa pela origem, como mostrado na Figura 2.18. Cada ponto desta reta fornece a posição da bicicleta em certo tempo. Por exemplo, em $t = 1$ s, a posição é 4 m, enquanto em $t = 3$ s a posição é 12 m.

Ao construir o gráfico da Figura 2.18, usamos o fato de que a velocidade era de +4 m/s. Suponha, no entanto, que este gráfico tenha sido fornecido, sem que tivéssemos conhecimento prévio da velocidade. A velocidade poderia ser determinada considerando-se o que acontece com a bicicleta entre os tempos de 1 e 3 s, por exemplo. A variação de tempo é $\Delta t = 2$ s. Durante este intervalo de tempo, a posição da bicicleta varia de +4 para +12 m, e a variação da posição é $\Delta x = +8$ m. O quociente $\Delta x/\Delta t$ é chamado de ***coeficiente angular*** ou ***declividade*** da reta.

$$\text{Coeficiente angular} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{+8\ \text{m}}{2\ \text{s}} = +4\ \text{m/s}$$

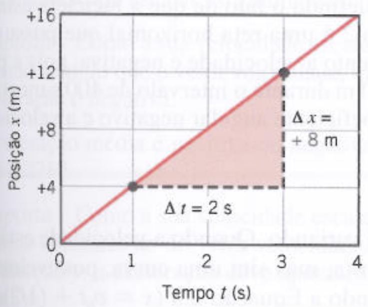

Figura 2.18 Gráfico posição × tempo para um objeto movendo-se com uma velocidade constante $v = \Delta x/\Delta t = +4$ m/s.

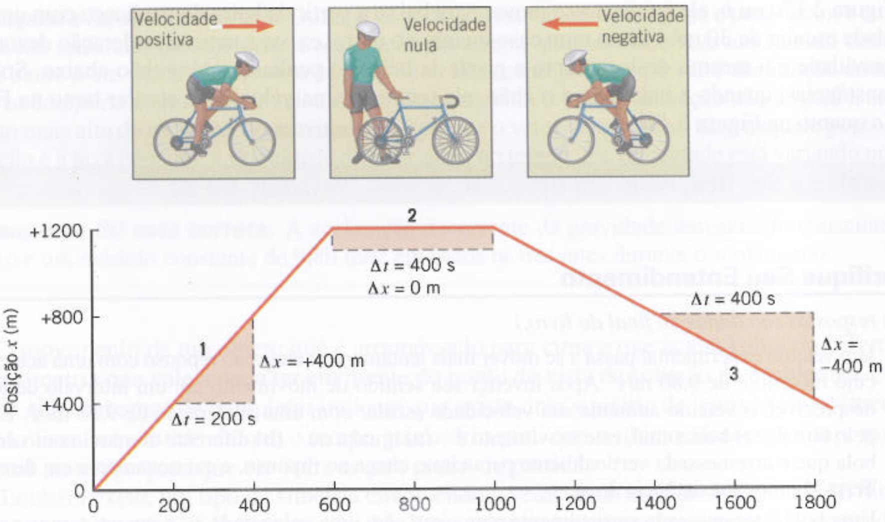

Figura 2.19 Este gráfico posição × tempo é formado por três segmentos de reta, cada um correspondendo a uma velocidade constante diferente.

Observe que o coeficiente angular é igual à velocidade da bicicleta. Este resultado não é mera coincidência, pois $\Delta x/\Delta t$ é a definição da velocidade média (veja a Equação 2.2). ***Assim, para um objeto se movendo com velocidade constante, o coeficiente angular da linha reta em um gráfico posição × tempo fornece a velocidade*** (com sinal algébrico). Como o gráfico posição × tempo é uma linha reta, qualquer intervalo de tempo Δt pode ser escolhido para se calcular a velocidade. Escolhendo um Δt diferente resultará em um Δx diferente, mas a velocidade $\Delta x/\Delta t$ não variará. No mundo real, objetos raramente se movem com velocidade constante durante todo o tempo, como ilustra o próximo exemplo.

Exemplo 16 Um Passeio de Bicicleta

Um ciclista mantém uma velocidade constante no trecho de ida de um passeio, velocidade nula enquanto está parado, e outra velocidade constante no seu caminho de volta (logo, com sinal contrário). A Figura 2.19 mostra o gráfico posição × tempo correspondente. Usando os intervalos de tempo e de posição indicados no desenho, obtivemos as velocidades (com sinal algébrico) para cada trecho do passeio.

Raciocínio A velocidade média $\bar{v}$ é igual ao deslocamento Δx dividido pelo tempo transcorrido Δt, $\bar{v} = \Delta x/\Delta t$. O deslocamento é a posição final menos a posição inicial, que é um número positivo para o trecho 1 e um número negativo para o trecho 3. Observe que para o trecho 2 $\Delta x = 0$ m, pois a bicicleta está em repouso. O desenho mostra valores de Δx e Δt para cada um dos três trechos.

Solução As velocidades médias para os três trechos são

Trecho 1 $$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{800\text{ m} - 400\text{ m}}{400\text{ s} - 200\text{ s}} = \frac{+400\text{ m}}{200\text{ s}} = \boxed{+2\text{ m/s}}$$

Trecho 2 $$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1200\text{ m} - 1200\text{ m}}{1000\text{ s} - 600\text{ s}} = \frac{0\text{ m}}{400\text{ s}} = \boxed{0\text{ m/s}}$$

Trecho 3 $$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{400\text{ m} - 800\text{ m}}{1800\text{ s} - 1400\text{ s}} = \frac{-400\text{ m}}{400\text{ s}} = \boxed{-1\text{ m/s}}$$

No segundo trecho do passeio a velocidade é nula, refletindo o fato de que a bicicleta está parada. Como a posição da bicicleta não varia, o trecho 2 é uma reta horizontal que possui um coeficiente angular nulo. No terceiro trecho do movimento a velocidade é negativa, pois a posição da bicicleta diminui de $x = +800$ m para $x = +400$ m durante o intervalo de 400 s mostrado no gráfico. Consequentemente, o trecho 3 possui um coeficiente angular negativo e a velocidade é negativa.

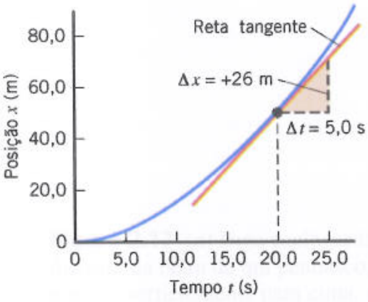

Figura 2.20 Quando a velocidade está variando, o gráfico posição × tempo é uma curva. O coeficiente angular $\Delta x/\Delta t$ da reta desenhada tangente à curva em um dado tempo é a velocidade instantânea nesse tempo.

Se o objeto estiver acelerando, sua velocidade está variando. Quando a velocidade está variando, o gráfico posição × tempo não é uma linha reta, mas sim uma curva, possivelmente como a da Figura 2.20. Esta curva foi desenhada usando a Equação 2.8 ($x = v_0t + (1/2)at^2$), considerando uma aceleração $a = 0{,}26\ \text{m/s}^2$ e uma velocidade inicial $v_0 = 0$ m/s. A velocidade em qualquer instante de tempo pode ser determinada medindo-se o coeficiente angular da curva nesse instante. O coeficiente angular em qualquer ponto ao longo da curva é definido como o coeficiente angular da reta tangente à curva nesse ponto. Por exemplo, na Figura 2.20 uma reta tangente é desenhada em $t = 20{,}0$ s. Para se determinar o coeficiente angular da reta tangente, constrói-se um triângulo usando um intervalo de tempo escolhido arbitrariamente $\Delta t = 5{,}0$ s. A variação de x associada a este intervalo de tempo pode ser lida da reta tangente como $\Delta x = +26$ m. Portanto,

$$\text{Coeficiente angular da reta tangente} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{+26\ \text{m}}{5{,}0\ \text{s}} = +5{,}2\ \text{m/s}$$

O coeficiente angular da reta tangente é a velocidade instantânea, que neste caso é $v = +5{,}2$ m/s. Este resultado gráfico pode ser verificado usando-se a Equação 2.4 com $v_0 = 0$ m/s: $v = at = (+0{,}26\ \text{m/s}^2)(20{,}0\ \text{s}) = +5{,}2$ m/s.

Um melhor conhecimento do significado da aceleração também pode ser obtido com a ajuda de uma representação gráfica. Considere um objeto movendo-se com aceleração constante $a = +6\ \text{m/s}^2$. Se o objeto tiver uma velocidade inicial $v_0 = +5$ m/s, sua velocidade em qualquer tempo pode ser obtida pela Equação 2.4 como

$$v = v_0 + at = 5\ \text{m/s} + (6\ \text{m/s}^2)t$$

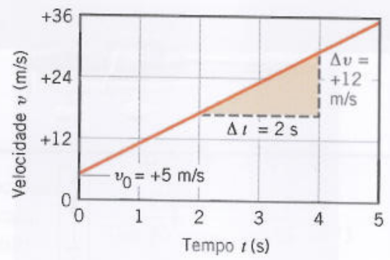

Figura 2.21 Um gráfico velocidade × tempo que se aplica a um objeto com uma aceleração $\Delta v/\Delta t = +6\ \text{m/s}^2$. A velocidade inicial é $v_0 = +5$ m/s quando $t = 0$ s.

Esta relação está representada como o gráfico velocidade × tempo da Figura 2.21. O gráfico de $v \times t$ é uma reta que intercepta o eixo vertical em $v_0 = 5$ m/s. O coeficiente angular desta reta pode ser calculado a partir dos dados mostrados no desenho:

$$\text{Coeficiente angular} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{+12\ \text{m/s}}{2\ \text{s}} = +6\ \text{m/s}^2$$

O quociente $\Delta v/\Delta t$ é, por definição, igual à aceleração média (Equação 2.4), logo ***o coeficiente angular da reta em um gráfico velocidade × tempo é a aceleração média***.

2.8 Conceitos & Cálculos

Neste capítulo, estudamos os vetores deslocamento, velocidade e aceleração. Concluímos o capítulo apresentando, nesta seção, exemplos que reveem algumas das características importantes destes conceitos. O formato em três partes destes exemplos reforça o papel do entendimento conceitual na solução de problemas. Primeiramente, é fornecido o enunciado do problema. Depois, vem uma seção de perguntas e respostas sobre os conceitos, seguida pela seção da solução. O propósito da seção de perguntas e respostas sobre os conceitos é facilitar o entendimento da solução e ilustrar como uma revisão dos conceitos pode ajudar antecipando algumas das características das respostas numéricas.

Conceitos & Cálculos Exemplo 17

Saltando de Paraquedas

Uma paraquedista está caindo verticalmente, no sentido negativo da direção y. (a) Durante a parte inicial da queda, sua velocidade escalar aumenta de 16 para 28 m/s em 1,5 s, como na Figura 2.22a. (b) Mais tarde, seu paraquedas abre e a sua velocidade é reduzida de 48 para 26 m/s em 11 s, como na parte b do desenho. Nos dois casos, determine o módulo e o sentido da aceleração média da paraquedista.

Perguntas e Respostas sobre Conceitos A aceleração média dela é positiva ou negativa quando a sua velocidade escalar está aumentando na Figura 2.22a?

Resposta Como a sua velocidade escalar está aumentando, o vetor aceleração deve apontar no mesmo sentido que o vetor velocidade, que aponta no sentido negativo da direção y. Portanto, a aceleração é negativa.

Sua aceleração média é positiva ou negativa quando a sua velocidade escalar está diminuindo na Figura 2.22b?

Resposta Como a sua velocidade escalar está diminuindo, o vetor aceleração deve apontar no sentido contrário ao do vetor velocidade. Como o vetor velocidade aponta no sentido negativo da direção y, a aceleração deve apontar no sentido positivo da direção y. Logo, a aceleração é positiva.

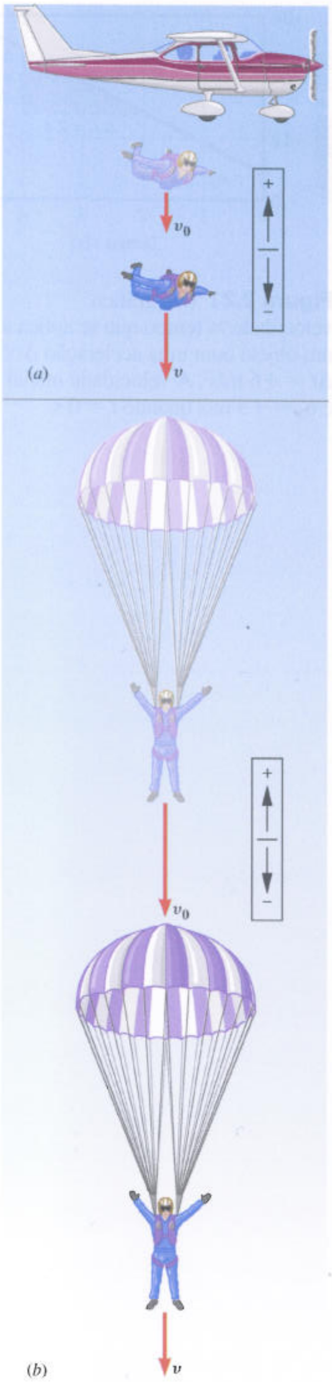

Figura 2.22 (*a*) Uma paraquedista cai inicialmente com o seu paraquedas fechado. (*b*) Mais tarde, ela abre o seu paraquedas. A sua aceleração é diferente nas duas partes do movimento. As velocidades inicial e final são v_0 e v, respectivamente.

Solução **(a)** Como a paraquedista está se movendo no sentido negativo da direção *y*, a sua velocidade inicial é $v_0 = -16$ m/s e a sua velocidade final é $v = -28$ m/s. A aceleração média da paraquedista $\bar{a}$ é a variação da sua velocidade dividida pelo tempo transcorrido:

$$\bar{a} = \frac{v - v_0}{t} = \frac{-28\ \text{m/s} - (-16\ \text{m/s})}{1{,}5\ \text{s}} = \boxed{-8{,}0\ \text{m/s}^2} \qquad (2.4)$$

Como esperado, a sua aceleração média é negativa. Observe que a sua aceleração não é a decorrente da gravidade ($-9{,}8$ m/s²) devido à resistência do ar.

(b) Agora, a paraquedista está se deslocando mais lentamente, mas permanece caindo no sentido negativo da direção *y*. As suas velocidades inicial e final são $v_0 = -48$ m/s e $v = -26$ m/s, respectivamente. A aceleração média para esta fase do movimento é

$$\bar{a} = \frac{v - v_0}{t} = \frac{-26\ \text{m/s} - (-48\ \text{m/s})}{11\ \text{s}} = \boxed{+2{,}0\ \text{m/s}^2} \qquad (2.4)$$

Neste caso, como previsto, a sua aceleração média é positiva.

Conceitos & Cálculos Exemplo 18

Uma Competição de Aceleração

Um piloto em uma competição de carros de corrida, na qual se acelera o máximo possível em um quarto de milha e depois se usa um paraquedas para frear, parte do repouso e mantém uma aceleração constante de 40,0 m/s². Quais são **(a)** as velocidades finais (algébricas) e **(b)** os deslocamentos (algébricos) do piloto ao fim de 2,0 s e ao fim de duas vezes este tempo, ou seja, 4,0 s?

Perguntas e Respostas sobre Conceitos Em um tempo *t*, o carro de corrida possui certa velocidade. Quando o tempo dobra para 2*t*, a velocidade também dobra?

Resposta Como o carro de corrida possui uma aceleração de 40,0 m/s², a sua velocidade varia em 40,0 m/s durante cada segundo de percurso. Portanto, como o carro parte do repouso, a velocidade é igual a 40,0 m/s ao fim do primeiro segundo, 2 × 40,0 m/s ao fim do 2º segundo, 3 × 40,0 m/s ao final do 3º segundo, e assim por diante. Logo, quando o tempo dobra, a velocidade também dobra.

Quando o tempo dobra para 2*t*, o deslocamento do piloto também dobra?

Resposta O deslocamento do carro é igual à sua velocidade média multiplicada pelo tempo transcorrido. A velocidade média $\bar{v}$ é simplesmente a metade da soma de sua velocidade inicial com a sua velocidade final, ou $\bar{v} = 1/2(v_0 + v)$. Como a velocidade inicial é nula, $v_0 = 0$ m/s e a velocidade média é simplesmente a metade da sua velocidade final, ou seja, $\bar{v} = 1/2v$. Entretanto, como vimos, a velocidade final é proporcional ao tempo transcorrido, pois quando o tempo dobra, a velocidade final também dobra. Portanto, o deslocamento, por ser o produto da velocidade média pelo tempo, é proporcional ao tempo ao quadrado, ou t^2. Consequentemente, quando o tempo dobra, o deslocamento não dobra, mas aumenta por um fator de quatro.

Solução **(a)** De acordo com a Equação 2.4, a velocidade final v, a velocidade inicial v_0, a aceleração a e o tempo transcorrido t estão relacionados por $v = v_0 + at$. As velocidades finais nos dois tempos são

[t = 2,0 s] $$v = v_0 + at = 0\ \text{m/s} + (40{,}0\ \text{m/s}^2)(2{,}0\ \text{s}) = \boxed{80\ \text{m/s}}$$

[t = 4,0 s] $$v = v_0 + at = 0\ \text{m/s} + (40{,}0\ \text{m/s}^2)(4{,}0\ \text{s}) = \boxed{160\ \text{m/s}}$$

Vemos que a velocidade dobra quando o tempo dobra, como esperado.

(b) O deslocamento x é igual à velocidade média multiplicada pelo tempo, logo

$$x = \underbrace{\tfrac{1}{2}(v_0 + v)}_{\text{Velocidade média}}t = \tfrac{1}{2}vt$$

em que usamos o fato de que $v_0 = 0$ m/s. De acordo com a Equação 2.4, a velocidade final está relacionada com a aceleração por $v = v_0 + at$ ou $v = at$, já que $v_0 = 0$ m/s. Portanto, o deslocamento pode ser escrito como $x = (1/2)vt = (1/2)(at)t = (1/2)at^2$. Os deslocamentos nos dois tempos são então

[t = 2,0 s] $$x = \tfrac{1}{2}at^2 = \tfrac{1}{2}(40{,}0\ \text{m/s}^2)(2{,}0\ \text{s})^2 = \boxed{80\ \text{m}}$$

[t = 4,0 s] $$x = \tfrac{1}{2}at^2 = \tfrac{1}{2}(40{,}0\ \text{m/s}^2)(4{,}0\ \text{s})^2 = \boxed{320\ \text{m}}$$

Como previsto, o deslocamento em t = 4,0 s é quatro vezes o deslocamento em t = 2,0 s.

Resumo dos Conceitos

2.1 Deslocamento Deslocamento é um vetor que aponta da posição inicial de um objeto para a sua posição final. O módulo do deslocamento é a menor distância entre as duas posições.

2.2 Velocidade Escalar e Vetor Velocidade A velocidade escalar média de um objeto é a distância percorrida pelo objeto dividida pelo tempo exigido para cobrir a distância, como mostrado na Equação 2.1.

$$\text{Velocidade escalar média} = \frac{\text{Distância}}{\text{Tempo transcorrido}} \quad (2.1)$$

O vetor velocidade média $\overline{\vec{v}}$ de um objeto é o deslocamento do objeto $\Delta\vec{x}$ dividido pelo tempo transcorrido Δt, como mostrado na Equação 2.2. O vetor velocidade média é um vetor que possui a mesma direção e o mesmo sentido que o vetor deslocamento. Quando o tempo transcorrido se torna infinitesimalmente pequeno, o vetor velocidade média se iguala ao vetor velocidade instantânea $\vec{v}$, que é o vetor velocidade em um instante de tempo, como indicado na Equação 2.3.

$$\overline{\vec{v}} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

2.3 Aceleração O vetor aceleração média $\overline{\vec{a}}$ é um vetor que é igual à variação $\Delta\vec{v}$ do vetor velocidade dividida pelo tempo transcorrido Δt; a variação do vetor velocidade é igual ao vetor velocidade final menos o vetor velocidade inicial; ver Equação 2.4. Quando Δt se torna infinitesimalmente pequeno, o vetor aceleração média se torna igual ao vetor aceleração instantânea $\vec{a}$, como indicado na Equação 2.5. O vetor aceleração é a taxa com que o vetor velocidade está variando no tempo.

$$\overline{\vec{a}} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (2.5)$$

2.4 Equações da Cinemática para Aceleração Constante / 2.5 Aplicações das Equações da Cinemática As equações da cinemática se aplicam quando um objeto se move com aceleração constante ao longo de uma linha reta. Estas equações relacionam o deslocamento $x - x_0$, a aceleração a, a velocidade final v, a velocidade inicial v_0 e o tempo transcorrido $t - t_0$. Supondo que $x_0 = 0$ m em $t_0 = 0$ s, as equações da cinemática são as mostradas nas Equações 2.4 e 2.7–2.9.

$$v = v_0 + at \quad (2.6)$$

$$x = \tfrac{1}{2}(v_0 + v)t \quad (2.7)$$

$$x = v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2 \quad (2.8)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2ax \quad (2.9)$$

2.6 Corpos em Queda Livre No movimento de queda livre, um objeto experimenta resistência do ar desprezível e uma aceleração decorrente da gravidade constante. Todos os objetos na mesma localidade acima da Terra possuem a mesma aceleração decorrente da gravidade. A aceleração decorrente da gravidade está dirigida para o centro da Terra e possui um módulo aproximadamente igual a 9,80 m/s² próximo à superfície da Terra.

2.7 Análise Gráfica da Velocidade e da Aceleração O coeficiente angular de um gráfico da posição *versus* tempo para um objeto em movimento fornece a velocidade do objeto (com o sinal indicando o sentido do vetor). O coeficiente angular de um gráfico da velocidade *versus* tempo fornece a aceleração do objeto (com o sinal indicando o sentido do vetor).

Foco nos Conceitos

***Observação:** Os exercícios apresentados nesta seção, com numeração não sequencial, foram extraídos do banco de dados de questões disponíveis apenas para a edição original em inglês.* (N.E.)

Seção 2.1 Deslocamento

1. Qual é a diferença entre distância e deslocamento? **(a)** Distância é um vetor, enquanto o deslocamento não é um vetor. **(b)** Deslocamento é um vetor, enquanto distância não é um vetor. **(c)** Não há diferença entre os dois conceitos; eles podem ser usados indistintamente.

Seção 2.2 Velocidade Escalar e Vetor Velocidade

3. Uma corredora percorre, ao longo de uma estrada reta e horizontal, uma distância de 8,0 km e depois corre de volta até seu ponto de partida. O tempo para esta viagem de ida e volta é de 2 h. Qual das seguintes afirmativas é verdadeira? **(a)** A velocidade escalar média dela é igual a 8,0 km/h, mas não há informações suficientes para se determinar seu vetor velocidade média. **(b)** A velocidade escalar média dela é igual a 8,0 km/h e seu vetor velocidade média é igual a 8,0 km/h. **(c)** A velocidade escalar média dela é igual a 8,0 km/h e seu vetor velocidade média é igual a 0 km/h.

Seção 2.3 Aceleração

6. A velocidade de um trem é de 80,0 km/h, na direção de leste para oeste. Uma hora e meia mais tarde, sua velocidade é igual a 65,0 km/h, ainda na direção de leste para oeste. Qual é a aceleração média do trem? **(a)** 10,0 km/h², de leste para oeste, **(b)** 43,3 km/h², de leste para oeste, **(c)** 10,0 km/h², de oeste para leste **(d)** 43,3 km/h², de oeste para leste ou **(e)** 53,3 km/h², de oeste para leste.

Seção 2.4 Equações da Cinemática para Aceleração Constante

10. Em qual das situações a seguir as equações da cinemática *não* podem ser usadas? **(a)** Quando o vetor velocidade varia de um instante para o outro, **(b)** quando o vetor velocidade permanece constante, **(c)** quando a aceleração varia de um instante para o outro, **(d)** quando a aceleração permanece constante.

13. Em uma corrida de cavalos, dois cavalos, Silver Bullet e Shotgun,[13] partem do repouso e cada um deles mantém uma aceleração constante. No mesmo tempo transcorrido, Silver Bullet percorre uma distância 1,20 vez maior do que Shotgun. De acordo com as equações da cinemática, qual das afirmativas a seguir quanto às acelerações dos cavalos é verdadeira? **(a)** $a_{\text{Silver Bullet}} = 1{,}44\, a_{\text{Shotgun}}$ **(b)** $a_{\text{Silver Bullet}} = a_{\text{Shotgun}}$ **(c)** $a_{\text{Silver Bullet}} = 2{,}40\, a_{\text{Shotgun}}$ **(d)** $a_{\text{Silver Bullet}} = 1{,}20\, a_{\text{Shotgun}}$ **(e)** $a_{\text{Silver Bullet}} = 0{,}72\, a_{\text{Shotgun}}$

[13] Correspondente em português a Bala de Prata e Tiro. (N.T.)