

Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática

No fim do século XVII, *Sir Isaac Newton* estabeleceu os princípios fundamentais da mecânica, que constituem a base de grande parte da engenharia atual.



CAPÍTULO

1

Introdução



1

Introdução

- 1.1 O que é mecânica?
- 1.2 Conceitos e princípios fundamentais
- 1.3 Sistemas de unidades
- 1.4 Conversão de um sistema de unidades para outro
- 1.5 Método de resolução de problemas
- 1.6 Precisão numérica

1.1 O que é mecânica?

A mecânica pode ser definida como a ciência que descreve e prevê as condições de repouso ou movimento dos corpos sob a ação de forças. Ela divide-se em três partes: mecânica dos *corpos rígidos*, mecânica dos *corpos deformáveis* e *mecânica dos fluidos*.

A mecânica dos corpos rígidos é subdividida em *estática* e *dinâmica*: a primeira trata dos corpos em repouso; a última, dos corpos em movimento. Nesta parte do estudo da mecânica, os corpos são considerados perfeitamente rígidos. No entanto, as estruturas e máquinas reais nunca são absolutamente rígidas mas se deformam sob a ação das cargas a que estão sujeitas. Essas deformações, contudo, geralmente são pequenas e não afetam de modo sensível as condições de equilíbrio ou movimento da estrutura a ser estudada. São importantes, por outro lado, na medida em que a resistência da estrutura a falhas seja levada em consideração sendo por isso estudadas na mecânica dos materiais, a parte da mecânica que trata dos corpos deformáveis. A terceira divisão da mecânica, a mecânica dos fluidos, é subdividida no estudo de *fluidos incompressíveis* e de *fluidos compressíveis*. Uma importante subdivisão do estudo dos fluidos incompressíveis é a *hidráulica*, que trata dos problemas que envolvem a água.

A mecânica é uma ciência física, pois trata do estudo de fenômenos físicos. Todavia, alguns associam a mecânica à matemática, enquanto muitos a consideram um assunto de engenharia. Em parte, ambos os pontos de vista são justificáveis. A mecânica constitui a base de muitas ciências da engenharia, sendo um pré-requisito indispensável para seu estudo. Contudo, não apresenta o *empirismo* encontrado em algumas ciências da engenharia, ou seja, não se baseia apenas na experiência e na observação; pelo seu rigor e pela ênfase que coloca no raciocínio dedutivo, a mecânica se assemelha à matemática. Mas, apesar disso, não é uma ciência *abstrata* nem tampouco *pura*; a mecânica é uma ciência *aplicada*. O propósito da mecânica é explicar e prever fenômenos físicos e, desse modo, estabelecer os fundamentos para aplicações de engenharia.

1.2 Conceitos e princípios fundamentais

Embora o estudo da mecânica remonte aos tempos de Aristóteles (384-322 a.C.) e Arquimedes (287-212 a.C.), foi preciso esperar até Newton (1642-1727) para que houvesse uma formulação satisfatória de seus princípios fundamentais. Esses princípios foram posteriormente expressos de maneira diferente por d'Alembert, Lagrange e Hamilton. No entanto, sua validade permaneceu incontestada, até Einstein formular sua *teoria da relatividade* (1905). Apesar de suas limitações serem hoje reconhecidas, a *mecânica newtoniana* ainda continua sendo a base das ciências da engenharia atuais.

Os conceitos básicos usados em mecânica são os de *espaço*, *tempo*, *massa* e *força*. Esses conceitos não podem ser verdadeiramente definidos; devem ser aceitos com base em nossa intuição e experiência e usados como um conjunto de referências mentais para o nosso estudo de mecânica.

O conceito de espaço está associado à noção de posição de um ponto P . A posição de P pode ser definida por três comprimentos medidos a partir de um determinado ponto de referência, ou *origem*, segundo três direções dadas. Esses comprimentos são conhecidos como *coordenadas* de P .

Para se definir um evento, não é suficiente indicar a sua posição no espaço. O *tempo* do evento também deve ser fornecido.

O conceito de *massa* é usado para caracterização e comparação de corpos com base em certos experimentos mecânicos fundamentais. Dois corpos de mesma massa, por exemplo, serão atraídos pela Terra de modo idêntico e irão oferecer a mesma resistência a uma variação de movimento de translação.

Uma *força* representa a ação de um corpo sobre outro. A força pode ser exercida por contato direto ou à distância, como no caso das forças gravitacionais e magnéticas. Uma força é caracterizada pelo seu *ponto de aplicação*, sua *intensidade* e sua *direção*; uma força é representada por um *vetor* (Seção 2.3).

Na mecânica newtoniana, espaço, tempo e massa são conceitos absolutos, independentes entre si. (Isto não vale para *mecânica relativística*, na qual o tempo de um evento depende da sua posição e a massa de um corpo varia com sua velocidade.) Por outro lado, o conceito de força não é independente dos outros três. De fato, um dos princípios fundamentais da mecânica newtoniana listados adiante estabelece que a força resultante que atua sobre um corpo está relacionada à massa do corpo e ao modo pelo qual sua velocidade varia com o tempo.

Estudaremos as condições de repouso ou movimento de partículas e de corpos rígidos em termos dos quatro conceitos básicos que acabamos de apresentar. Por *partícula* entendemos uma quantidade de matéria muito pequena e que, por hipótese, ocupa um único ponto no espaço. Um *corpo rígido* é uma combinação de um grande número de partículas que ocupam posições fixas umas em relação às outras. O estudo da mecânica de partículas é obviamente um pré-requisito para o estudo dos corpos rígidos. Além disso, os resultados obtidos para uma partícula podem ser usados diretamente em um grande número de problemas que tratam das condições de repouso ou movimento de corpos reais.

O estudo da mecânica elementar se baseia em seis princípios fundamentais, baseados em evidências experimentais.

A lei do paralelogramo para a adição de forças. Essa lei estabelece que duas forças que atuam sobre uma partícula podem ser substituídas por uma única força, denominada *resultante*, que se obtém traçando-se a diagonal do paralelogramo cujos lados são iguais às forças dadas (Seção 2.2).

O princípio da transmissibilidade. Esse princípio estabelece que as condições de equilíbrio ou movimento de um corpo rígido permanecem inalteradas se uma força que atue em um dado ponto do corpo rígido for substituída por uma força de igual magnitude e de igual direção, porém atuando em um ponto diferente, desde que as duas forças tenham a mesma linha de ação (Seção 3.3).

As três leis fundamentais de Newton. Formuladas por Sir Isaac Newton no final do século XVII, essas leis podem ser enunciadas da seguinte maneira:

PRIMEIRA LEI. Se a força resultante que atua em uma partícula for nula, a partícula permanecerá em repouso (se originalmente em repouso) ou se moverá em velocidade constante em linha reta (se originalmente em movimento) (Seção 2.10).

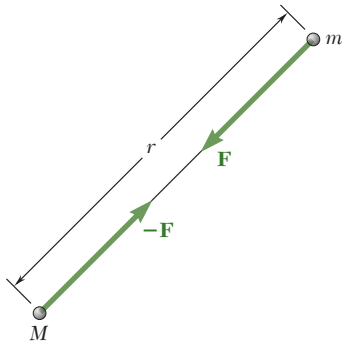


Figura 1.1



Foto 1.1 Quando em órbita da Terra, diz-se que as pessoas e os objetos ficam *sem peso*, muito embora a força gravitacional atuante seja aproximadamente 90% daquela experimentada sobre a superfície da Terra. Essa aparente contradição será resolvida no Cap. 12, quando aplicarmos a segunda lei de Newton ao movimento de partículas.

SEGUNDA LEI. Se a força resultante que atua sobre uma partícula não for nula, a partícula terá uma aceleração de magnitude proporcional à magnitude da resultante e na mesma direção dessa força resultante.

Conforme você verá na Seção 12.2, essa lei pode ser estabelecida como:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.1)$$

onde $\mathbf{F}$, m e $\mathbf{a}$ representam, respectivamente, a força resultante que atua sobre a partícula, a massa da partícula e a aceleração da partícula, expressas em um sistema de unidades consistente.

TERCEIRA LEI. As forças de ação e reação entre corpos em contato têm a mesma intensidade, a mesma linha de ação e sentidos opostos (Seção 6.1).

Lei de Newton da gravitação. Essa lei estabelece que duas partículas de massa M e m são mutuamente atraídas com forças iguais e opostas $\mathbf{F}$ e $-\mathbf{F}$ (Fig. 1.1) de magnitude F dada pela expressão

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.2)$$

onde r = distância entre as duas partículas

G = constante universal denominada constante gravitacional

A lei de Newton da gravitação introduz a ideia de uma ação exercida a distância e amplia a faixa de aplicação da terceira lei de Newton: a ação $\mathbf{F}$ e a reação $-\mathbf{F}$ na Fig. 1.1 são iguais e opostas, e têm a mesma linha de ação.

Um caso particular de grande importância é a atração exercida pela Terra sobre uma partícula localizada na sua superfície. A força $\mathbf{F}$ exercida pela Terra sobre a partícula é então definida como o *peso* $\mathbf{W}$ (do inglês, *weight*) da partícula. Considerando-se M igual à massa da Terra, m igual à massa da partícula e r igual ao raio R da Terra, e introduzindo-se a constante

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (1.3)$$

a magnitude do peso W de uma partícula de massa m pode ser expressa como*

$$W = mg \quad (1.4)$$

O valor de R na Eq. (1.3) depende da altitude do ponto considerado; depende também da sua latitude, pois a Terra não é perfeitamente esférica. Portanto, o valor de g varia com a posição do ponto considerado. Desde que o ponto realmente permaneça sobre a superfície da Terra, basta, na maior parte dos cálculos de engenharia, admitir que g seja igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

* Uma definição mais precisa do peso $\mathbf{W}$ deveria levar em conta a rotação da Terra.

Os princípios que acabamos de listar serão apresentados ao longo de nosso estudo de mecânica quando necessário. O estudo da estática de partículas realizado no Cap. 2 será baseado somente na lei do paralelogramo para a adição de forças e na primeira lei de Newton. O princípio de transmissibilidade será apresentado no Cap. 3, quando iniciarmos o estudo da estática de corpos rígidos, e a terceira lei de Newton será apresentada no Cap. 6, quando formos analisar as forças exercidas entre si pelos vários elementos que formam uma estrutura. A segunda lei de Newton e a lei de Newton da gravitação serão apresentadas no estudo da dinâmica. Veremos, então, que a primeira lei de Newton é um caso particular da segunda lei de Newton (Seção 12.2) e que o princípio de transmissibilidade poderia ser deduzido a partir dos outros princípios, podendo assim ser eliminado (Seção 16.5). Todavia, a primeira e a terceira leis de Newton, a lei do paralelogramo para a adição de forças e o princípio de transmissibilidade irão, por enquanto, nos prover dos fundamentos necessários e suficientes para o estudo completo da estática de partículas, de corpos rígidos e de sistemas de corpos rígidos.

Conforme observamos anteriormente, os seis princípios fundamentais já listados são baseados em evidência experimental. Com exceção da primeira lei de Newton e do princípio de transmissibilidade, são princípios independentes que não podem ser deduzidos matematicamente a partir dos demais ou a partir de qualquer outro princípio físico elementar. Sobre esses princípios está baseada a maior parte da intrincada estrutura da mecânica newtoniana. Por mais de dois séculos, um número espantoso de problemas, tratando das condições de repouso e movimento de corpos rígidos, de corpos deformáveis e de fluidos, foi resolvido pela aplicação desses princípios fundamentais. Muitas das soluções obtidas puderam ser verificadas experimentalmente, fornecendo assim uma verificação adicional dos princípios a partir dos quais foram obtidas. Apenas no final do século XIX e início do XX é que a mecânica de Newton foi colocada em cheque, no estudo do movimento dos átomos e no estudo do movimento de certos planetas, situações em que ela teve de ser suplementada pela teoria da relatividade. Mas, em uma escala humana ou da engenharia, na qual as velocidades são pequenas comparadas com a velocidade da luz, a mecânica de Newton ainda não foi refutada.

1.3 Sistemas de unidades

Associadas aos quatro conceitos fundamentais apresentados na seção anterior, estão as chamadas *unidades cinéticas*, isto é, as unidades de *comprimento*, *tempo*, *massa* e *força*. Essas unidades não podem ser escolhidas sem critério se quisermos satisfazer as condições da Eq. (1.1). Três dessas unidades podem ser definidas arbitrariamente; elas são denominadas *unidades básicas*. A quarta unidade, porém, deve ser escolhida de acordo com a Eq. (1.1) e denomina-se *unidade derivada*. Diz-se então que as unidades cinéticas assim selecionadas formam um *sistema de unidades consistente*.

Sistema Internacional de Unidades (Unidades do SI). Nesse sistema, que será de uso universal quando os Estados Unidos completarem sua conversão às unidades do SI, as unidades básicas são as de comprimento, massa e tempo, denominadas, respectivamente, *metro* (m), *quilograma* (kg) e *segundo* (s). As três são definidas arbitrariamente.

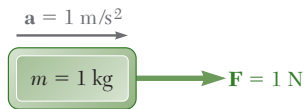


Figura 1.2

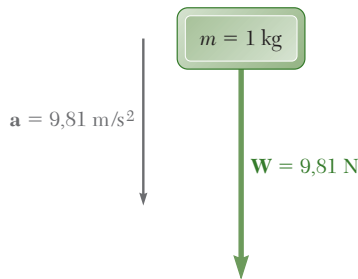


Figura 1.3

O segundo, originalmente escolhido para representar $1/86.400$ do dia solar médio, é agora definido como a duração de $9.192.631.770$ períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis do estado fundamental do átomo de césio-133. O metro, originalmente definido como um décimo de milionésimo da distância do equador a cada polo, é agora definido como $1.650.763,73$ comprimentos de onda da luz laranja-vermelha, que correspondem a uma certa transição em um átomo de criptônio-86. O quilograma, que é aproximadamente igual à massa de $0,001 \text{ m}^3$ de água, é definido como a massa de um padrão de platina-irídio mantido no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, em Sèvres, próximo a Paris, França. A unidade de força é uma unidade derivada. Denomina-se *newton* (N) e é definida como sendo a força que imprime uma aceleração de 1 m/s^2 a uma massa de 1 kg (Fig. 1.2). A partir da Eq. (1.1), escrevemos:

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.5)$$

Diz-se que as unidades do SI formam um sistema *absoluto* de unidades. Isso significa que as três unidades básicas escolhidas são independentes do local em que as medições são feitas. O metro, o quilograma e o segundo podem ser usados em qualquer lugar da Terra; podem ser usados, inclusive, em outro planeta, e sempre terão o mesmo significado.

O *peso* de um corpo, ou a *força da gravidade* exercida sobre esse corpo, deve ser expresso em newtons, como qualquer outra força. Da Eq. (1.4), segue-se que o peso de um corpo de 1 kg de massa (Fig. 1.3) é:

$$\begin{aligned} W &= mg \\ &= (1 \text{ kg})(9,81 \text{ m/s}^2) \\ &= 9,81 \text{ N} \end{aligned}$$

Múltiplos e submúltiplos das unidades fundamentais do SI podem ser obtidos pelo uso dos prefixos definidos na Tabela 1.1. Os múltiplos e submúltiplos das unidades de comprimento, massa e força usados mais frequentemente em engenharia são, respectivamente, o *quilômetro* (km) e o *milímetro* (mm); o *megagrama** (Mg) e o *grama* (g); e o *quiloneuton* (kN). De acordo com a Tabela 1.1, temos:

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} &= 1.000 \text{ m} & 1 \text{ mm} &= 0,001 \text{ m} \\ 1 \text{ Mg} &= 1.000 \text{ kg} & 1 \text{ g} &= 0,001 \text{ kg} \\ 1 \text{ kN} &= 1.000 \text{ N} \end{aligned}$$

A conversão dessas unidades em metros, quilogramas e newtons, respectivamente, pode ser efetuada pelo simples movimento da vírgula decimal três casas para a direita ou para a esquerda. Por exemplo, para converter $3,82 \text{ km}$ em metros, move-se a vírgula decimal três casas para a direita:

$$3,82 \text{ km} = 3.820 \text{ m}$$

Analogamente, $47,2 \text{ mm}$ são convertidos em metros movendo-se a vírgula decimal três casas para a esquerda:

$$47,2 \text{ mm} = 0,0472 \text{ m}$$

* Também conhecido como *tonelada métrica*.

Tabela 1.1 Prefixos SI

Fator de multiplicação	Prefixo	Símbolo
$1.000.000.000.000 = 10^{12}$	tera	T
$1.000.000.000 = 10^9$	giga	G
$1.000.000 = 10^6$	mega	M
$1.000 = 10^3$	quilo	k
$100 = 10^2$	hecto*	h
$10 = 10^1$	deca*	da
$0,1 = 10^{-1}$	deci*	d
$0,01 = 10^{-2}$	centi*	c
$0,001 = 10^{-3}$	mili	m
$0,000\ 001 = 10^{-6}$	micro	μ
$0,000\ 000\ 001 = 10^{-9}$	nano	n
$0,000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-12}$	pico	p
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-15}$	femto	f
$0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001 = 10^{-18}$	atto	a

*O uso desses prefixos deve ser evitado, exceto para a medição de áreas e volumes e para o uso não técnico do centímetro, como no caso das medidas do corpo e de roupas.

Usando notação científica, pode-se escrever também:

$$3,82\text{ km} = 3,82 \times 10^3\text{ m}$$

$$47,2\text{ mm} = 47,2 \times 10^{-3}\text{ m},$$

Os múltiplos da unidade de tempo são o *minuto* (min) e a *hora* (h). Uma vez que $1\text{ min} = 60\text{ s}$ e $1\text{ h} = 60\text{ min} = 3.600\text{ s}$, esses múltiplos não podem ser convertidos tão prontamente como os outros.

Usando-se o múltiplo ou submúltiplo apropriado de uma dada unidade, é possível evitar a escrita de números muito grandes ou muito pequenos. Por exemplo, geralmente se escreve 427,2 km em vez de 427.200 m, e 2,16 mm em vez de 0,002 16 m.

Unidades de área e volume. A unidade de área é o *metro quadrado* (m^2), que representa a área de um quadrado de 1 m de lado; a unidade de volume é o *metro cúbico* (m^3), igual ao volume de um cubo de 1 m de lado. Para evitar valores numéricos excessivamente pequenos ou grandes no cálculo de áreas e volumes, utilizam-se sistemas de subunidades, obtidos, respectivamente, pela elevação ao quadrado e ao cubo não só do milímetro mas também de dois submúltiplos intermediários do metro, a saber, o *decímetro* (dm) e o *centímetro* (cm). Uma vez que, por definição,

$$1\text{ dm} = 0,1\text{ m} = 10^{-1}\text{ m}$$

$$1\text{ cm} = 0,01\text{ m} = 10^{-2}\text{ m}$$

$$1\text{ mm} = 0,001\text{ m} = 10^{-3}\text{ m}$$

os submúltiplos da unidade de área são

$$1\text{ dm}^2 = (1\text{ dm})^2 = (10^{-1}\text{ m})^2 = 10^{-2}\text{ m}^2$$

$$1\text{ cm}^2 = (1\text{ cm})^2 = (10^{-2}\text{ m})^2 = 10^{-4}\text{ m}^2$$

$$1\text{ mm}^2 = (1\text{ mm})^2 = (10^{-3}\text{ m})^2 = 10^{-6}\text{ m}^2$$

e os submúltiplos da unidade de volume são

$$\begin{aligned}1 \text{ dm}^3 &= (1 \text{ dm})^3 = (10^{-1} \text{ m})^3 = 10^{-3} \text{ m}^3 \\1 \text{ cm}^3 &= (1 \text{ cm})^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3 \\1 \text{ mm}^3 &= (1 \text{ mm})^3 = (10^{-3} \text{ m})^3 = 10^{-9} \text{ m}^3\end{aligned}$$

Deve-se notar que, ao medir-se o volume de um líquido, em geral se refere ao decímetro cúbico (dm^3) como *litro* (L).

Outras unidades derivadas do SI usadas para se medir o momento de uma força, o trabalho de uma força, etc. estão mostradas na Tabela 1.2. Embora essas unidades venham a ser apresentadas em capítulos subsequentes, quando necessário, devemos observar desde já uma regra importante: quando uma unidade derivada for obtida pela divisão de uma unidade básica por outra unidade básica, poderá ser usado um prefixo no numerador da unidade derivada, mas não no denominador. Por exemplo, a constante k de uma mola que se estende 20 mm sob uma carga de 100 N será expressa como:

$$k = \frac{100 \text{ N}}{20 \text{ mm}} = \frac{100 \text{ N}}{0,020 \text{ m}} = 5.000 \text{ N/m} \quad \text{ou} \quad k = 5 \text{ kN/m}$$

porém, jamais como $k = 5 \text{ N/mm}$.

Unidades Usuais nos EUA. A maioria dos engenheiros americanos usa um sistema em que as unidades básicas são as de comprimento, força e tempo. Essas unidades são, respectivamente, o *pé* (ft, do inglês

Tabela 1.2 Principais unidades do SI usadas em mecânica

Grandeza	Unidade	Símbolo	Fórmula
Aceleração	Metro por segundo ao quadrado	...	m/s^2
Ângulo	Radiano	rad	*
Aceleração angular	Radiano por segundo ao quadrado	...	rad/s^2
Velocidade angular	Radiano por segundo	...	rad/s
Área	Metro quadrado	...	m^2
Massa específica	Quilograma por metro cúbico	...	kg/m^3
Energia	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
Força	Newton	N	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
Frequência	Hertz	Hz	s^{-1}
Impulso	Newton-segundo	...	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$
Comprimento	Metro	m	**
Massa	Quilograma	kg	**
Momento de uma força	Newton-metro	...	$\text{N} \cdot \text{m}$
Potência	Watt	W	J/s
Pressão	Pascal	Pa	N/m^2
Tensão	Pascal	Pa	N/m^2
Tempo	Segundo	s	**
Velocidade	Metro por segundo	...	m/s
Volume			
Sólidos	Metro cúbico	...	m^3
Líquidos	Litro	L	10^{-3} m^3
Trabalho	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$

* Unidade suplementar (1 revolução = $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$).

** Unidade básica.

foot), a *libra* (lb) e o *segundo* (s). O segundo corresponde à unidade do SI. O pé é definido como 0,3048 m. A libra é definida como o *peso* de um padrão de platina, denominado *libra padrão*, que é mantido no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos, nos arredores de Washington, cuja massa equivale a 0,45359243 kg. Uma vez que o peso de um corpo depende da atração gravitacional da Terra, que varia com o local, especifica-se que a libra padrão seja colocada ao nível do mar, a uma latitude de 45°, para se definir apropriadamente uma força de 1 lb. Obviamente, as unidades usuais nos Estados Unidos não formam um sistema absoluto de unidades. Em virtude da sua dependência da atração gravitacional da Terra, formam um sistema de unidades *gravitacional*.

Ainda que a libra padrão também sirva como unidade de massa em transações comerciais nos Estados Unidos, não pode ser usada desse modo em cálculos de engenharia, pois tal unidade não seria consistente com as unidades básicas definidas no parágrafo precedente. De fato, quando submetida a uma força de 1 lb, isto é, quando sujeita à força da gravidade, a libra padrão recebe a aceleração da gravidade, $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ (Fig. 1.4), e não a aceleração unitária requerida pela Eq. (1.1). A unidade de massa consistente com o pé, a libra e o segundo é a massa que recebe uma aceleração de 1 ft/s^2 quando submetida a uma força de 1 lb (Fig. 1.5). Essa unidade, às vezes chamada de *slug*, pode ser deduzida da equação $F = ma$, após substituição de 1 lb e 1 ft/s^2 para F e a , respectivamente. Escrevemos

$$F = ma \quad 1 \text{ lb} = (1 \text{ slug}) (1 \text{ ft/s}^2)$$

para obter

$$1 \text{ slug} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} \quad (1.6)$$

Comparando as Figs. 1.4 e 1.5, concluímos que o slug é uma massa 32,2 vezes maior que a massa da libra padrão.

O fato dos corpos, no sistema de unidades usuais nos Estados Unidos, serem caracterizados pelo seu peso em libras, em vez de sua massa em slugs, será conveniente no estudo de estática, no qual lidamos constantemente com pesos e outras forças e apenas raramente com massas. Porém, no estudo de dinâmica, que envolve forças, massas e acelerações, a massa m de um corpo será expressa em slugs quando seu peso W for dado em libras. Relembrando a Eq. (1.4), escrevemos

$$m = \frac{W}{g} \quad (1.7)$$

onde g é a aceleração da gravidade ($g = 32,2 \text{ ft/s}^2$).

Outras unidades usuais nos Estados Unidos, frequentemente encontradas em problemas de engenharia, são a *milha* (mi), igual a 5.280 ft; a *polegada* (in, do inglês *inch*), igual a 1/12 ft; e a *quilolibra* (kip, do inglês *kilo-pound*), igual à força de 1.000 lb. A unidade *ton* é frequentemente usada para representar a massa de 2.000 lb mas, assim como a libra, deve ser convertida em slugs nos cálculos de engenharia.

A conversão em pés, libras e segundos de grandezas expressas nessas outras unidades geralmente é mais complicada e requer maior atenção que as operações correspondentes nas unidades do SI. Por exemplo, se

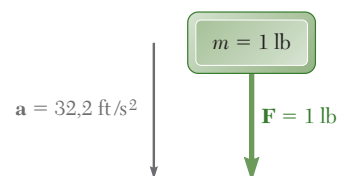


Figura 1.4

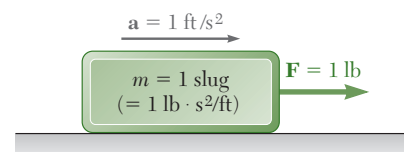


Figura 1.5

a intensidade de uma velocidade é dada como $v = 30 \text{ mi/h}$, a conversão para ft/s é feita da seguinte maneira. Primeiro, escrevemos:

$$v = 30 \frac{\text{mi}}{\text{h}}$$

Uma vez que desejamos nos livrar da unidade milhas e passar para a unidade pés, devemos multiplicar o segundo membro da equação por uma expressão que contenha milhas no denominador e pés no numerador. Mas, como não queremos alterar o valor do segundo membro, a expressão usada deve ter um valor igual à unidade. O quociente $(5.280 \text{ ft})/(1 \text{ mi})$ é a expressão desejada. De modo semelhante, para transformar a unidade hora em segundos, escrevemos:

$$v = \left(30 \frac{\text{mi}}{\text{h}}\right) \left(\frac{5.280 \text{ ft}}{1 \text{ mi}}\right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3.600 \text{ s}}\right)$$

Efetuada os cálculos numéricos e cancelando as unidades que aparecem tanto no numerador como no denominador, obtemos:

$$v = 44 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 44 \text{ ft/s}$$

1.4 Conversão de um sistema de unidades para outro

Em diversas ocasiões, um engenheiro deseja converter um resultado numérico obtido em unidades usuais nos Estados Unidos em unidades do SI ou vice-versa. Como a unidade de tempo é a mesma em ambos os sistemas, apenas duas unidades cinéticas básicas precisam ser convertidas. Logo, como todas as outras unidades cinéticas podem ser derivadas das unidades básicas, é preciso lembrar apenas dois fatores de conversão.

Unidades de comprimento. Por definição, a unidade de comprimento usual nos Estados Unidos é:

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \quad (1.8)$$

Segue-se que

$$1 \text{ mi} = 5.280 \text{ ft} = 5.280(0,3048 \text{ m}) = 1.609 \text{ m}$$

ou

$$1 \text{ mi} = 1.609 \text{ km} \quad (1.9)$$

Além disso,

$$1 \text{ in} = \frac{1}{12} \text{ ft} = \frac{1}{12} (0,3048 \text{ m}) = 0,0254 \text{ m}$$

ou

$$1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm} \quad (1.10)$$

Unidades de força. Lembrando que a unidade de força usual nos Estados Unidos (a libra) é definida como sendo o peso da libra padrão

(de massa 0,4536 kg) no nível do mar e a uma latitude de 45° (onde $g = 9,807 \text{ m/s}^2$), e aplicando a Eq. (1.4), escrevemos

$$W = mg$$

$$1 \text{ lb} = (0,4536 \text{ kg})(9,807 \text{ m/s}^2) = 4,448 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

ou, considerando a Eq. (1.5)

$$1 \text{ lb} = 4,448 \text{ N} \quad (1.11)$$

Unidades de massa. A unidade de massa usual nos Estados Unidos (slug) é uma unidade derivada. Logo, aplicando as Eqs. (1.6), (1.8) e (1.11), temos:

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = \frac{4,448 \text{ N}}{0,3048 \text{ m/s}^2} = 14,59 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

ou, Eq. (1.5)

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} = 14,59 \text{ kg} \quad (1.12)$$

Embora não se possa usá-la como uma unidade consistente de massa, lembremos que a massa da libra padrão é, por definição,

$$1 \text{ libra massa} = 0,4536 \text{ kg} \quad (1.13)$$

Essa constante pode ser usada para se determinar a massa em unidades do SI (quilogramas) de um corpo que foi caracterizado pelo seu peso em unidades usuais nos EUA (libras).

Para se converter uma unidade derivada usual nos Estados Unidos em unidades do SI, deve-se simplesmente multiplicar ou dividir tal unidade pelos fatores de conversão apropriados. Por exemplo, para converter o momento de uma força, cujo valor é $M = 47 \text{ lb} \cdot \text{in}$, em unidades do SI, usamos as fórmulas (1.10) e (1.11) e temos:

$$M = 47 \text{ lb} \cdot \text{in} = 47(4,448 \text{ N})(25,4 \text{ mm})$$

$$= 5310 \text{ N} \cdot \text{mm} = 5,31 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Os fatores de conversão dados nesta seção também podem ser usados para se converter um resultado numérico obtido em unidades do SI em unidades usuais nos Estados Unidos. Por exemplo, se o momento de uma força é $M = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$, seguindo o procedimento adotado no último parágrafo da Seção 1.3 escrevemos:

$$M = 40 \text{ N} \cdot \text{m} = (40 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ lb}}{4,448 \text{ N}} \right) \left(\frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \right)$$

Efetuada os cálculos numéricos e cancelando as unidades que aparecem tanto no numerador como no denominador, obtemos:

$$M = 29,5 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

As unidades usuais nos Estados Unidos utilizadas com maior frequência em mecânica estão listadas na Tabela 1.3 com suas equivalentes no SI.

Tabela 1.3 As unidades usuais nos EUA e as equivalentes no SI

Grandeza	Unidade usual nos EUA	Equivalente no SI
Aceleração	ft/s ²	0,3048 m/s ²
	in/s ²	0,0254 m/s ²
Área	ft ²	0,0929 m ²
	in ²	645,2 mm ²
Energia	ft · lb	1,356 J
Força	kip	4,448 kN
	lb	4,448 N
	oz	0,2780 N
Impulso	lb · s	4,448 N · s
Comprimento	ft	0,3048 m
	in	25,40 mm
	mi	1,609 km
	6 massa oz	28,35 g
Massa	massa lb	0,4536 kg
	slug	14,59 kg
	ton	907,2 kg
	lb · ft	1,356 N · m
Momento de uma força	lb · in	0,1130 N · m
Momento de inércia		
	De uma área	in ⁴
De uma massa	lb · ft + s ²	0,4162 × 10 ⁶ mm ⁴
	lb · ft + s ²	1,356 kg · m ²
Quantidade de movimento	lb · s	4,448 kg · m/s
Potência	ft · lb/s	1,356 W
	hp	745,7 W
Pressão ou tensão	lb/ft ²	47,88 Pa
	lb/in ² (psi)	6,895 kPa
Velocidade	ft/s	0,3048 m/s
	in/s	0,0254 m/s
	mi/h (mph)	0,4470 m/s
	mi/h (mph)	1,609 km/h
Volume	ft ³	0,02832 m ³
	in ³	16,39 cm ³
Líquidos	gal	3,785 L
	qt	0,9464 L
Trabalho	ft · lb	1,356 J

1.5 Método de resolução de problemas

Você deve abordar um problema de mecânica como se fosse abordar uma situação real de engenharia. Argumentando com base em sua própria experiência e intuição, você achará mais fácil entender e formular o problema. Todavia, uma vez enunciado claramente o problema, não haverá lugar em sua solução para preferências particulares. *A solução deve se basear nos seis princípios fundamentais estabelecidos na Seção 1.2 ou em teoremas deduzidos a partir deles.* Cada passo dado deve ser justificado nessa base. Devemos seguir regras estritas, que conduzam à solução de maneira quase automática, não deixando espaço para a intuição ou o “sentimento”. Após obter uma resposta, esta deverá ser conferida. Aqui, você poderá novamente apelar para o bom senso e a experiência pessoal. Se não estiver inteiramente satisfeito com o resultado obtido, você deverá conferir sua formulação do problema, a validade dos métodos empregados para solucioná-lo e a precisão dos cálculos.

O *enunciado* de um problema deve ser claro e preciso. Deve conter os dados e indicar a informação pedida. Deve-se incluir um desenho claro mostrando todas as grandezas envolvidas. Diagramas separados devem ser desenhados para todos os corpos envolvidos, indicando claramente as forças

que atuam em cada corpo. Esses diagramas são conhecidos como *diagramas de corpo livre* e estão descritos detalhadamente nas Seções 2.11 e 4.2.

Os *princípios fundamentais* da mecânica listados na Seção 1.2 *serão usados para formularmos equações* que expressem as condições de repouso ou de movimento dos corpos considerados. Cada equação deve ser claramente relacionada a um dos diagramas de corpo livre. Em seguida, você prosseguirá com a resolução do problema, observando estritamente as regras usuais de álgebra e registrando com clareza os vários passos realizados.

Uma vez obtida, a resposta deve ser *cuidadosamente conferida*. Erros de *raciocínio* podem ser facilmente detectados pela verificação das unidades. Por exemplo, para determinar o momento de uma força de 50 N em relação a um ponto a 0,60 m de sua linha de ação, podemos escrever (Seção 3.12)

$$M = Fd = (50 \text{ N})(0,60 \text{ m}) = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A unidade $\text{N} \cdot \text{m}$ obtida multiplicando-se newtons por metros é a unidade correta para o momento de uma força; se fosse obtida outra unidade, saberíamos que algum erro foi cometido.

Erros de *cálculo* geralmente podem ser detectados substituindo-se os valores numéricos obtidos em uma equação que ainda não foi usada e se a equação é satisfeita. É importante enfatizar a importância dos cálculos corretos em engenharia.

1.6 Precisão numérica

A precisão da solução de um problema depende de dois itens: (1) a precisão dos dados e (2) a precisão dos cálculos efetuados.

A solução não pode ser mais precisa que o menos preciso desses dois itens. Por exemplo, se o carregamento de uma ponte é conhecido como sendo 300.000 N com um possível erro de 400 N, o erro relativo que mede o grau de precisão dos dados é:

$$\frac{400 \text{ N}}{300.000 \text{ N}} = 0,0013 = 0,13\%$$

Ao se calcular a reação em um dos apoios da ponte, não fará sentido registrá-la como 57.288 N. A precisão da solução não pode ser maior que 0,13%, não importa quão precisos sejam os cálculos, e o possível erro na resposta pode ser de até $(0,13/100)(57.288 \text{ N}) \cong 75 \text{ N}$. A resposta deve ser registrada apropriadamente como $57.288 \pm 75 \text{ N}$.

Em problemas de engenharia, os dados raramente têm precisão maior que 0,2%. Logo, raramente se justifica escrever as respostas para tais problemas com uma precisão maior que 0,2%. Uma regra prática é usar 4 algarismos significativos para registrar números que começam com “1” e 3 algarismos significativos em todos os outros casos. A menos que seja indicado diferentemente admitiremos que os dados de um problema terão um mesmo grau de precisão. Por exemplo, uma força de 40 N deve ser lida como 40,0 N e uma força de 15 N deve ser lida como 15,00 N.

As calculadoras eletrônicas de bolso tão utilizadas por engenheiros e estudantes de engenharia facilitam os cálculos numéricos na resolução de muitos problemas por sua velocidade e precisão. No entanto, os estudantes não devem registrar algarismos significativos além do justificável simplesmente porque estes são fáceis de obter. Como já observado, uma precisão maior que 0,2% raramente é necessária ou significativa na solução de problemas práticos de engenharia.