

qualquer eixo ao momento de inércia do mesmo corpo em torno de um eixo paralelo ao primeiro passando pelo centro de massa:

$$I = I_{CM} + Mh^2. \quad (10-36)$$

onde h é a distância perpendicular entre os dois eixos.

Torque *Torque* é uma ação de girar ou de torcer um corpo em torno de um eixo de rotação, produzida por uma força \vec{F} . Se \vec{F} é exercida em um ponto dado pelo vetor posição \vec{r} em relação ao eixo, o módulo desse torque é

$$\tau = rF_t = r_\perp F = rF \sin \phi \quad (10-40, 10-41, 10-39)$$

onde F_t é a componente de \vec{F} perpendicular a \vec{r} e ϕ é o ângulo entre \vec{r} e \vec{F} . A grandeza r_\perp é a distância perpendicular entre o eixo de rotação e a reta que coincide com o vetor \vec{F} . Esta reta é chamada de **linha de ação** de \vec{F} , e r_\perp é chamada de **braço de alavanca** de \vec{F} . Da mesma forma, r é o braço de alavanca de F_t .

A unidade de torque do SI é o newton-metro ($N \cdot m$). O torque τ é positivo se tende a girar um corpo inicialmente em repouso no sentido anti-horário e negativo se tende a girar o corpo no sentido horário.

Segunda Lei de Newton para Rotações A segunda lei de Newton para rotações é

$$\tau_{res} = I\alpha, \quad (10-45)$$

onde τ_{res} é o torque resultante que age sobre a partícula ou corpo rígido, I é o momento de inércia da partícula ou do corpo em torno do eixo de rotação e α é a aceleração angular em torno do eixo.

Trabalho e Energia Cinética de Rotação As equações usadas para calcular trabalho e potência para movimentos de rotação são análogas às usadas para movimentos de translação:

$$W = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \tau d\theta \quad (10-53)$$

$$e \quad P = \frac{dW}{dt} = \tau\omega. \quad (10-55)$$

Quando τ é constante, a Eq. 10-53 se reduz a

$$W = \tau(\theta_f - \theta_i). \quad (10-54)$$

A forma do teorema do trabalho e energia usada para corpos em rotação é a seguinte:

$$\Delta K = K_f - K_i = \frac{1}{2}I\omega_f^2 - \frac{1}{2}I\omega_i^2 = W. \quad (10-52)$$

PERGUNTAS

- 1 A Fig. 10-22 é um gráfico da velocidade angular em função do tempo para um disco que gira como um carrossel. Para um ponto na borda do disco, ordene os instantes a , b , c e d de acordo com o módulo (a) da aceleração tangencial e (b) da aceleração radial, do maior para o menor.

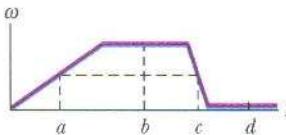


FIG. 10-22 Pergunta 1.

- 2 A Fig. 10-23b é um gráfico da posição angular do disco da Fig. 10-23a. A velocidade angular do disco é positiva, negativa ou nula em (a) $t = 1$ s, (b) $t = 2$ s, e (c) $t = 3$ s? (d) A aceleração angular é positiva ou negativa?

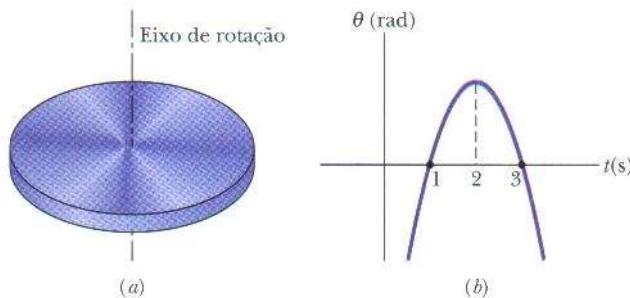


FIG. 10-23 Pergunta 2.

- 3 A Fig. 10-24 mostra uma placa metálica uniforme que era quadrada antes que 25% de sua área fossem cortados. Três pontos estão indicados por letras. Ordene-os de acordo com o valor do momento de inércia da placa em relação a um eixo perpendicular à placa passando por esses pontos, começando pelo maior.

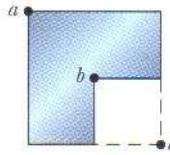


FIG. 10-24 Pergunta 3.

- 4 A Fig. 10-25 mostra gráficos da posição angular θ em função do tempo t para três casos nos quais um disco gira como um car-

rossel. Em cada caso, o sentido de rotação muda em uma certa posição angular θ_m . (a) Para cada caso, determine se θ_m corresponde a uma rotação no sentido horário ou anti-horário em relação à posição $\theta = 0$ ou se $\theta_m = 0$. Para cada caso, determine (b) se v é zero antes, depois ou no instante $t = 0$ e (c) se α é positiva, negativa ou nula.

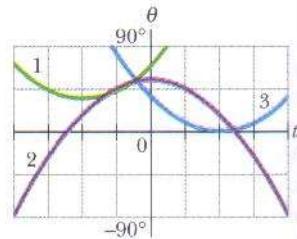


FIG. 10-25 Pergunta 4.

- 5 A Fig. 10-26a é uma vista superior de uma barra horizontal que pode girar; duas forças horizontais atuam sobre a barra, mas ela está parada. Se o ângulo entre \vec{F}_2 e a barra é reduzido a partir de 90° , \vec{F}_2 deve aumentar, diminuir ou permanecer a mesma para que a barra continue parada?

- 6 A Fig. 10-26b mostra uma vista superior de uma barra horizontal que gira em torno de um eixo sob a ação de duas forças horizontais, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 , com \vec{F}_2 fazendo um ângulo ϕ com a barra. Ordene os seguintes valores de ϕ de acordo com o módulo da aceleração angular da barra, do maior para o menor: 90° , 70° e 110° .

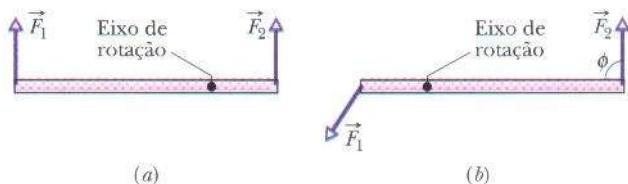


FIG. 10-26 Perguntas 5 e 6.

- 7 Na Fig. 10-27, duas forças, \vec{F}_1 e \vec{F}_2 , agem sobre um disco que gira em torno do centro como um carrossel. As forças mantêm os ângulos indicados durante a rotação, que ocorre no sentido anti-horário e com velocidade angular constante. Precisamos diminuir

o ângulo θ de \vec{F}_1 sem mudar o módulo de \vec{F}_1 . (a) Para manter a velocidade angular constante, devemos aumentar, diminuir ou manter constante o módulo de \vec{F}_2 ? (b) A força \vec{F}_1 tende a girar o disco no sentido horário ou anti-horário? (c) E a força \vec{F}_2 ?

8 Na vista superior da Fig. 10-28, cinco forças de mesmo módulo agem sobre um estranho carrossel; ele é um quadrado que pode girar em torno do ponto P , o ponto médio de um dos lados. Ordene as forças de acordo com os torques que elas produzem em relação ao ponto P , do maior para o menor.

9 Uma força é aplicada à borda de um disco que pode girar como um carrossel, fazendo mudar sua velocidade angular. As velocidades angulares inicial e final, respectivamente, para quatro situações, são as seguintes: (a) $-2 \text{ rad/s}, 5 \text{ rad/s}$; (b) $2 \text{ rad/s}, 5 \text{ rad/s}$; (c) $-2 \text{ rad/s}, -5 \text{ rad/s}$; e (d) $2 \text{ rad/s}, -5 \text{ rad/s}$. Ordene as situações de

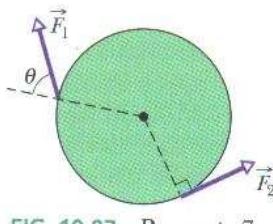


FIG. 10-27 Pergunta 7.

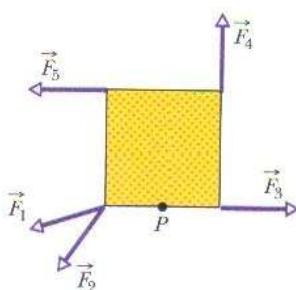


FIG. 10-28 Pergunta 8.

acordo com o trabalho realizado pelo torque aplicado pela força, do maior para o menor.

10 A Fig. 10-29 mostra três discos planos (de raios iguais) que podem girar em torno do centro como carrosséis. Cada disco é composto dos mesmos dois materiais, um mais denso que o outro (ou seja, com uma massa maior por unidade de volume). Nos discos 1 e 3 o material mais denso forma a metade externa da área do disco. No disco 2 ele forma a metade interna da área do disco. Forças de mesmo módulo são aplicadas tangencialmente aos discos, na borda ou na interface dos dois materiais, como na figura. Ordene os discos de acordo (a) com o torque em relação ao centro do disco, (b) o momento de inércia em relação ao centro e (c) a aceleração angular do disco, em ordem decrescente.



FIG. 10-29 Pergunta 10.

PROBLEMAS

• • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Seção 10-2 As Variáveis da Rotação

•1 Um bom lançador de beisebol pode arremessar uma bola a 85 mi/h com uma rotação de 1800 rev/min. Quantas revoluções a bola realiza até chegar à base principal? Para simplificar, suponha que a trajetória de 60 pés é percorrida em linha reta.

•2 Qual é a velocidade angular (a) do ponteiro dos segundos, (b) do ponteiro dos minutos e (c) do ponteiro das horas de um relógio analógico? Dê as respostas em radianos por segundo.

•3 Um mergulhador realiza 2,5 giros ao saltar de uma plataforma de 10 metros. Supondo que a velocidade vertical inicial seja nula, determine a velocidade angular média do mergulhador.

•4 A posição angular de um ponto da borda de uma roda é dada por $\theta = 4,0t - 3,0t^2 + t^3$, onde θ está em radianos e t em segundos. Quais são as velocidades angulares em (a) $t = 2,0 \text{ s}$ e (b) $t = 4,0 \text{ s}$? (c) Qual é a aceleração angular média no intervalo de tempo que começa em $t = 2,0 \text{ s}$ e termina em $t = 4,0 \text{ s}$? Qual é a aceleração angular instantânea (d) no início e (e) no fim desse intervalo?

•5 Quando se deixa cair uma fatia de pão com manteiga de uma mesa, a fatia adquire um movimento de rotação. Se a distância da mesa ao chão é de 76 cm e para rotações menores que 1 revolução, determine (a) a menor e (b) a maior velocidade angular para a qual a fatia cai com a manteiga para baixo.

•6 A posição angular de um ponto em uma roda é dada por $\theta = 2,0 + 4,0t^2 + 2,0t^3$, onde θ está em radianos e t em segundos. Em $t = 0$, quais são (a) a posição angular do ponto e (b) sua velocidade angular? (c) Qual é a velocidade angular em $t = 4,0 \text{ s}$? (d) Calcule a aceleração angular em $t = 2,0 \text{ s}$. (e) A aceleração angular da roda é constante?

•••7 A roda da Fig. 10-30 tem

oito raios de 30 cm igualmente espaçados, está montada em um eixo fixo e gira a 2,5 rev/s. Você deseja atirar uma flecha de 20 cm de comprimento paralelamente ao eixo da roda sem atingir um dos raios. Suponha que a flecha e os raios são muito finos. (a) Qual é a menor velocidade que a flecha deve ter? (b) O ponto entre o eixo e a borda da roda por onde a flecha passa faz alguma diferença? Caso a resposta seja afirmativa, para que ponto você deve mirar?



FIG. 10-30 Problema 7.

•••8 A aceleração angular de uma roda é $\alpha = 6,0t^4 - 4,0t^2$, com α em radianos por segundo ao quadrado e t em segundos. No instante $t = 0$ a roda tem uma velocidade angular de $+2,0 \text{ rad/s}$ e uma posição angular de $+1,0 \text{ rad}$. Escreva expressões (a) para a velocidade angular (em rad/s) e (b) para a posição angular (em rad) em função do tempo (em s).

Seção 10-4 Rotação com Aceleração Angular Constante

•9 Um disco, inicialmente girando a 120 rad/s, é freado com uma aceleração angular constante de módulo $4,0 \text{ rad/s}^2$. (a) Quanto tempo o disco leva para parar? (b) Qual é o ângulo total descrito pelo disco durante esse tempo?

•10 A velocidade angular do motor de um automóvel é aumentada a uma taxa constante de 1200 rev/min para 3000 rev/min em 12 s. (a) Qual é a aceleração angular em revoluções por minuto ao quadrado? (b) Quantas revoluções o motor executa nesse intervalo de 12 s?

- 11** Um tambor gira em torno de seu eixo central com uma velocidade angular de 12,60 rad/s. Se o tambor é freado a uma taxa constante de 4,20 rad/s², (a) quanto tempo leva para parar? (b) Qual é o ângulo total descrito pelo tambor até parar?
- 12** Partindo do repouso, um disco gira em torno do seu eixo central com aceleração angular constante. Em 5,0 s ele gira 25 rad. Durante esse tempo, quais são os módulos (a) da aceleração angular e (b) da velocidade angular média? (c) Qual é a velocidade angular instantânea do disco ao final dos 5,0 s? (d) Com a aceleração angular mantida, que ângulo adicional o disco irá descrever nos 5,0 s seguintes?
- 13** Uma roda tem uma aceleração angular constante de 3,0 rad/s². Durante um certo intervalo de 4,0 s ela descreve um ângulo de 120 rad. Supondo que a roda partiu do repouso, por quanto tempo ela já estava em movimento no início desse intervalo de 4,0 s?
- 14** Um carrossel gira a partir do repouso com uma aceleração angular de 1,50 rad/s². Quanto tempo leva para executar (a) as primeiras 2,00 revoluções e (b) as 2,00 revoluções seguintes?
- 15** Em $t = 0$, uma roda tem uma velocidade angular de 4,7 rad/s, uma aceleração angular constante de $-0,25 \text{ rad/s}^2$ e uma reta de referência em $\theta_0 = 0$. (a) Qual é o maior ângulo θ_{\max} descrito pela reta de referência no sentido positivo? Quais são (b) o primeiro e (c) o segundo instante no qual a reta de referência passa pelo ângulo $\theta = \theta_{\max}/2$? Em que (d) instante negativo e (e) instante positivo a reta de referência passa pelo ângulo $\theta = -10,5 \text{ rad}$? (f) Faça um gráfico de θ em função de t e indique as respostas dos itens (a) a (e) no gráfico.
- 16** Um disco gira em torno de seu eixo central partindo do repouso com aceleração angular constante. Em um certo instante ele está girando a 10 rev/s; após 60 revoluções, sua velocidade angular é de 15 rev/s. Calcule (a) a aceleração angular, (b) o tempo necessário para completar as 60 revoluções, (c) o tempo necessário para atingir a velocidade angular de 10 rev/s e (d) o número de revoluções desde o repouso até o instante em que o disco atinge a velocidade angular de 10 rev/s.
- 17** Uma roda executa 40 revoluções quando desacelera a partir de uma velocidade angular de 1,5 rad/s até parar. (a) Supondo que a aceleração angular é constante, determine o intervalo de tempo em que isso ocorre. (b) Qual é a aceleração angular da roda? (c) Quanto tempo é necessário para que a roda complete as 20 primeiras revoluções?
- seção 10-5 Relacionando as Variáveis Lineares e Angulares**
- 18** Um disco de vinil funciona girando em torno de seu eixo de modo que um sulco, aproximadamente circular, desliza sob uma agulha que fica na extremidade de um braço mecânico. Saliências do sulco passam pela agulha e a fazem oscilar. O equipamento converte essas oscilações em sinais elétricos, que são amplificados e transformados em sons. Suponha que um disco de vinil gira a 33 1/3 rev/min, que o sulco que está sendo tocado esteja a uma distância de 10,0 cm do centro do disco e que a distância média entre as saliências do sulco seja 1,75 mm. A que taxa (em toques por segundo) as saliências atingem a agulha?
- 19** Entre 1911 e 1990 o alto da torre inclinada de Pisa, Itália, se deslocou para o sul a uma taxa média de 1,2 mm/ano. A torre tem 55 m de altura. Em radianos por segundo, qual é a velocidade angular média do alto da torre em relação à base?
- 20** Um astronauta está sendo testado em uma centrifuga. A centrifuga tem um raio de 10 m e, ao partir, gira de acordo com a equação $\theta = 0,30t^2$, onde t está em segundos e θ em radianos. Quando $t = 5,0 \text{ s}$, quais são os módulos (a) da velocidade angular, (b) da velocidade linear, (c) da aceleração tangencial e (d) da aceleração radial do astronauta?
- 21** Uma roda com um diâmetro de 1,20 m está girando com uma velocidade angular de 200 rev/min. (a) Qual é a velocidade angular da roda em rad/s? (b) Qual é a velocidade linear de um ponto na borda da roda? (c) Que aceleração angular constante (em revoluções por minuto ao quadrado) aumenta a velocidade angular da roda para 1000 rev/min em 60,0 s? (d) Quantas revoluções a roda executa nesses 60,0 s? A velocidade do avião é paralela ao eixo de rotação da hélice.
- 22** Se a hélice de um avião gira a 2000 rev/min quando o avião voa com uma velocidade de 480 km/h em relação ao solo, qual é a velocidade escalar linear de um ponto na ponta da hélice, a 1,5 m de distância do eixo, em relação (a) ao piloto e (b) a um observador no solo? A velocidade do avião é paralela ao eixo de rotação da hélice.
- 23** Quais são os módulos (a) da velocidade angular, (b) da aceleração radial e (c) da aceleração tangencial de uma nave espacial que faz uma curva circular com 3220 km de raio a uma velocidade de 29 000 km/h?
- 24** Um objeto gira em torno de um eixo fixo, e a posição angular de uma reta de referência sobre o objeto é dada por $\theta = 0,40e^{2t}$, onde θ está em radianos e t em segundos. Considere um ponto do objeto que está a 4,0 cm do eixo de rotação. Em $t = 0$, quais são os módulos (a) da componente tangencial e (b) da componente radial da aceleração do ponto?
- 25** Um disco, com um raio de 0,25 m, deve girar como um carrossel de um ângulo de 800 rad, partindo do repouso, ganhando velocidade angular a uma taxa constante α_1 nos primeiros 400 rad e em seguida perdendo velocidade angular a uma taxa constante $-\alpha_1$, até ficar novamente em repouso. O módulo da aceleração centrípeta de qualquer parte do disco não deve exceder 400 m/s². (a) Qual é o menor tempo necessário para a rotação? (b) Qual é o valor correspondente de α_1 ?
- 26** Uma roda de um giroscópio com 2,83 cm de raio é acelerada a partir do repouso a 14,2 rad/s² até que sua velocidade angular atinja 2760 rev/min. (a) Qual é a aceleração tangencial de um ponto na borda da roda durante este processo de aceleração angular? (b) Qual é a aceleração radial deste ponto quando a roda está girando na velocidade máxima? (c) Qual é a distância percorrida por um ponto da borda da roda durante este processo de aceleração angular?
- 27** Um método tradicional para medir a velocidade da luz utiliza uma roda dentada giratória. Um feixe de luz passa pelo espaço entre dois dentes situados na borda da roda, como na Fig. 10-31, viaja até um espelho perpendicular ao feixe de luz

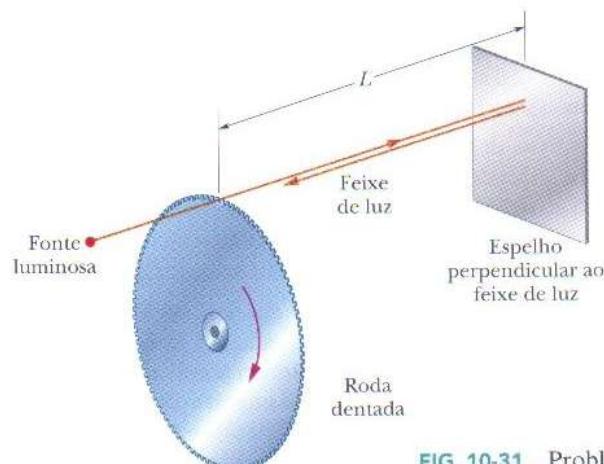


FIG. 10-31 Problema 27.

exatamente a tempo de passar pelo espaço seguinte entre dois dentes. Uma dessas rodas tem 5,0 cm de raio e 500 espaços entre dentes. Medidas realizadas quando o espelho está a uma distância $L = 500$ m da roda fornecem o valor de $3,0 \times 10^5$ km/s para a velocidade da luz. (a) Qual é a velocidade angular (constante) da roda? (b) Qual é a velocidade linear de um ponto na borda da roda?

••28 O volante de uma máquina a vapor gira com uma velocidade angular constante de 150 rev/min. Quando a máquina é desligada, o atrito nos mancais e com o ar pára a roda em 2,2 h. (a) Qual é a aceleração angular constante, em revoluções por minuto ao quadrado, da roda durante a desaceleração? (b) Quantas revoluções a roda executa antes de parar? (c) No instante em que a roda está girando a 75 rev/min, qual é a componente tangencial da aceleração linear de uma partícula da roda que está a 50 cm do eixo de rotação? (d) Qual é o módulo da aceleração linear total da partícula do item (c)?

••29 (a) Qual é a velocidade angular ω em torno do eixo polar de um ponto da superfície da Terra na latitude 40° N? (A Terra gira em torno desse eixo.) (b) Qual é a velocidade linear v desse ponto? Quais são (c) ω e (d) v para um ponto no equador?

••30 Na Fig. 10-32 uma roda A de raio $r_A = 10$ cm está acoplada por uma correia B a uma roda C de raio $r_C = 25$ cm. A velocidade angular da roda A é aumentada a partir do repouso a uma taxa constante de $1,6 \text{ rad/s}^2$. Determine o tempo necessário para que a roda C atinja uma velocidade angular de 100 rev/min, supondo que a correia não desliza. (Sugestão: Se a correia não desliza, as velocidades lineares das bordas dos discos são iguais.)

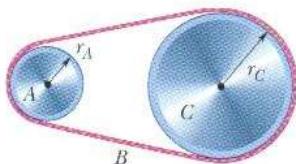


FIG. 10-32 Problema 30.

••31 O prato de um toca-discos está girando a $33\frac{1}{3}$ rev/min. Uma semente de melancia está sobre o prato a 6,0 cm de distância do eixo de rotação. (a) Calcule a aceleração da semente, supondo que ela não escorregue. (b) Qual é o valor mínimo do coeficiente de atrito estático entre a semente e o prato para que a semente não escorregue? (c) Suponha que o prato atinge sua velocidade angular final em 0,25 s, partindo do repouso com aceleração constante. Calcule o menor coeficiente de atrito estático necessário para que a semente não escorregue durante o período de aceleração.

••32 Um pulsar é uma estrela de nêutrons que gira rapidamente em torno de si própria e emite um feixe de rádio, do mesmo modo como um farol emite um feixe luminoso. Recebemos na Terra um pulso de rádio para cada revolução da estrela. O período T de rotação de um pulsar é determinado medindo o intervalo de tempo entre os pulsos. O pulsar da nebulosa do Caranguejo tem um período de rotação $T = 0,033$ s que está aumentando a uma taxa de $1,26 \times 10^{-5}$ s/ano. (a) Qual é a aceleração angular α do pulsar? (b) Se α se mantiver constante, daqui a quantos anos o pulsar vai parar de girar? (c) O pulsar foi criado pela explosão de uma supernova observada no ano de 1054. Supondo que a aceleração α se manteve constante, determine o período T logo após a explosão.

seção 10-6 Energia Cinética de Rotação

•33 Calcule o momento de inércia de uma roda que tem uma energia cinética de 24 400 J quando gira a 602 rev/min.

•34 A Fig. 10-33 mostra a velocidade angular em função do tempo para uma barra fina que gira em torno de uma das extremidades. A escala do eixo ω é definida por $\omega_s = 6,0 \text{ rad/s}$. (a) Qual é o módulo da aceleração angular da barra? (b) Em $t = 4,0$ s, a barra tem uma energia cinética de 1,60 J. Qual é a energia cinética da barra em $t = 0$?

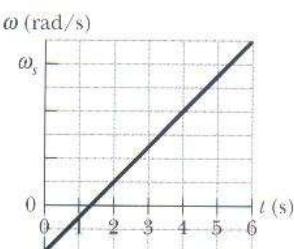


FIG. 10-33 Problema 34.

seção 10-7 Cálculo do Momento de Inércia

•35 Calcule o momento de inércia de uma régua de um metro, com uma massa de 0,56 kg, em relação a um eixo perpendicular à régua na marca de 20 cm. (Trate a régua como uma barra fina.)

•36 A Fig. 10-34 mostra três partículas de 0,0100 kg que foram coladas em uma barra de comprimento $L = 6,00$ cm e massa desprezível. O conjunto pode girar em torno de um eixo perpendicular que passa pelo ponto O na extremidade esquerda. Se removermos uma das partículas (ou seja, 33% da massa), de que percentagem o momento de inércia do conjunto em relação ao eixo de rotação diminui se a partícula removida é (a) a mais interna e (b) a mais externa?

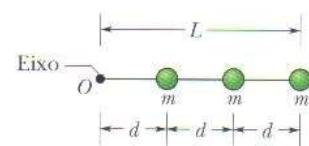


FIG. 10-34 Problemas 36 e 64.

•37 Dois cilindros uniformes, ambos girando em torno do eixo central (longitudinal) com uma velocidade angular de 235 rad/s, têm a mesma massa de 1,25 kg e raios diferentes. Qual é a energia cinética de rotação (a) do cilindro menor, de raio 0,25 m, e (b) do cilindro maior, de raio 0,75 m?

•38 A Fig. 10-35a mostra um disco que pode girar em torno de um eixo perpendicular à sua face a uma distância h do centro do disco. A Fig. 10-35b mostra o momento de inércia I do disco em relação ao eixo em função da distância h , desde o centro até a borda do disco. A escala do eixo I é definida por $I_A = 0,050 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e $I_B = 0,150 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Qual é a massa do disco?

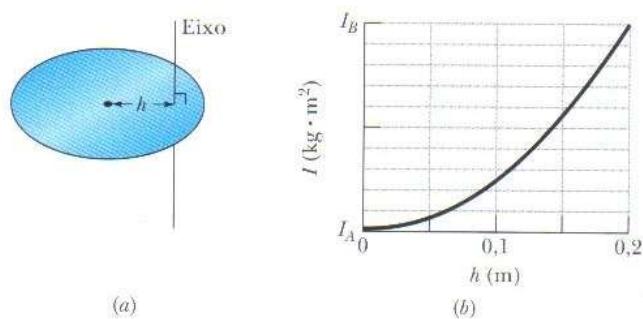


FIG. 10-35 Problema 38.

•39 Na Fig. 10-36, duas partículas, ambas de massa $m = 0,85$ kg, estão ligadas uma à outra e a um eixo de rotação em O por duas barras finas, ambas de comprimento $d = 5,6$ cm e massa $M = 1,2$ kg. O conjunto gira em torno do eixo de rotação com velocidade angular $\omega = 0,30 \text{ rad/s}$. Em relação a O , quais são (a) o

momento de inércia do conjunto e (b) a energia cinética do conjunto?

••40 Quatro partículas iguais de massa $0,50 \text{ kg}$ cada uma são colocadas nos vértices de um quadrado de $2,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ e mantidas nesta configuração por quatro barras de massa desprezível, que formam os lados do quadrado. Qual é o momento de inércia deste corpo rígido em relação a um eixo que (a) está no plano do quadrado e passa pelos pontos médios de dois lados opostos, (b) passa pelo ponto médio de um dos lados e é perpendicular ao plano do quadrado e (c) está no plano do quadrado e passa por duas partículas diagonalmente opostas?

••41 O bloco uniforme da Fig. 10-37 tem massa de $0,172 \text{ kg}$ e lados $a = 3,5 \text{ cm}$, $b = 8,4 \text{ cm}$ e $c = 1,4 \text{ cm}$. Calcule o momento de inércia do bloco em relação a um eixo que passa por um canto e é perpendicular às faces maiores.

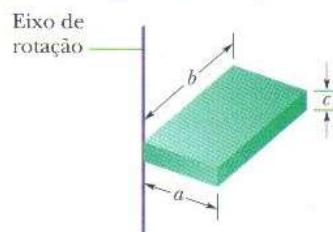


FIG. 10-37 Problema 41.

••42 A Fig. 10-38 mostra um arranjo de 15 discos iguais colados para formar uma barra de comprimento $L = 1,0000 \text{ m}$ e massa total $M = 100,0 \text{ mg}$. O arranjo pode girar em torno de um eixo perpendicular que passa pelo disco central no ponto O . (a) Qual é o momento de inércia do conjunto em relação a esse eixo? (b) Se considerarmos o arranjo como sendo uma barra aproximadamente uniforme de massa M e comprimento L , que erro percentual estaremos cometendo se usarmos a fórmula da Tabela 10-2e para calcular o momento de inércia?

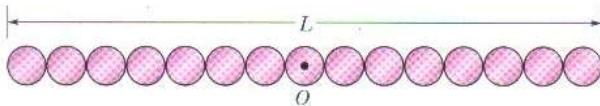


FIG. 10-38 Problema 42.

••43 Alguns caminhões utilizam a energia armazenada em um volante que um motor elétrico acelera até uma velocidade de $200\pi \text{ rad/s}$. Um desses volantes é um cilindro uniforme com uma massa de 500 kg e um raio de $1,0 \text{ m}$. (a) Qual é a energia cinética do volante quando está girando com a velocidade máxima? (b) Se o caminhão consome uma potência média de $8,0 \text{ kW}$, por quantos minutos pode operar sem que o volante seja novamente carregado?

••44 As massas e coordenadas de quatro partículas são as seguintes: 50 g , $x = 2,0 \text{ cm}$, $y = 2,0 \text{ cm}$; 25 g , $x = 0$, $y = 4,0 \text{ cm}$; 25 g , $x = -3,0 \text{ cm}$, $y = -3,0 \text{ cm}$; 30 g , $x = -2,0 \text{ cm}$, $y = 4,0 \text{ cm}$. Quais são os momentos de inércia desse conjunto em relação aos eixos (a) x , (b) y e (c) z ? (d) Suponha que as respostas de (a) e (b) sejam A e B , respectivamente. Nesse caso, qual é a resposta de (c) em termos de A e B ?

seção 10-8 Torque

••45 Uma pequena bola de massa $0,75 \text{ kg}$ está presa a uma das extremidades de uma barra de $1,25 \text{ m}$ de comprimento e massa desprezível. A outra extremidade da barra está pendurada em um eixo. Quando o pêndulo assim formado faz um ângulo de 30° com a vertical, qual é o módulo do torque exercido pela força gravitacional em relação ao eixo?

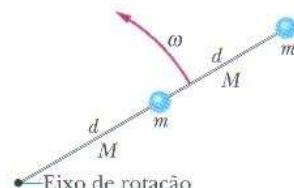


FIG. 10-36 Problema 39.

••46 O comprimento do braço do pedal de uma bicicleta é de $0,152 \text{ m}$, e uma força de 111 N é aplicada ao pedal pelo ciclista. Qual é o módulo do torque em relação ao eixo do braço do pedal quando o braço faz um ângulo de (a) 30° , (b) 90° e (c) 180° com a vertical?

••47 O corpo da Fig. 10-39 pode girar em torno de um eixo perpendicular ao papel passando por O , e duas forças atuam sobre ele, como mostra a figura. Se $r_1 = 1,30 \text{ m}$, $r_2 = 2,15 \text{ m}$, $F_1 = 4,20 \text{ N}$, $F_2 = 4,90 \text{ N}$, $\theta_1 = 75,0^\circ$ e $\theta_2 = 60,0^\circ$, qual é o torque resultante em relação ao eixo?



FIG. 10-39 Problema 47.

••48 O corpo da Fig. 10-40 tem um eixo que passa por O e é perpendicular ao papel. Três forças agem sobre ele: $F_A = 10 \text{ N}$ no ponto A , a $8,0 \text{ m}$ de O ; $F_B = 16 \text{ N}$ em B , a $4,0 \text{ m}$ de O ; e $F_C = 19 \text{ N}$ em C , a $3,0 \text{ m}$ de O . Qual é o torque resultante em relação a O ?

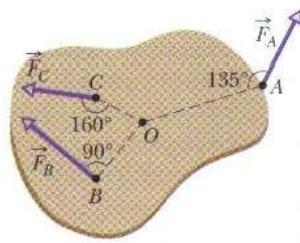


FIG. 10-40 Problema 48.

seção 10-9 A Segunda Lei de Newton para Rotações

••49 Em um salto de trampolim, a velocidade angular de uma mergulhadora em relação a um eixo que passa pelo seu centro de massa varia de zero a $6,20 \text{ rad/s}$ em 220 ms . Seu momento de inércia em relação ao mesmo eixo é $12,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Durante o salto, quais são os módulos (a) da aceleração angular média da mergulhadora e (b) do torque externo médio exercido pelo trampolim sobre a mergulhadora?

••50 Se um torque de $32,0 \text{ N} \cdot \text{m}$ exercido sobre uma roda produz uma aceleração angular de $25,0 \text{ rad/s}^2$, qual é o momento de inércia da roda?

••51 A Fig. 10-41 mostra um disco uniforme que pode girar em torno do centro como um carrossel. O disco tem um raio de $2,00 \text{ cm}$ e uma massa de $20,0 \text{ gramas}$, e está inicialmente em repouso. A partir do instante $t = 0$, duas forças devem ser aplicadas tangencialmente à borda do disco, como mostra a figura, para que, no instante $t = 1,25 \text{ s}$, o disco tenha uma velocidade angular de 250 rad/s no sentido anti-horário. A força \vec{F}_1 tem um módulo de $0,100 \text{ N}$. Qual é o módulo de \vec{F}_2 ?

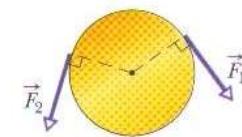


FIG. 10-41 Problema 51.

••52 A Fig. 10-42 mostra as partículas 1 e 2, ambas de massa m , presas às extremidades de uma barra rígida de massa desprezível e comprimento $L_1 + L_2$, com $L_1 = 20 \text{ cm}$ e $L_2 = 80 \text{ cm}$. A barra é mantida horizontalmente no fulcro até ser liberada. Qual é o módulo da aceleração inicial (a) da partícula 1 e (b) da partícula 2?



FIG. 10-42 Problema 52.

••53 Na Fig. 10-43a uma placa de plástico de forma irregular, com espessura e massa específica (massa por unidade de volume) uniformes deve girar em torno de um eixo perpendicular à face da placa passando pelo ponto O . O momento de inércia da placa em torno desse eixo é medido usando o seguinte método: um disco circular de massa

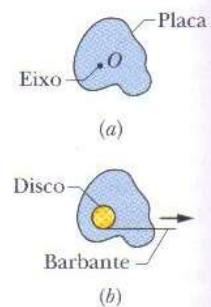


FIG. 10-43 Problema 53.

0,500 kg e raio 2,00 cm é colado na placa, com seu centro coincidindo com O (Fig. 10-43b). Um barbante é enrolado na borda do disco como se ele fosse um pião e puxado durante 5,00 s. Em consequência, o disco e a placa são submetidos a uma força constante de 0,400 N, aplicada pelo barbante tangencialmente à borda do disco. A velocidade angular resultante é de 114 rad/s. Qual é o momento de inércia da placa em relação ao eixo?

••54 Na Fig. 10-44 um cilindro com uma massa de 2,0 kg pode girar em torno de seu eixo central, que passa pelo ponto O . As forças mostradas têm os seguinte módulos: $F_1 = 6,0 \text{ N}$, $F_2 = 4,0 \text{ N}$, $F_3 = 2,0 \text{ N}$ e $F_4 = 5,0 \text{ N}$. As distâncias radiais são $r = 5,0 \text{ cm}$ e $R = 12 \text{ cm}$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação da aceleração angular do cilindro. (Durante a rotação, as forças mantêm seus ângulos em relação ao cilindro.)

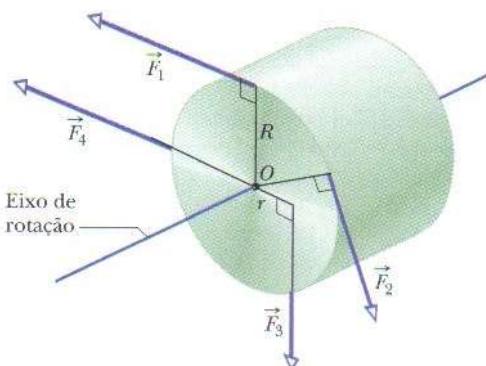


FIG. 10-44 Problema 54.

••55 Na Fig. 10-45 o bloco 1 tem massa $m_1 = 460 \text{ g}$, o bloco 2 tem massa $m_2 = 500 \text{ g}$, e a polia, que está montada em um eixo horizontal com atrito desprezível, tem um raio $R = 5,00 \text{ cm}$. Quando o sistema é liberado a partir do repouso o bloco 2 cai 75,0 cm em 5,00 s sem que a corda deslize na borda da polia. (a) Qual é o módulo da aceleração dos blocos? Qual é o valor (b) da tensão T_2 e (c) da tensão T_1 ? (d) Qual é o módulo da aceleração angular da polia? (e) Qual é o momento de inércia da polia?

••56 Em uma rasteira, no judô, você tira o apoio do pé esquerdo do adversário ao mesmo tempo em que puxa o quimono dele para este lado sem apoio. Em consequência, seu adversário gira em torno do pé direito em direção ao tatame. A Fig. 10-46 mostra um diagrama simplificado do seu adversário, com o pé esquerdo já fora do chão. O eixo de rotação passa pelo ponto O . A força gravitacional F_g age sobre o centro de massa do seu adversário, que está a uma distância horizontal $d = 28 \text{ cm}$ do ponto O . Sua massa é de 70 kg e seu momento de inércia em relação ao ponto O é $65 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Qual é o módulo da aceleração angular inicial do seu adversário em relação ao ponto O se o

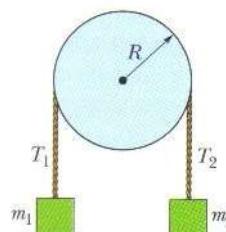


FIG. 10-45 Problemas 55 e 73.

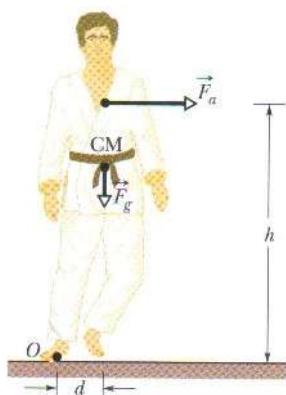


FIG. 10-46 Problema 56.

puxão \vec{F}_a que você aplica ao seu quimono (a) é desprezível e (b) é horizontal, com um módulo de 300 N e aplicado a uma altura $h = 1,4 \text{ m}$? ~~_____~~

••57 Uma polia, com um momento de inércia de $1,0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação a seu eixo e um raio de 10 cm, é submetida a uma força aplicada tangencialmente a sua borda. O módulo da força varia no tempo de acordo com a equação $F = 0,50t + 0,30t^2$, com F em newtons e t em segundos. A polia está inicialmente em repouso. Em $t = 3,0 \text{ s}$, quais são (a) sua aceleração angular e (b) sua velocidade angular?

seção 10-10 Trabalho e Energia Cinética de Rotação

•58 Uma barra fina de 0,75 m de comprimento e uma massa de 0,42 kg está suspensa por uma das extremidades. Ela é puxada para o lado e liberada para oscilar como um pêndulo, passando pela posição mais baixa com uma velocidade angular de 4,0 rad/s. Desprezando o atrito e a resistência do ar, determine (a) a energia cinética da barra na posição mais baixa e (b) a altura acima dessa posição que o centro de massa alcança.

•59 Uma roda de 32,0 kg, essencialmente um aro fino com 1,20 m de raio, está girando a 280 rev/min. Ela precisa ser parada em 15,0 s. (a) Qual é o trabalho necessário para fazê-la parar? (b) Qual é a potência média necessária?

•60 (a) Se $R = 12 \text{ cm}$, $M = 400 \text{ g}$ e $m = 50 \text{ g}$ na Fig. 10-18, determine a velocidade do bloco após ele ter descido 50 cm a partir do repouso. Resolva o problema usando a lei da conservação da energia. (b) Repita o item (a) para $R = 5,0 \text{ cm}$.

•61 O virabrequim de um automóvel transfere energia do motor para o eixo a uma taxa de 100 hp ($= 74,6 \text{ kW}$) quando gira a 1800 rev/min. Qual é o torque (em newtons-metros) exercido pelo virabrequim?

•62 Um cilindro uniforme com 10 cm de raio e uma massa de 20 kg está montado de modo a poder girar livremente em torno de um eixo horizontal paralelo ao eixo central longitudinal do cilindro e situado a 5,0 cm deste eixo. (a) Qual é o momento de inércia do cilindro em relação ao eixo de rotação? (b) Se o cilindro é liberado a partir do repouso com o eixo central longitudinal na mesma altura que o eixo em torno do qual pode girar, qual é a velocidade angular do cilindro ao passar pelo ponto mais baixo de sua trajetória?

•63 Uma régua de um metro é mantida verticalmente com uma das extremidades apoiada no solo e depois liberada. Determine a velocidade da outra extremidade pouco antes de tocar o solo, supondo que a extremidade de apoio não escorrega. (Sugestão: Considere a régua como uma barra fina e use a lei de conservação da energia.)

•64 Na Fig. 10-34, três partículas de 0,0100 kg foram coladas em uma barra de comprimento $L = 6,00 \text{ cm}$ e massa desprezível, que pode girar em torno de um eixo perpendicular que passa pelo ponto O em uma de suas extremidades. Determine o trabalho necessário para mudar a velocidade angular (a) de 0 para 20,0 rad/s, (b) de 20,0 rad/s para 40,0 rad/s e (c) de 40,0 rad/s para 60,0 rad/s. (d) Qual é a inclinação da curva da energia cinética do conjunto (em joules) em função do quadrado da velocidade angular (em radianos quadrados por segundo ao quadrado)?

••65 A Fig. 10-47 mostra um corpo rígido formado por um aro fino (de massa m e raio $R = 0,150 \text{ m}$) e uma barra fina radial (de massa m e comprimento $L = 2,00R$). O conjunto está na vertical, mas se recebe um pequeno empurrão começa a girar em torno de um eixo horizontal no plano do aro e da barra, que passa pela

extremidade inferior da barra. Supondo que a energia fornecida ao sistema pelo pequeno empurrão é desprezível, qual é a velocidade angular do conjunto quando ele passa pela posição invertida (de cima para baixo)?

- 66** Uma casca esférica uniforme de massa $M = 4,5 \text{ kg}$ e raio $R = 8,5 \text{ cm}$ pode girar em torno de um eixo vertical sem atrito (Fig. 10-48). Uma corda de massa desprezível está enrolada no equador da casca, passa por uma polia de momento de inércia $I = 3,0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e raio $r = 5,0 \text{ cm}$ e está presa a um pequeno objeto de massa $m = 0,60 \text{ kg}$. Não há atrito no eixo da polia e a corda não escorrega na casca nem na polia. Qual é a velocidade do objeto depois de cair 82 cm após ter sido liberado a partir do repouso? Use considerações de energia.

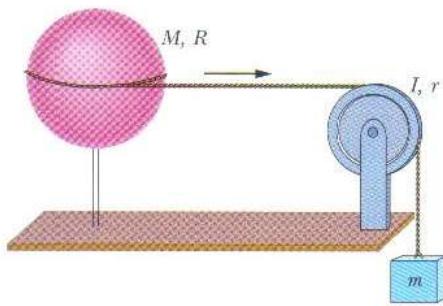


FIG. 10-48 Problema 66.

- 67** Uma chaminé cilíndrica cai quando sua base sofre uma ruptura. Trate a chaminé como uma barra fina com 55,0 m de comprimento. No instante em que a chaminé faz um ângulo de $35,0^\circ$ com a vertical durante a queda, quais são (a) a aceleração radial do topo e (b) a aceleração tangencial do topo? (Sugestão: Use considerações de energia e não de torque.) (c) Para que ângulo θ a aceleração tangencial é igual a g ? ~~■■■~~

Problemas Adicionais

- 68** George Washington Gale Ferris, Jr., um engenheiro civil formado pelo Instituto Politécnico Rensselaer, construiu a primeira roda-gigante para a Exposição Mundial Colombiana de 1893, em Chicago. A roda, uma impressionante obra de engenharia para a época, movimentava 36 cabanas de madeira, cada uma com capacidade para 60 passageiros, ao longo de uma circunferência de 76 m de diâmetro. Seis cabanas eram carregadas de cada vez, e quando as 36 cabanas estavam ocupadas a roda executava uma revolução completa, com velocidade angular constante, em cerca de 2 min. Estime o trabalho necessário para a máquina fazer girar apenas os passageiros. ~~■■■~~

- 69** Na Fig. 10-49, dois blocos de 6,20 kg estão ligados por uma corda de massa desprezível que passa por uma polia de 2,40 cm de raio e momento de inércia $7,40 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. A corda não escorrega na polia; não se sabe se existe atrito entre a mesa e o bloco que escorrega; não há atrito no eixo da polia. Quando este sistema é liberado a partir do repouso, a polia gira de $1,30 \text{ rad}$ em $91,0 \text{ ms}$ e a aceleração dos blocos é

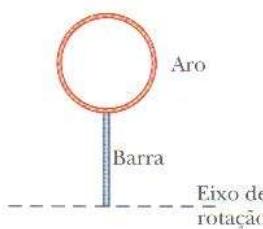


FIG. 10-47 Problema 65.

constante. Determine (a) o módulo da aceleração angular da polia, (b) o módulo da aceleração de cada bloco, (c) a tensão T_1 da corda e (d) a tensão T_2 da corda.

- 70** A Fig. 10-50 mostra um objeto plano formado por dois anéis circulares que têm um centro comum e são mantidos fixos por três barras de massa desprezível. O objeto, que está inicialmente em repouso, pode girar (como um carrossel) em torno do centro comum, onde se encontra outra barra de massa desprezível. As massas, raios internos e raios externos dos anéis aparecem na tabela a seguir. Uma força tangencial de módulo $12,0 \text{ N}$ é aplicada à borda externa do anel externo por $0,300 \text{ s}$. Qual é a variação na velocidade angular do objeto neste intervalo de tempo?

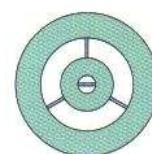


FIG. 10-50
Problema 70.

Anel	Massa (kg)	Raio Interno (m)	Raio Externo (m)
1	0,120	0,0160	0,0450
2	0,240	0,0900	0,1400

- 71** Na Fig. 10-51, um pequeno disco de raio $r = 2,00 \text{ cm}$ foi colado na borda de um disco maior de raio $R = 4,00 \text{ cm}$, de modo que os discos estão no mesmo plano. Os discos podem girar em torno de um eixo perpendicular que passa pelo ponto O , situado no centro do disco maior. Os discos têm uma massa específica (massa por unidade de volume) uniforme de $1,40 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e uma espessura, também uniforme, de $5,00 \text{ mm}$. Qual é o momento de inércia do conjunto dos dois discos em relação ao eixo de rotação que passa por O ?

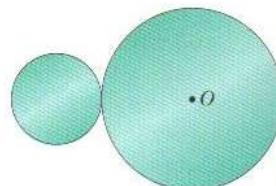


FIG. 10-51 Problema 71.

- 72** Às 7 h 14 min de 30 de junho de 1908 uma enorme explosão aconteceu na atmosfera sobre a Sibéria Central, na latitude 61° N e longitude 102° E ; a bola de fogo criada por essa explosão foi o objeto mais brilhante visto na Terra antes das armas nucleares. O chamado *Evento de Tunguska*, que de acordo com uma testemunha “cobriu uma parte enorme do céu”, foi provavelmente a explosão de um *asteróide rochoso* de aproximadamente 140 m de largura. (a) Considerando apenas a rotação da Terra, determine quanto tempo depois o asteróide deveria ter chegado à Terra para explodir acima de Helsinque, na longitude 25° E , destruindo totalmente a cidade. (b) Se o asteróide fosse *metálico*, poderia ter chegado à superfície da Terra. Quanto tempo depois o asteróide deveria ter chegado à Terra para que o choque ocorresse no oceano Atlântico, na longitude 20° W ? (O tsunami resultante teria destruído cidades costeiras dos dois lados do Atlântico.) ~~■■■~~

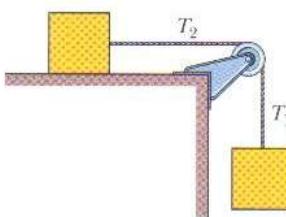


FIG. 10-49 Problema 69.

- 73** Na Fig. 10-45, dois blocos, de massas $m_1 = 400 \text{ g}$ e $m_2 = 600 \text{ g}$, estão ligados por uma corda de massa desprezível que está enrolada na borda de um disco uniforme de massa $M = 500 \text{ g}$ e raio $R = 12,0 \text{ cm}$. O disco pode girar sem atrito em torno de um eixo horizontal que passa pelo seu centro; a corda não desliza na borda do disco. O sistema é liberado a partir do repouso. Determine (a) o módulo da aceleração dos blocos, (b) a tensão T_1 da corda da esquerda e (c) a tensão T_2 da corda da direita.

- 74** Nas duas extremidades de uma fina barra de aço com 1,20 m de comprimento e 6,40 kg de massa existem pequenas bolas de massa 1,06 kg. A barra pode girar em um plano horizontal em torno de um eixo vertical que passa pelo seu ponto médio. Em

um certo instante ela está girando a 39,0 rev/s. Devido ao atrito ela desacelera até parar, 32,0 s depois. Supondo que o torque produzido pelo atrito é constante, calcule (a) a aceleração angular, (b) o torque produzido pelo atrito, (c) a energia transformada de energia mecânica em energia térmica pelo atrito e (d) o número de revoluções executadas pela barra até parar. (e) Suponha que o torque produzido pelo atrito não é constante. Se alguma das grandezas calculadas nos itens (a), (b), (c) e (d) ainda puder ser calculada sem qualquer informação adicional, forneça o seu valor.

75 Uma pá do rotor de um helicóptero tem 7,80 m de comprimento, uma massa de 110 kg e está presa ao eixo do rotor por um único parafuso. (a) Qual é o módulo da força exercida pelo eixo sobre o parafuso quando o rotor está girando a 320 rev/min? (Sugestão: Para este cálculo, a pá pode ser considerada uma massa pontual no centro de massa. Por quê?) (b) Calcule o torque que deve ser aplicado ao rotor para que ele atinja essa velocidade angular, a partir do repouso, em 6,70 s. Ignore a resistência do ar. (A lâmina não pode ser considerada uma massa pontual para este cálculo. Por quê? Suponha que a distribuição de massa é a de uma barra fina uniforme.) (c) Qual é o trabalho realizado pelo torque sobre a pá para que ela atinja a velocidade angular de 320 rev/min?

76 Uma roda, partindo do repouso, gira com uma aceleração angular constante de $2,00 \text{ rad/s}^2$. Durante um certo intervalo de 3,00 s ela descreve um ângulo de 90,0 rad. (a) Qual era a velocidade angular da roda no início do intervalo de 3,00 s? (b) Por quanto tempo a roda girou antes do início do intervalo de 3,00 s?

77 Uma bola de golfe é lançada com um ângulo de 20° em relação à horizontal, uma velocidade de 60 m/s e uma velocidade angular de 90 rad/s. Desprezando a resistência do ar, determine o número de revoluções que a bola executa até o instante em que atinge a altura máxima.

78 Duas esferas uniformes maciças têm a mesma massa de 1,65 kg, mas uma tem um raio de 0,226 m e a outra um raio de 0,854 m. Ambas podem girar em torno de um eixo que passa pelo centro. (a) Qual é o módulo τ do torque necessário para levar a esfera menor do repouso a uma velocidade angular de 317 rad/s em 15,5 s? (b) Qual é o módulo F da força que deve ser aplicada tangencialmente ao equador da esfera para produzir esse torque? Quais são os valores correspondentes de (c) τ e (d) F para a esfera maior?

79 A barra fina e uniforme na Fig. 10-52 tem 2,0 m de comprimento e pode girar, sem atrito, em torno de um pino horizontal que passa por uma das extremidades. Ela é libertada a partir do repouso quando faz um ângulo $\theta = 40^\circ$ acima da horizontal. Use a lei de conservação da energia para determinar a velocidade angular da barra ao passar pela posição horizontal.

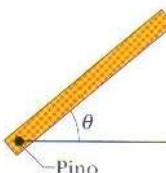


FIG. 10-52
Problema 79.

80 O volante de um motor está girando a 25,0 rad/s. Quando o motor é desligado o volante desacelera a uma taxa constante e pára em 20,0 s. Calcule (a) a aceleração angular do volante, (b) o ângulo descrito pelo volante até parar e (c) o número de revoluções realizadas pelo volante até parar.

81 Uma pequena bola com uma massa de 1,30 kg está montada em uma das extremidades de uma barra de 0,780 m de comprimento e massa desprezível. O sistema gira em um círculo horizontal em torno da outra extremidade da barra a 5010 rev/min. (a) Calcule o momento de inércia do sistema em relação ao

eixo de rotação. (b) Existe uma força de arrasto de $2,30 \times 10^{-2}$ N agindo sobre a bola, no sentido oposto ao de seu movimento. Que torque deve ser aplicado ao sistema para mantê-lo em rotação com velocidade constante?

82 Partindo do repouso em $t = 0$, uma roda gira com aceleração angular constante. Quando $t = 2,0$ s, a velocidade angular da roda é de 5,0 rad/s. A aceleração continua até $t = 20$ s, quando cessa abruptamente. De que ângulo gira a roda no intervalo de $t = 0$ a $t = 40$ s?

83 Um equilibrista procura manter sempre o seu centro de massa acima do arame (ou corda). Para isso, ele carrega muitas vezes uma vara comprida. Quando se inclina, digamos, para a direita (deslocando o centro de massa para a direita) e corre o risco de rodar em torno do arame, desloca a vara para a esquerda (deslocando o centro de massa para a esquerda) para diminuir a velocidade de rotação e ter tempo de recuperar o equilíbrio. Suponha que o equilibrista tem uma massa de 70,0 kg e um momento de inércia de $15,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao arame. Qual é o módulo da aceleração angular em relação ao arame se o seu centro de massa está 5,0 cm à direita do arame e (a) ele não carrega uma vara e (b) a vara de 14,0 kg que carrega é deslocada de tal forma que seu centro de massa fica 10 cm à esquerda do arame?

84 *Corrida de discos.* A Fig. 10-53 mostra dois discos que podem girar em torno do centro como carrosséis. No instante $t = 0$ as retas de referência dos dois discos têm a mesma orientação. O disco A já está em girando com uma velocidade angular constante de 9,5 rad/s. O disco B parte do repouso com uma aceleração angular constante de $2,2 \text{ rad/s}^2$. (a) Em que instante t as duas retas de referência têm o mesmo deslocamento angular θ ? (b) Este é o primeiro instante t , desde $t = 0$, no qual as duas retas de referência estão alinhadas?

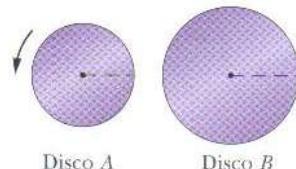


FIG. 10-53 Problema 84.

85 Um ciclista de 70 kg apóia toda a sua massa em cada movimento do pedal para baixo enquanto pedala em uma estrada íngreme. Suponha que o diâmetro da circunferência descrita pelo pedal é de 0,40 m e determine o módulo do torque máximo exercido pelo ciclista em relação ao eixo de rotação dos pedais.

86 Um disco gira, com aceleração angular constante, da posição angular $\theta_1 = 10,0 \text{ rad}$ até a posição angular $\theta_2 = 70,0 \text{ rad}$ em 6,00 s. A velocidade angular em θ_2 é de 15,0 rad/s. (a) Qual era a velocidade angular em θ_1 ? (b) Qual é a aceleração angular? (c) Em que posição angular o disco estava inicialmente em repouso? (d) Plote θ em função de t e a velocidade angular ω do disco em função de t , a partir do início do movimento ($t = 0$).

87 Uma roda de 0,20 m de raio está montada em um eixo horizontal sem atrito. O momento de inércia da roda em relação ao eixo é $0,050 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Uma corda de massa desprezível está enrolada na roda e presa a um bloco de 2,0 kg que escorrega em uma superfície horizontal sem atrito. Se uma força horizontal de módulo $P = 3,0 \text{ N}$ é aplicada ao bloco, como mostra a Fig. 10-54, qual é o módulo da aceleração angular da roda? Suponha que a corda não desliza em relação à roda.

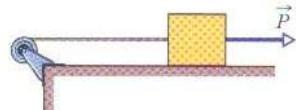


FIG. 10-54 Problema 87.

88 Nossa Sol está a $2,3 \times 10^4$ anos-luz do centro da Via Láctea e descreve uma circunferência em torno desse centro a uma ve-

locidade de 250 km/s. (a) Quanto tempo leva para o Sol executar uma revolução em torno do centro da galáxia? (b) Quantas revoluções o Sol completou desde que se formou, há cerca de $4,5 \times 10^9$ anos?

89 Um prato de toca-discos, que está girando a 33 1/3 rev/min, diminui gradualmente de velocidade e pára 30 s depois que o motor é desligado. (a) Determine a aceleração angular do prato (suposta constante) em revoluções por minuto ao quadrado. (b) Quantas revoluções o prato executa até parar?

90 Um corpo rígido é formado por três barras finas de comprimento $L = 0,600$ m, unidas na forma de uma letra H (Fig. 10-55). O corpo pode girar livremente em torno de um eixo horizontal que coincide com uma das pernas do H. O corpo é liberado a partir do repouso em uma posição na qual o plano do H está na horizontal. Qual é a velocidade angular do corpo quando o plano do H está na vertical?

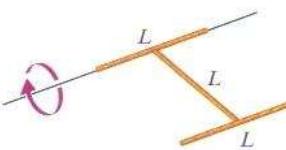


FIG. 10-55 Problema 90.

91 (a) Mostre que o momento de inércia de um cilindro maciço de massa M e raio R em relação ao eixo central é igual ao momento de inércia de um aro fino de massa M e raio $R/\sqrt{2}$ em relação ao eixo central. (b) Mostre que o momento de inércia I de um corpo qualquer de massa M em relação a qualquer eixo é igual ao momento de inércia de um *aro equivalente* em torno do mesmo eixo, se o aro tiver a mesma massa M e um raio k dado por

$$k = \sqrt{\frac{I}{M}}.$$

O raio k do aro equivalente é chamado de *raio de giração* do corpo.

92 Uma casca esférica fina tem um raio de 1,90 m. Um torque aplicado de 960 N · m produz na casca uma aceleração angular de $6,20 \text{ rad/s}^2$ em relação a um eixo que passa pelo seu centro. Quais são (a) o momento de inércia da casca em relação a esse eixo e (b) a massa da casca?

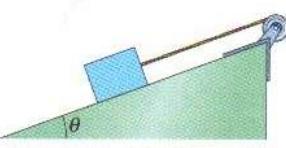


FIG. 10-56 Problema 93.

93 Na Fig. 10-56 uma roda de 0,20 m de raio é montada em um eixo horizontal sem atrito. Uma corda de massa desprezível é enrolada na roda e presa a uma caixa de 2,0 kg que escorrega sobre a superfície sem atrito com uma inclinação $\theta = 20^\circ$ em relação à horizontal. A caixa escorrega para baixo com uma aceleração de $2,0 \text{ m/s}^2$. Qual é o momento de inércia da roda em relação ao eixo?

94 Até hoje se discute de que forma os pesados lintéis (blocos horizontais de pedra) foram colocados sobre blocos verticais em Stonehenge. Um possível método foi testado em uma pequena cidade tcheca. Um bloco de concreto com uma massa de 5124 kg foi puxado para cima ao longo de duas vigas de carvalho cujas superfícies superiores tinham sido descascadas e lubrificadas com gordura (Fig. 10-57). As vigas tinham 10 m de comprimento e iam do chão até o alto de um dos blocos verticais que serviriam de apoio para o bloco a ser levantado. Os blocos verticais tinham 3,9 m de altura; o coeficiente de atrito estático entre o bloco e as vigas era 0,22. O bloco foi puxado por cordas enroladas no bloco, que passavam pela extremidade superior de duas toras de abeto de 4,5 m de comprimento. Uma plataforma foi instalada na extremidade oposta de cada tora. Quando um número suficiente de operários subia na plataforma, a tora corres-

pondente girava em torno de um apoio no alto da pedra vertical em que se apoiava e puxava uma extremidade do bloco por uma pequena distância ao longo da viga. Para cada tora, a corda que envolvia o bloco era aproximadamente perpendicular à tora; a distância entre o ponto de apoio e o ponto em que a corda estava amarrada na tora era de 0,70 m. Supondo que cada operário tinha uma massa de 85 kg, determine o menor número de operários que deviam se posicionar sobre as duas plataformas para que o bloco começasse a se mover para cima ao longo das traves. (Na realidade, metade deste número de operários poderia deslocar o bloco, movendo primeiro uma das extremidades e depois a outra.)

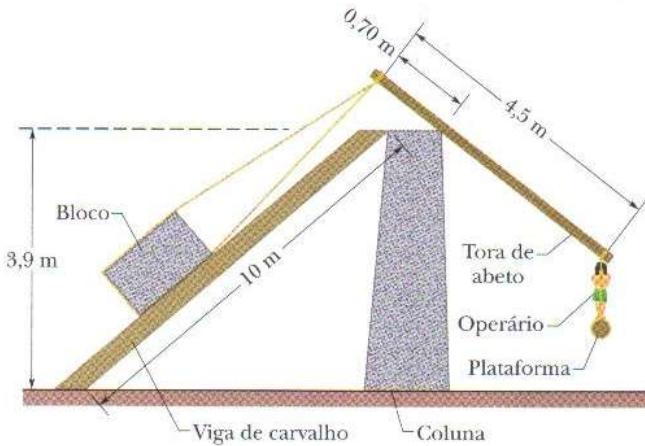


FIG. 10-57 Problema 94.

95 A Fig. 10-58 mostra uma pás de hélice que gira a 2000 rev/min em torno de um eixo perpendicular que passa pelo ponto B . O ponto A está na extremidade externa da pás, a uma distância radial de 1,50 m. (a) Qual é a diferença entre os módulos da aceleração centrípeta α do ponto A e de um ponto situado a 0,150 m do eixo? (b) Determine a inclinação do gráfico de α em função da distância radial ao longo da pás.



FIG. 10-58 Problema 95.

96 Um mecanismo em forma de ióio, montado em um eixo horizontal sem atrito, é usado para levantar uma caixa de 30 kg, como mostra a Fig. 10-59. O raio externo R da roda é 0,50 m e o raio r do cubo da roda é 0,20 m. Quando uma força horizontal F constante de módulo igual a 140 N é aplicada a uma corda enrolada na roda a caixa, que está pendurada por uma corda enrolada no cubo, tem uma aceleração para cima de módulo igual a $0,80 \text{ m/s}^2$. Qual é o momento de inércia do mecanismo em relação ao eixo de rotação?

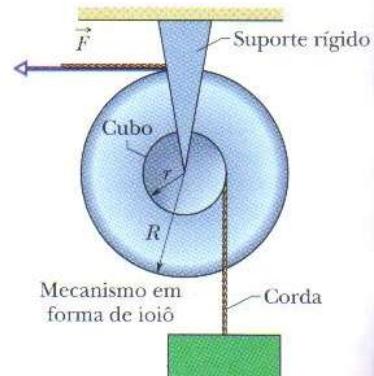


FIG. 10-59 Problema 96.

97 O corpo rígido mostrado na Fig. 10-60 é formado por três partículas ligadas por barras de massa desprezível. Ele gira em torno de um eixo perpendicular ao seu plano passando pelo

ponto P . Se $M = 0,40 \text{ kg}$, $a = 30 \text{ cm}$ e $b = 50 \text{ cm}$, qual é o trabalho necessário para levar o corpo do repouso até a velocidade angular de $5,0 \text{ rad/s}$?

98 Engenharia de embalagens. A tampa com um anel de puxar foi um grande avanço na engenharia das latas de bebida. O anel gira em torno de um pino central situado na tampa da lata. Quando um dos lados do anel é puxado para cima, o outro lado empurra para baixo uma parte da tampa que foi riscada. Se você puxa para cima com uma força de 10 N , qual é, aproximadamente, o módulo da força aplicada à parte riscada da tampa? (Você terá que examinar uma lata desse tipo para resolver o problema.)

99 Existem relatos de guepardos correndo à velocidade impressionante de 114 km/h , feitos por observadores que dirigiam ao lado desses animais. Imagine o que é tentar medir a velocidade de um guepardo mantendo seu veículo emparelhado com o animal e ao mesmo tempo olhando de relance para um velocímetro que registra 114 km/h . Você conserva o veículo a uma distância constante de $8,0 \text{ m}$ do guepardo, mas o barulho do motor faz com que o guepardo se afaste continuamente ao longo de uma trajetória circular com 92 m de raio. Assim, você é forçado a seguir uma trajetória circular com 100 m de raio. (a) Qual é a velocidade angular (sua e do guepardo) ao longo das trajetórias circulares? (b) Qual é a velocidade linear do guepardo? (Se você não levasse em consideração o movimento circular, concluiria erroneamente que a velocidade do guepardo era 114 km/h . Aparentemente, este tipo de erro foi cometido nos relatos publicados.)

100 Um ponto na borda de um rebolo com $0,75 \text{ m}$ de diâmetro muda de velocidade, a uma taxa constante, de 12 m/s para 25 m/s em $6,2 \text{ s}$. Qual é a aceleração angular média do rebolo?

101 Na Fig. 10-61, uma barra fina e uniforme (com $4,0 \text{ m}$ de comprimento e uma massa de $3,0 \text{ kg}$) gira livremente em torno de um eixo horizontal A que é perpendicular à barra e passa por um ponto situado a uma distância $d = 1,0 \text{ m}$ da extremidade da barra. A energia cinética da barra ao passar pela posição vertical é 20 J . (a) Qual é o momento de inércia da barra em relação ao eixo A ? (b) Qual é a velocidade (linear) da extremidade B da barra ao passar pela posição vertical? (c) Em que ângulo θ a barra pára momentaneamente?

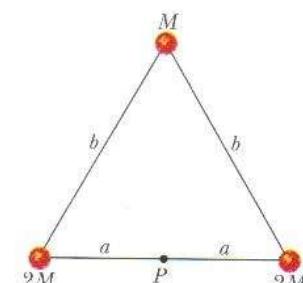


FIG. 10-60 Problema 97.

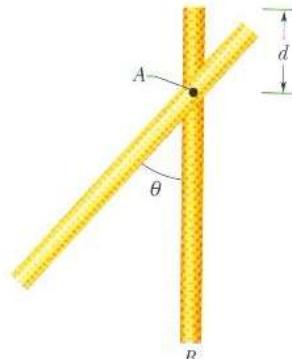


FIG. 10-61 Problema 101.

102 Um carro parte do repouso e se move ao longo de uma pista circular com $30,0 \text{ m}$ de raio. Sua velocidade aumenta a uma taxa constante de $0,500 \text{ m/s}^2$. (a) Qual é o módulo de sua aceleração linear média $15,0 \text{ s}$ mais tarde? (b) Que ângulo o vetor aceleração média faz com a velocidade do carro nesse instante?

103 Uma polia com $8,0 \text{ cm}$ de diâmetro tem uma corda de $5,6 \text{ m}$ de comprimento enrolada na borda. Partindo do repouso, a roldana recebe uma aceleração angular constante de $1,5 \text{ rad/s}^2$. (a) Que ângulo a roldana deve descrever para que a corda desenrole totalmente? (b) Quanto tempo isso leva para acontecer?

104 Um volante que gira em torno do eixo central está perdendo velocidade por causa do atrito com o eixo. Após o primeiro minuto de desaceleração sua velocidade angular é $0,900$ vez a velocidade angular inicial de 250 rev/min . Supondo que a aceleração angular é constante, determine a velocidade angular após o segundo minuto.

105 A Fig. 10-62 mostra um satélite de comunicações, que é um cilindro maciço de 1210 kg com $1,21 \text{ m}$ de diâmetro e $1,75 \text{ m}$ de comprimento. Antes do lançamento a partir do compartimento de carga do ônibus espacial, o satélite é posto para girar a $1,52 \text{ rev/s}$ em torno do eixo longitudinal. Quais são (a) seu momento de inércia em relação ao eixo de rotação e (b) sua energia cinética de rotação?

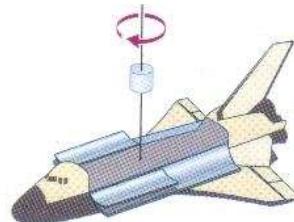


FIG. 10-62 Problema 105.

106 Um disco de vinil gira a $33\frac{1}{3} \text{ rev/min}$ no prato de um toca-discos. (a) Qual é a sua velocidade angular em radianos por segundo? Qual é a velocidade linear em um ponto do disco (b) a 15 cm e (c) a $7,4 \text{ cm}$ do centro do disco?

107 Qual é a velocidade angular de um carro que faz uma curva circular com 110 m de raio a 50 km/h ?

108 Calcule (a) o torque, (b) a energia e (c) a potência média necessária para acelerar a Terra em 1 dia desde o repouso até sua velocidade angular atual em relação ao eixo de rotação.

109 A molécula de oxigênio (O_2) tem uma massa de $5,30 \times 10^{-26} \text{ kg}$ e um momento de inércia de $1,94 \times 10^{-46} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação a um eixo que passa pelo ponto médio da reta que liga os dois átomos e é perpendicular a essa reta. Suponha que o centro de massa de uma molécula de O_2 em um gás tenha uma velocidade de translação de 500 m/s e que a molécula tenha uma energia cinética de rotação igual a $2/3$ da energia cinética de translação do centro de massa. Qual é, nesse caso, a velocidade angular da molécula em relação ao centro de massa?

110 O corpo rígido da Fig. 10-63 é formado por três bolas e três barras de ligação, com $M = 1,6 \text{ kg}$, $L = 0,60 \text{ m}$ e $\theta = 30^\circ$. As bolas podem ser tratadas como partículas e as barras têm massa desprezível. Determine a energia cinética de rotação do corpo se sua velocidade angular é de $1,2 \text{ rad/s}$ em relação (a) a um eixo que passa pelo ponto P e é perpendicular ao plano do papel, e (b) a um eixo que passa pelo ponto P , é perpendicular à barra de comprimento $2L$ e está no plano do papel.

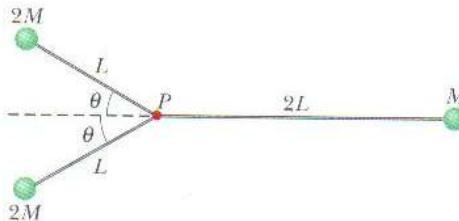


FIG. 10-63 Problema 110.

111 Na Fig. 10-64, quatro polias estão ligadas por duas correias. A polia A (de 15 cm de raio) é a polia motriz e gira a 10 rad/s . A polia B (de 10 cm de raio) está ligada à polia A pela correia 1. A polia B' (de 5 cm de raio) é concêntrica com a polia B e está rigidamente ligada a ela. A polia C (de 25 cm de raio) está ligada à polia B' pela correia 2. Calcule (a) a velocidade linear de um ponto da correia 1, (b) a velocidade angular da polia B , (c) a ve-

locidade angular da polia B' , (d) a velocidade linear de um ponto da correia 2 e (e) a velocidade angular da polia C . (Sugestão: Se a correia entre duas polias não desliza, as velocidades lineares nas bordas das duas polias são iguais.)

112 Quatro partículas, todas de massa 0,20 kg, ocupam os vértices de um quadrado com 0,50 m de lado. As partículas estão ligadas por barras de massa desprezível. Este corpo rígido pode girar em um plano vertical em torno de um eixo horizontal A que passa por uma das partículas. O corpo é liberado a partir do repouso com a barra AB na horizontal, como mostra a Fig. 10-65. (a) Qual é o momento de inércia do corpo em relação ao eixo A ? (b) Qual é a velocidade angular do corpo em relação ao eixo A no instante em que a barra AB passa pela posição vertical?

113 O prato de um toca-discos tem uma velocidade angular de 8,0 rad/s no instante em que o aparelho é desligado. Três segundos depois o prato tem uma velocidade angular de 2,6 rad/s. De quantos radianos o prato gira desde o instante em que o aparelho é desligado até o instante em que pára? (Suponha que α é constante.)

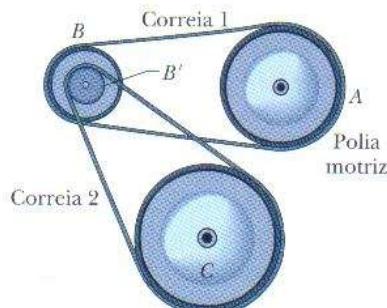


FIG. 10-64 Problema 111.



FIG. 10-65
Problema 112.

114 Duas barras finas (ambas de massa 0,20 kg) estão unidas para formar um corpo rígido, como mostra a Fig. 10-66. Uma das barras tem comprimento $L_1 = 0,40$ m e a outra tem comprimento $L_2 = 0,50$ m. Qual é o momento de inércia desse corpo rígido em relação (a) a um eixo perpendicular ao plano do papel passando pelo centro da barra menor e (b) um eixo perpendicular ao plano do papel passando pelo centro da barra maior?

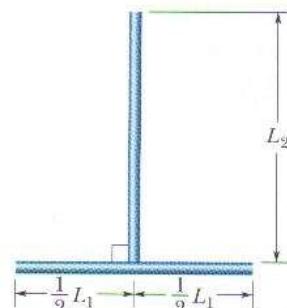


FIG. 10-66 Problema 114.

115 Na Fig. 10-18a, uma roda com 0,20 m de raio está montada em um eixo horizontal sem atrito. O momento de inércia da roda em relação ao é 0,40 kg · m². Uma corda de massa desprezível, enrolada na borda da roda, está presa a uma caixa de 6,0 kg. O sistema é liberado a partir do repouso. Quando a caixa tem uma energia cinética de 6,0 J, quais são (a) a energia cinética de rotação da roda e (b) a distância que a caixa percorreu?

116 Três partículas de 0,50 kg formam um triângulo equilátero de 0,60 m de lado. As partículas estão ligadas por barras de massa desprezível. Qual é o momento de inércia desse corpo rígido em relação (a) a um eixo que passa por uma das partículas e é paralelo à barra que liga as outras duas, (b) um eixo que passa pelo ponto médio de um dos lados e é perpendicular ao plano do triângulo e (c) um eixo que é paralelo a um dos lados do triângulo e passa pelos pontos médios dos outros dois lados?

Momento Angular de uma Partícula O momento angular $\vec{\ell}$ de uma partícula com momento linear \vec{p} , massa m e velocidade linear \vec{v} é uma grandeza vetorial definida em relação a um ponto fixo (em geral a origem) como

$$\vec{\ell} = \vec{r} \times \vec{p} = m(\vec{r} \times \vec{v}). \quad (11-18)$$

O módulo de $\vec{\ell}$ é dado por

$$\ell = rmv \sen \phi \quad (11-19)$$

$$= rp_{\perp} = rmv_{\perp} \quad (11-20)$$

$$= r_{\perp}p = r_{\perp}mv. \quad (11-21)$$

onde ϕ é o ângulo entre \vec{r} e \vec{p} , p_{\perp} e v_{\perp} são as componentes de \vec{p} e \vec{v} perpendiculares a \vec{r} e r_{\perp} é a distância perpendicular entre o ponto fixo e a extensão de \vec{p} . A orientação de $\vec{\ell}$ é dada pela regra da mão direta para produtos vetoriais.

Segunda Lei de Newton para Rotações A segunda lei de Newton para uma partícula pode ser escrita na forma

$$\vec{\tau}_{\text{res}} = \frac{d\vec{\ell}}{dt}, \quad (11-23)$$

onde $\vec{\tau}_{\text{res}}$ é o torque resultante que age sobre a partícula e $\vec{\ell}$ é o momento angular da partícula.

Momento Angular de um Sistema de Partículas O momento angular \vec{L} de um sistema de partículas é a soma vetorial dos momentos angulares das partículas:

$$\vec{L} = \vec{\ell}_1 + \vec{\ell}_2 + \dots + \vec{\ell}_n = \sum_{i=1}^n \vec{\ell}_i. \quad (11-26)$$

A taxa de variação com o tempo deste momento angular é igual ao torque externo resultante que age sobre o sistema (a soma vetorial dos torques produzidos pelas interações das partículas do sistema com partículas externas ao sistema):

$$\vec{\tau}_{\text{res}} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (\text{sistema de partículas}). \quad (11-29)$$

Momento Angular de um Corpo Rígido Para um corpo rígido que gira em torno de um eixo fixo, a componente do momento angular paralela ao eixo de rotação é

$$L = I\omega \quad (\text{corpo rígido, eixo fixo}). \quad (11-31)$$

Conservação do Momento Angular O momento angular \vec{L} de um sistema permanece constante se o torque externo resultante que age sobre o sistema é nulo:

$$\vec{L} = \text{constante} \quad (\text{sistema isolado}) \quad (11-32)$$

$$\text{ou} \quad \vec{L}_i = \vec{L}_f \quad (\text{sistema isolado}). \quad (11-33)$$

Esta é a **lei de conservação do momento angular**.

Precessão de um Giroscópio Um giroscópio pode realizar um movimento de precessão em torno de um eixo vertical que passa pelo seu suporte com uma velocidade angular

$$\Omega = \frac{Mgr}{I\omega}, \quad (11-46)$$

onde M é a massa do giroscópio, r é o braço de alavanca, I é o momento de inércia e ω é a velocidade angular do giroscópio.

PERGUNTAS

- 1 Na Fig. 11-24, três forças de mesmo módulo são aplicadas a uma partícula localizada na origem (\vec{F}_1 é aplicada perpendicularmente ao plano do papel). Ordene as forças de acordo com os módulos dos torques que elas produzem (a) em relação ao ponto P_1 , (b) em relação ao P_2 e (c) em relação ao ponto P_3 , em ordem decrescente.

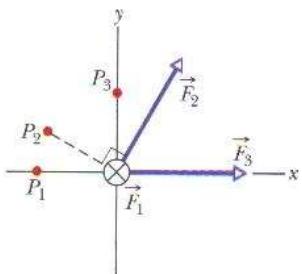


FIG. 11-24 Pergunta 1.

- 4 A Fig. 11-26 mostra duas partículas, A e B , nas coordenadas $(1 \text{ m}, 1 \text{ m}, 0)$ e $(1 \text{ m}, 0, 1 \text{ m})$. Sobre cada partícula agem três forças numeradas, todas de mesmo módulo e cada uma paralela a um dos eixos. (a) Qual das forças produz um torque em relação à origem que é paralelo a y ? (b) Ordene as forças de acordo com o módulo do torque que elas aplicam às partículas em relação à origem, em ordem decrescente.

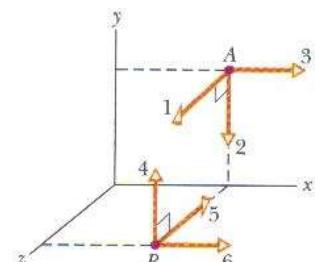


FIG. 11-26 Pergunta 4.

- 5 A Fig. 11-27 mostra três partículas de mesma massa e mesma velocidade escalar constante que se movem nas orientações indicadas pelos vetores velocidade. Os pontos a , b , c e d formam um quadrado, com o ponto e no centro. Ordene os pontos de acordo com o módulo do momento angular resultante do sistema de três partículas em relação aos pontos, em ordem decrescente.

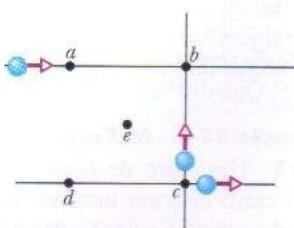


FIG. 11-27 Pergunta 5.

- 6 A Fig. 11-28 mostra uma partícula se movendo com velocidade constante \vec{v} e cinco pontos com suas coordenadas xy ,

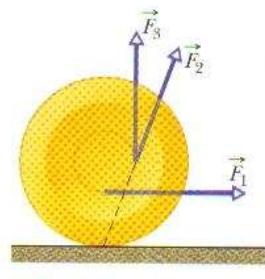


FIG. 11-25 Pergunta 3.

Ordene os pontos de acordo com o módulo do momento angular da partícula em relação a eles, em ordem decrescente.

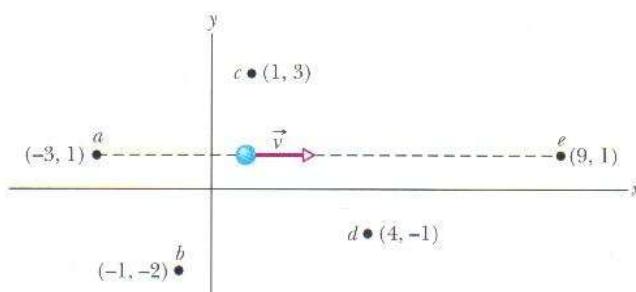


FIG. 11-28 Pergunta 6.

- 7** A Fig. 11-29 mostra o módulo do momento angular L de uma roda em função do tempo t . Ordene os quatro intervalos de tempo, indicados por letras, de acordo com o módulo do torque que age sobre a roda, em ordem decrescente.

- 8** Os momentos angulares $\ell(t)$ de uma partícula em quatro situações são (1) $\ell = 3t + 4$; (2) $\ell = -6t^2$; (3) $\ell = 2$; (4) $\ell = 4/t$. Em que situação o torque resultante que age sobre a partícula é (a) zero, (b) posi-

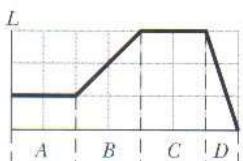


FIG. 11-29

Pergunta 7.

tivo e constante, (c) negativo e com o módulo crescente para $t > 0$ e (d) negativo e com o módulo decrescente para $t > 0$?

- 9** Um besouro-rinoceronte está na borda de um disco horizontal que gira como um carrossel no sentido anti-horário. Se o besouro caminha ao longo da borda no sentido da rotação, os módulos das grandezas a seguir (medidas em relação ao eixo de rotação) aumentam, diminuem ou permanecem os mesmos (com o disco ainda girando no sentido anti-horário): (a) o momento angular do sistema besouro-disco, (b) o momento angular e a velocidade angular do besouro e (c) o momento angular e a velocidade angular do disco? (d) Quais são as respostas se o besouro caminha no sentido oposto ao da rotação?

- 10** A Fig. 11-30 mostra uma vista superior de uma placa retangular que pode girar como um carrossel em torno do centro O . Também são mostradas sete trajetórias ao longo das quais bolinhas de goma de mascar podem ser jogadas (todas com a mesma velocidade escalar e mesma massa) para grudar na placa estacionária. (a) Ordene as trajetórias, em ordem decrescente, de acordo com a velocidade angular que a placa (e a goma de mascar) após a goma grudar. (b) Para que trajetórias o momento angular da placa (e da goma) em relação ao ponto O é negativo do ponto de vista da Fig. 11-30?

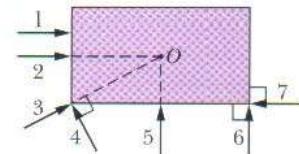


FIG. 11-30 Pergunta 10.

PROBLEMAS

• • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 11-2 O Rolamento como uma Combinação de Translação e Rotação

- 1** Um carro se move a 80,0 km/h em uma estrada plana no sentido positivo de um eixo x . Cada pneu possui um diâmetro de 66 cm. Em relação a uma mulher que viaja no carro e em termos dos vetores unitários, qual é a velocidade \vec{v} (a) no centro, (b) no alto e (c) na base de cada pneu e o módulo a da aceleração (d) no centro, (e) no alto e (f) na base de cada pneu? Em relação a uma pessoa sentada no acostamento da estrada e em termos dos vetores unitários, qual é a velocidade \vec{v} (g) no centro, (h) no alto e (i) na base de cada pneu e o módulo da aceleração a (j) no centro, (k) no alto e (l) na base de cada pneu?

- 2** Um automóvel que se move a 80 km/h possui pneus com 75,0 cm de diâmetro. (a) Qual é a velocidade angular dos pneus em relação aos respectivos eixos? (b) Se o carro é freado com aceleração constante e as rodas descrevem em 30 voltas completas (sem deslizamento), qual é o módulo da aceleração angular das rodas? (c) Que distância o carro percorre durante a frenagem?

seção 11-4 As Forças do Rolamento

- 3** Um carro de 1000 kg tem quatro rodas de 10 kg. Quando o carro está em movimento, que fração da energia cinética total se deve à rotação das rodas em torno dos respectivos eixos? Suponha que as rodas têm o mesmo momento de inércia que discos uniformes da mesma massa e tamanho. Por que não é preciso conhecer o raio das rodas?

- 4** Uma esfera maciça uniforme rola para baixo em um plano inclinado. (a) Qual deve ser o ângulo de inclinação do plano

para que a aceleração linear do centro da esfera tenha um módulo de $0,10g$? (b) Se um bloco sem atrito deslizasse para baixo no mesmo plano inclinado, o módulo da aceleração seria maior, menor ou igual a $0,10g$? Por quê?

- 5** Um aro de 140 kg rola em um piso horizontal de tal forma que seu centro de massa tem uma velocidade de 0,150 m/s. Qual é o trabalho necessário para fazê-lo parar?

- 6** Uma esfera oca, com 0,15 m de raio e momento de inércia $I = 0,040 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação a uma reta que passa pelo centro de massa, rola sem deslizar, subindo uma superfície com uma inclinação de 30° em relação à horizontal. Em uma certa posição inicial a energia cinética total da esfera é 20 J. (a) Quanto desta energia cinética inicial se deve à rotação? (b) Qual é a velocidade do centro de massa da esfera na posição inicial? Após a esfera ter se deslocado 1,0 m ao longo da superfície inclinada a partir da posição inicial, quais são (c) a energia cinética total e (d) a velocidade do centro de massa?

- 7** Na Fig. 11-31 uma força horizontal constante \vec{F}_{ap} de módulo 10 N é aplicada a uma roda de massa 10 kg e raio 0,30 m. A roda rola suavemente na superfície horizontal, e o módulo da aceleração do centro de massa é $0,60 \text{ m/s}^2$. (a) Em termos dos vetores unitários, qual é a força de atrito que age sobre a roda? (b) Qual é o momento de inércia da roda em relação ao eixo de rotação que passa pelo centro de massa?

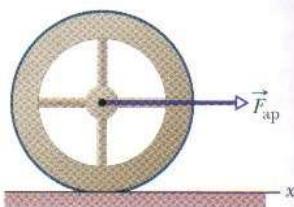


FIG. 11-31 Problema 7.

- 8** Na Fig. 11-32, uma bola macia de latão de massa $0,280\text{ g}$ rola suavemente ao longo do trilho quando é liberada a partir do repouso no trecho retílineo. A parte circular do trilho tem um raio $R = 14,0\text{ cm}$ e a bola tem um raio $r \ll R$. (a) Quanto vale h se a bola está na iminência de perder contato com o trilho quando chega ao ponto mais alto da parte curva do trilho? Se a bola é liberada a uma altura $h = 6,00R$, quais são (b) o módulo e (c) a orientação da componente horizontal da força que age sobre a bola no ponto Q ?

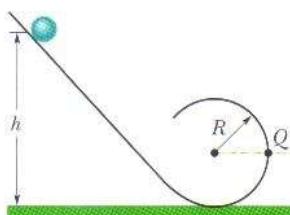


FIG. 11-32 Problema 8.

- 9** Na Fig. 11-33, um cilindro maciço de raio 10 cm e massa 12 kg parte do repouso e rola para baixo uma distância $L = 6,0\text{ m}$, sem deslizar, em um teto inclinado de um ângulo $\theta = 30^\circ$. (a) Qual é a velocidade angular do cilindro em relação ao seu centro ao deixar o teto? (b) A borda do teto está a uma altura $H = 5,0\text{ m}$. A que distância horizontal da borda do teto o cilindro atinge o chão?

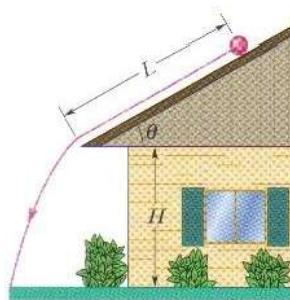


FIG. 11-33 Problema 9.

- 10** A Fig. 11-34 mostra a velocidade escalar v em função do tempo t para um objeto de $0,500\text{ kg}$ e $6,00\text{ cm}$ de raio que rola suavemente para baixo em uma rampa de 30° . A escala do eixo das velocidades é definida por $v_s = 4,0\text{ m/s}$. Qual é o momento de inércia do objeto?

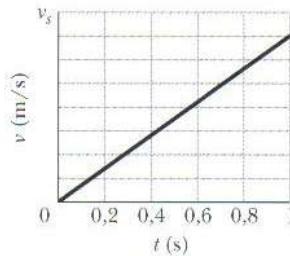


FIG. 11-34 Problema 10.

- 11** Na Fig. 11-35, uma bola macia rola suavemente a partir do repouso (começando na altura $H = 6,0\text{ m}$) até deixar a parte horizontal no fim da pista, a uma altura $h = 2,0\text{ m}$. A que distância horizontal do ponto A a bola toca o chão?

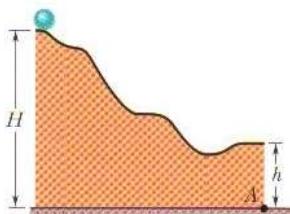


FIG. 11-35 Problema 11.

- 12** A Fig. 11-36 mostra a energia potencial $U(x)$ de uma bola macia que pode rolar ao longo de um eixo x . A escala do eixo U é definida por $U_s = 100\text{ J}$. A bola é uniforme, rola suavemente e possui uma massa de $0,400\text{ kg}$. Ela é liberada em $x = 7,0\text{ m}$ quando se move no sentido negativo do eixo x com uma energia mecânica de 75 J . (a) Se a bola pode chegar ao ponto $x = 0\text{ m}$, qual é sua velocidade nesse ponto, e se não pode, qual é o ponto de retorno? Suponha que a bola esteja se movendo no sentido positivo do eixo x ao ser liberada em $x = 7,0\text{ m}$ com 75 J . (b) Se a bola pode chegar ao ponto $x = 13\text{ m}$, qual é sua velocidade nesse ponto e se não pode, qual é o ponto de retorno?

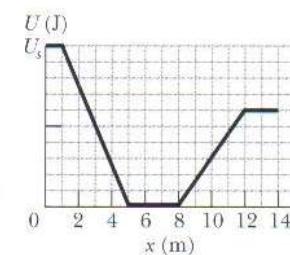


FIG. 11-36 Problema 12.

- 13** Um jogador de boliche arremessa uma bola de raio $R = 11\text{ cm}$ ao longo de uma pista. A bola (Fig. 11-37) desliza so-

bre a pista com velocidade inicial $v_{CM,0} = 8,5\text{ m/s}$ e velocidade angular inicial $\omega_0 = 0$. O coeficiente de atrito cinético entre a bola e a pista é $0,21$. A força de atrito cinético f_k que age sobre a bola produz uma aceleração linear e uma aceleração angular. Quando a velocidade v_{CM} diminui o suficiente e a velocidade angular ω aumenta o suficiente, a bola pára de deslizar e passa a rolar suavemente. (a) Qual é valor de v_{CM} em termos de ω nesse instante? Durante o deslizamento, quais são (b) a aceleração linear e (c) a aceleração angular da bola? (d) Por quanto tempo a bola desliza? (e) Que distância a bola desliza? (f) Qual é a velocidade linear da bola quando começa a rolar suavemente?

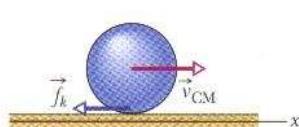


FIG. 11-37 Problema 13.

- 14** Na Fig. 11-38 uma bola pequena, macia e uniforme é lançada do ponto P , rola suavemente em uma superfície horizontal, sobe uma rampa e chega a um platô. Em seguida, deixa o platô horizontalmente para pousar em outra superfície mais abaixada, a uma distância horizontal d da extremidade do platô. As alturas verticais são $h_1 = 5,00\text{ cm}$ e $h_2 = 1,60\text{ cm}$. Com que velocidade a bola deve ser lançada no ponto P para ela pousar em $d = 6,00\text{ cm}$?

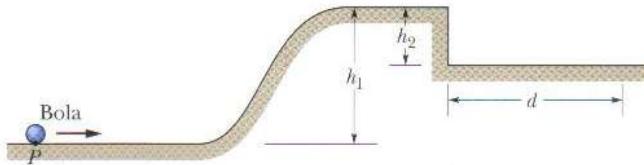


FIG. 11-38 Problema 14.

- 15** *Bola não-uniforme.* Na Fig. 11-39, uma bola de massa M e raio R rola suavemente, a partir do repouso, descendo uma rampa e passando por uma pista circular com $0,48\text{ m}$ de raio. A altura inicial da bola é $h = 0,36\text{ m}$. Na parte mais baixa da curva o módulo da força normal que a pista exerce sobre a bola é $2,00Mg$. A bola é formada por uma casca esférica externa (com uma certa densidade uniforme) e uma esfera central (com uma densidade uniforme diferente). O momento de inércia da bola é dado pela expressão geral $I = \beta MR^2$, mas β não é igual a $0,4$, como no caso de uma bola de densidade uniforme. Determine o valor de β .

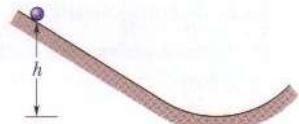


FIG. 11-39 Problema 15.

- 16** *Objeto cilíndrico não-uniforme.* Na Fig. 11-40, um objeto cilíndrico de massa M e raio R rola suavemente descendo uma rampa, a partir do repouso, e passa para um trecho horizontal da pista. Em seguida, rola para fora da pista, pousando a uma distância horizontal $d = 0,506\text{ m}$ da extremidade da pista. A altura inicial do objeto é $H = 0,90\text{ m}$; a extremidade da pista está a uma altura $h = 0,10\text{ m}$. O objeto é composto por uma camada cilíndrica

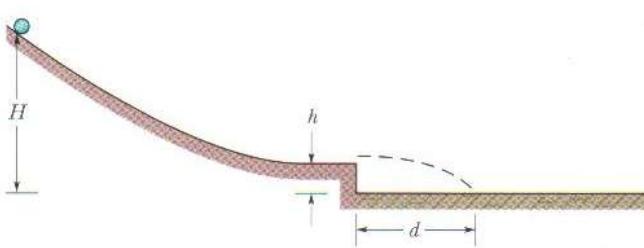


FIG. 11-40 Problema 16.

drica externa (com uma certa densidade uniforme) e um cilindro central (com uma densidade uniforme diferente). O momento de inércia do objeto é dado pela expressão geral $I = \beta MR^2$, mas β não é igual a 0,5, como no caso de um cilindro uniforme. Determine o valor de β .

seção 11-5 O Ioiô

- 17** Um ioiô possui um momento de inércia de $950 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ e uma massa de 120 g. O raio do seu eixo é 3,2 mm e sua corda tem 120 cm de comprimento. O ioiô rola, a partir do repouso, até a extremidade da corda. (a) Qual é o módulo da aceleração linear do ioiô? (b) Quanto tempo ele leva para chegar à extremidade da corda? Ao chegar à extremidade da corda, qual é (c) a velocidade linear, (d) a energia cinética de translação, (e) a energia cinética de rotação e (f) a velocidade angular?

- 18** Em 1980, um grande ioiô foi solto de um guindaste sobre a baía de San Francisco. O ioiô de 116 kg era formado por dois discos uniformes com 32 cm de raio, ligados por um eixo com 3,2 cm de raio. Qual foi o módulo da aceleração do ioiô (a) durante a descida e (b) durante a subida? (c) Qual foi a tensão na corda? (d) A tensão estava próxima do limite de resistência da corda, 52 kN? Suponha que você construa uma versão ampliada do ioiô (mesma forma e mesmos materiais, porém maior). (e) O módulo da aceleração do seu ioiô durante a queda será maior, menor ou igual ao do ioiô de San Francisco? (f) E a tensão na corda?

seção 11-6 Revisão do Torque

- 19** Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em relação à origem a que está submetida uma partícula localizada nas coordenadas $(0, -4,0 \text{ m}, 3,0 \text{ m})$ se esse torque se deve (a) a uma força \vec{F}_1 de componentes $F_{1x} = 2,0 \text{ N}$, $F_{1y} = F_{1z} = 0$ e (b) a uma força \vec{F}_2 de componentes $F_{2x} = 0$, $F_{2y} = 2,0 \text{ N}$, $F_{2z} = 4,0 \text{ N}$?

- 20** Uma ameixa está localizada nas coordenadas $(-2,0 \text{ m}, 0, 4,0 \text{ m})$. Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em relação à origem a que está submetida a ameixa se esse torque se deve a uma força \vec{F} cuja única componente é (a) $F_x = 6,0 \text{ N}$, (b) $F_x = -6,0 \text{ N}$, (c) $F_z = 6,0 \text{ N}$, (d) $F_z = -6,0 \text{ N}$?

- 21** Em termos dos vetores unitários, qual é o torque resultante em relação à origem a que está submetida uma pulga localizada nas coordenadas $(0, -4,0 \text{ m}, 5,0 \text{ m})$ quando as forças $\vec{F}_1 = (3,0 \text{ N})\hat{k}$ e $\vec{F}_2 = (-2,0 \text{ N})\hat{j}$ agem sobre a pulga?

- 22** Em termos dos vetores unitários, qual é o torque em relação à origem a que está submetido um vidro de pimenta localizado nas coordenadas $(3,0 \text{ m}, -2,0 \text{ m}, 4,0 \text{ m})$ devido (a) à força $\vec{F}_1 = (3,0 \text{ N})\hat{i} - (4,0 \text{ N})\hat{j} + (5,0 \text{ N})\hat{k}$, (b) à força $\vec{F}_2 = (-3,0 \text{ N})\hat{i} - (4,0 \text{ N})\hat{j} - (5,0 \text{ N})\hat{k}$ e (c) à soma vetorial de \vec{F}_1 e \vec{F}_2 ? (d) Repita o item (c) para o torque em relação ao ponto de coordenadas $(3,0 \text{ m}, 2,0 \text{ m}, 4,0 \text{ m})$.

- 23** A força $\vec{F} = (-8,0 \text{ N})\hat{i} + (6,0 \text{ N})\hat{j}$ age sobre uma partícula cujo vetor posição é $\vec{r} = (3,0 \text{ m})\hat{i} + (4,0 \text{ m})\hat{j}$. Quais são (a) o torque em relação à origem a que está submetida a partícula, em termos dos vetores unitários, e (b) o ângulo entre \vec{r} e \vec{F} ?

- 24** Uma partícula se move em um sistema de coordenadas xyz sob a ação de uma força. Quando o vetor posição da partícula é $\vec{r} = (2,00 \text{ m})\hat{i} + (3,00 \text{ m})\hat{j} + (2,00 \text{ m})\hat{k}$, a força é $\vec{F} = F_x\hat{i} + (7,00 \text{ N})\hat{j} - (6,00 \text{ N})\hat{k}$ e o torque correspondente em relação à origem é $\vec{\tau} = (4,00 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{i} + (2,00 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{j} - (1,00 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$. Determine F_x .

- 25** A força $\vec{F} = (2,0 \text{ N})\hat{i} - (3,0 \text{ N})\hat{k}$ age sobre uma pedra cujo vetor posição é $\vec{r} = (0,50 \text{ m})\hat{j} - (2,0 \text{ m})\hat{k}$ em relação à origem. Em

termos dos vetores unitários, qual é o torque resultante a que a pedra está submetida (a) em relação à origem e (b) em relação ao ponto $(2,0 \text{ m}, 0, -3,0 \text{ m})$?

seção 11-7 Momento Angular

- 26** Um objeto de 2,0 kg, que se comporta como uma partícula, se move em um plano com componentes de velocidade $v_x = 30 \text{ m/s}$ e $v_y = 60 \text{ m/s}$ ao passar por um ponto de coordenadas $(3,0, -4,0) \text{ m}$. Nesse instante, em termos dos vetores unitários, qual é o momento angular do objeto em relação (a) à origem e (b) ao ponto $(-2,0, -2,0) \text{ m}$?

- 27** No instante da Fig. 11-41, duas partículas se movem em um plano xy . A partícula P_1 possui uma massa de 6,5 kg e uma velocidade $v_1 = 2,2 \text{ m/s}$ e está a uma distância $d_1 = 1,5 \text{ m}$ do ponto O . A partícula P_2 possui uma massa de 3,1 kg e uma velocidade $v_2 = 3,6 \text{ m/s}$ e está a uma distância $d_2 = 2,8 \text{ m}$ do ponto O . Quais são (a) o módulo e (b) a orientação do momento angular resultante das duas partículas em relação ao ponto O ?

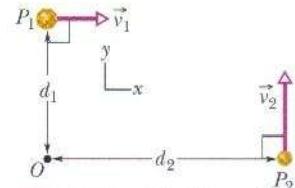


FIG. 11-41 Problema 27.

- 28** No instante da Fig. 11-42, uma partícula P de 2,0 kg possui um vetor posição \vec{r} de módulo $3,0 \text{ m}$ e ângulo $\theta_1 = 45^\circ$ e uma velocidade \vec{v} de módulo $4,0 \text{ m/s}$ e ângulo $\theta_2 = 30^\circ$. A força \vec{F} , de módulo $2,0 \text{ N}$ e ângulo $\theta_3 = 30^\circ$, age sobre P . Os três vetores estão no plano xy . Quais são, em relação à origem, (a) o módulo, (b) a orientação do momento angular de P , (c) o módulo e (d) a orientação do torque que age sobre P ?

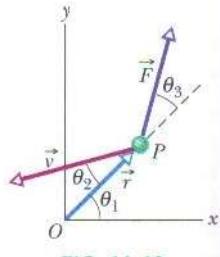


FIG. 11-42 Problema 28.

- 29** Em um certo instante, a força $\vec{F} = 4,0\hat{j} \text{ N}$ age sobre um objeto de 0,25 kg cujo vetor posição é $\vec{r} = (2,0\hat{i} - 2,0\hat{k}) \text{ m}$ e cujo vetor velocidade é $\vec{v} = (-5,0\hat{i} + 5,0\hat{k}) \text{ m/s}$. Em relação à origem e em termos dos vetores unitários, quais são (a) o momento angular do objeto e (b) o torque que age sobre o objeto?

- 30** No instante em que o deslocamento de um objeto de 2,00 kg em relação à origem é $\vec{d} = (2,00 \text{ m})\hat{i} + (4,00 \text{ m})\hat{j} - (3,00 \text{ m})\hat{k}$, sua velocidade é $\vec{v} = -(6,00 \text{ m/s})\hat{i} + (3,00 \text{ m/s})\hat{j} + (3,00 \text{ m/s})\hat{k}$ e ele está sujeito a uma força $\vec{F} = (6,00 \text{ N})\hat{i} - (8,00 \text{ N})\hat{j} + (4,00 \text{ N})\hat{k}$. Determine (a) a aceleração do objeto, (b) o momento angular do objeto em relação à origem, (c) o torque em relação à origem a que está submetido o objeto e (d) o ângulo entre a velocidade do objeto e a força que age sobre ele.

- 31** Na Fig. 11-43, uma bola de 0,400 kg é lançada verticalmente para cima com uma velocidade inicial de $40,0 \text{ m/s}$. Qual é o seu momento angular em relação a P , um ponto a uma distância horizontal de $2,00 \text{ m}$ do ponto de lançamento, quando a bola está (a) na altura máxima e (b) na metade do caminho de volta ao chão? Qual é o torque em relação a P a que a bola é submetida devido à força gravitacional quando está (c) na altura máxima e (d) na metade do caminho de volta ao chão?

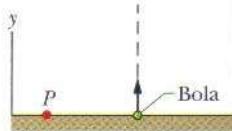


FIG. 11-43 Problema 31.

seção 11-8 Segunda Lei de Newton para Rotações

- 32** Uma partícula se move em um plano xy em torno da origem, no sentido horário, do ponto de vista do lado positivo do

eixo z . Em termos dos vetores unitários, qual é o torque que age sobre a partícula se o módulo do momento angular da partícula em relação à origem é (a) $4,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, (b) $4,0t^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, (c) $4,0\sqrt{t} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ e (d) $4,0/t^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$?

•33 Uma partícula de $3,0 \text{ kg}$ com uma velocidade $\vec{v} = (5,0 \text{ m/s})\hat{i} - (6,0 \text{ m/s})\hat{j}$ está em $x = 3,0 \text{ m}$, $y = 8,0 \text{ m}$. Ela é puxada por uma força de $7,0 \text{ N}$ no sentido negativo do eixo x . Quais são, em relação à origem, (a) o momento angular da partícula, (b) o torque que age sobre a partícula e (c) a taxa com a qual o momento angular está variando?

•34 Uma partícula sofre a ação de dois torques em relação à origem: $\vec{\tau}_1$ tem módulo $2,0 \text{ N} \cdot \text{m}$ e aponta no sentido positivo do eixo x ; $\vec{\tau}_2$ tem módulo $4,0 \text{ N} \cdot \text{m}$ e aponta no sentido negativo do eixo y . Determine $d\ell/dt$, onde ℓ é o momento angular da partícula em relação à origem, em termos dos vetores unitários.

•35 No instante t , $\vec{r} = 4,0t^2\hat{i} - (2,0t + 6,0t^2)\hat{j}$ fornece a posição de uma partícula de $3,0 \text{ kg}$ em relação à origem de um sistema de coordenadas xy (\vec{r} está em metros e t em segundos). (a) Escreva uma expressão para o torque em relação à origem que age sobre a partícula. (b) O módulo do momento angular da partícula em relação à origem está aumentando, diminuindo ou permanece o mesmo?

seção 11-10 Momento Angular de um Corpo Rígido Girando em Torno de um Eixo Fixo

•36 Um disco de polimento, com momento de inércia $1,2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, está preso a uma broca elétrica cujo motor produz um torque de módulo $16 \text{ N} \cdot \text{m}$ em relação ao eixo central do disco. Com o torque aplicado durante 33 ms , qual é o módulo (a) do momento angular e (b) da velocidade angular do disco em relação a esse eixo?

•37 O momento angular de um volante com um momento de inércia de $0,140 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao eixo central diminui de $3,00$ para $0,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ em $1,50 \text{ s}$. (a) Qual é o módulo do torque médio em relação ao eixo central que age sobre o volante durante esse período? (b) Supondo uma aceleração angular constante, de que ângulo o volante gira? (c) Qual é o trabalho realizado sobre o volante? (d) Qual é a potência média do volante?

•38 A Fig. 11-44 mostra três discos uniformes acoplados por correias. Uma correia passa pelas bordas dos discos A e C ; a outra passa por um cubo do disco A e pela borda do disco B . As correias se movem suavemente, sem deslizar nas bordas e no eixo central. O disco A tem raio R e seu cubo tem raio $0,500R$; o disco B tem raio $0,2500R$; o disco C tem raio $2,000R$. Os discos B e C têm a mesma massa específica (massa por unidade de volume) e mesma espessura. Qual é a razão entre o módulo do momento angular do disco C e o módulo do momento angular do disco B ?

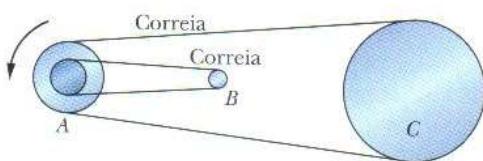


FIG. 11-44 Problema 38.

•39 Na Fig. 11-45, três partículas de massa $m = 23 \text{ g}$ estão presas a três barras de comprimento $d = 12 \text{ cm}$ e massa desprezível. O conjunto gira em torno do ponto O com velocidade angular

$\omega = 0,85 \text{ rad/s}$. Em relação ao ponto O , quais são (a) o momento de inércia do conjunto, (b) o módulo do momento angular da partícula do meio e (c) o módulo do momento angular do conjunto?

••40 A Fig. 11-46 mostra o torque τ que age sobre um disco inicialmente estacionário que pode girar em torno do seu centro como um carrossel em função do tempo. Qual é o momento angular do disco em relação ao eixo de rotação nos instantes (a) $t = 7,0 \text{ s}$ e (b) $t = 20 \text{ s}$?

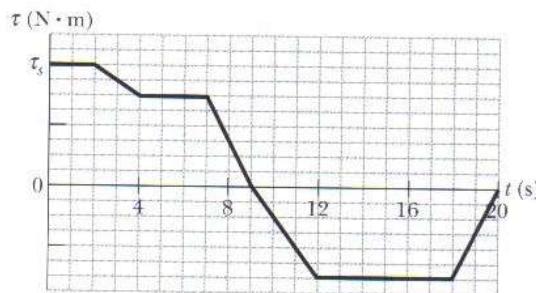


FIG. 11-46 Problema 40.

••41 A Fig. 11-47 mostra uma estrutura rígida formada por um aro de raio R e massa m e um quadrado feito de quatro barras finas de comprimento R e massa m . A estrutura rígida gira com velocidade constante em torno de um eixo vertical, com um período de rotação de $2,5 \text{ s}$. Supondo que $R = 0,50 \text{ m}$ e $m = 2,0 \text{ kg}$, calcule (a) o momento de inércia da estrutura em relação ao eixo de rotação e (b) o momento angular da estrutura em relação ao eixo.

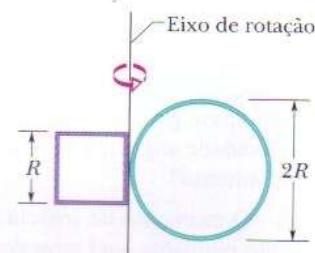


FIG. 11-47 Problema 41.

••42 Um disco com um momento de inércia de $7,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ gira como um carrossel sob o efeito de um torque dado por $\tau = (5,00 + 2,00t) \text{ N} \cdot \text{m}$. No instante $t = 1,00 \text{ s}$, o momento angular do disco é $5,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Qual é o momento angular do disco no instante $t = 3,00 \text{ s}$?

seção 11-11 Conservação do Momento Angular

•43 Um homem está em pé sobre uma plataforma que gira (sem atrito) com uma velocidade angular de $1,2 \text{ rev/s}$; seus braços estão abertos e ele segura um tijolo em cada mão. O momento de inércia do sistema formado por homem, os tijolos e a plataforma em relação ao eixo vertical central da plataforma é de $6,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Se, ao mover os braços, o homem reduz o momento de inércia do sistema para $2,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, determine (a) a nova velocidade angular da plataforma e (b) a razão entre a nova energia cinética do sistema e a energia cinética inicial. (c) De onde vem a energia cinética adicional?

•44 O rotor de um motor elétrico tem um momento de inércia $I_m = 2,0 \times 10^{-33} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao eixo central. O motor é usado para mudar a orientação da sonda espacial no qual está montado. O eixo do motor coincide com o eixo central da sonda; a sonda possui um momento de inércia $I_p = 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação a desse eixo. Calcule o número de revoluções do rotor necessárias para fazer a sonda girar 30° em torno do eixo central.

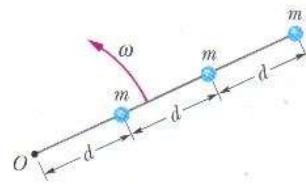


FIG. 11-45 Problema 39.

•45 Uma roda está girando livremente com uma velocidade angular de 800 rev/min em torno de um eixo cujo momento de inércia é desprezível. Uma segunda roda, inicialmente em repouso e com um momento de inércia duas vezes maior que a primeira, é acoplada à mesma haste. (a) Qual é a velocidade angular da combinação resultante do eixo e as duas rodas? (b) Que fração da energia cinética de rotação inicial é perdida?

•46 Uma barata está no centro de um disco circular que gira livremente como um carrossel, sem torques externos. A barata caminha em direção à borda do disco, cujo raio é R . A Fig. 11-48 mostra a velocidade angular ω do sistema barata-disco durante a caminhada. A escala do eixo ω é definida por $\omega_a = 5,0 \text{ rad/s}$ e $\omega_b = 6,0 \text{ rad/s}$. Quando a barata está na borda do disco, qual é a razão entre o momento de inércia do inseto e o momento de inércia do disco, ambos calculados em relação ao eixo de rotação?

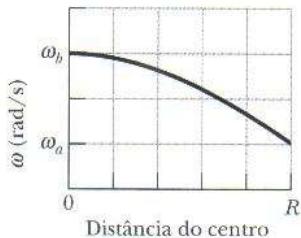


FIG. 11-48 Problema 46.

•47 Dois discos estão montados (como um carrossel) em rolamentos de baixo atrito do mesmo eixo e podem ser acoplados e girar como se fossem um só. O primeiro disco, com um momento de inércia de $3,30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao eixo central, é posto para girar no sentido anti-horário a 450 rev/min. O segundo disco, com um momento de inércia de $6,60 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao eixo central, é posto para girar no sentido anti-horário a 900 rev/min. Em seguida, os discos são acoplados. (a) Qual é a velocidade angular dos discos após o acoplamento? Se, em vez disso, o segundo disco é posto para girar a 900 rev/min no sentido horário, quais são (b) a velocidade angular e (c) o sentido de rotação dos discos após o acoplamento?

•48 O momento de inércia de uma estrela que diminui de tamanho enquanto está girando em torno de si mesma cai para 1/3 do valor inicial. Qual é a razão entre a nova energia cinética de rotação e a energia antiga?

•49 Uma pista é montada em uma grande roda que pode girar livremente, com atrito desprezível, em torno de um eixo vertical (Fig. 11-49). Um trem de brinquedo de massa m é colocado na pista e, com o sistema inicialmente em repouso, a alimentação elétrica do brinquedo é ligada. O trem adquire uma velocidade de $0,15 \text{ m/s}$ em relação à pista. Qual é a velocidade angular da roda se sua massa é $1,1m$ e seu raio é $0,43 \text{ m}$? (Trate a roda como um aro e despreze as massas dos raios e do cubo da roda.)

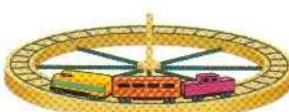


FIG. 11-49 Problema 49.

•50 Uma barata de massa $0,17 \text{ kg}$ corre no sentido anti-horário na borda de um disco circular de raio 15 cm e momento de inércia $5,0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, montado em eixo vertical com atrito desprezível. A velocidade da barata (em relação ao chão) é de $2,0 \text{ m/s}$ e o disco gira no sentido horário com uma velocidade angular $\omega_0 = 2,8 \text{ rad/s}$. A barata encontra uma migalha de pão na borda e, obviamente, pára. (a) Qual é a velocidade angular do disco depois que a barata pára? (b) A energia mecânica é conservada quando a barata pára?

•51 Na Fig. 11-50, duas patinadoras, ambas com uma massa de 50 kg , se aproximam uma da outra ao longo de trajetórias paralelas separadas por $3,0 \text{ m}$. Elas têm velocidades opostas de $1,4 \text{ m/s}$ cada uma. Uma das patinadoras carrega uma vara comprida, de

massa desprezível, segurando-a em uma extremidade, e a outra se agarra à outra extremidade ao passar por ela, o que faz com que as patinadoras passem a descrever uma circunferência em torno do centro da vara. Suponha que o atrito entre as patinadoras e o gelo seja desprezível. Quais são (a) o raio da circunferência, (b) a velocidade angular das patinadoras e (c) a energia cinética do sistema das duas patinadoras? Em seguida, as patinadoras puxam a vara até ficarem separadas por uma distância de $1,0 \text{ m}$. Nesse momento, qual é (d) a velocidade angular das patinadoras e (e) a energia cinética do sistema? (f) De onde vem a energia cinética adicional?

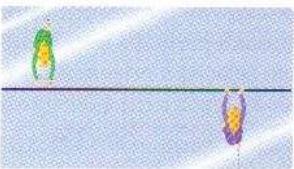


FIG. 11-50 Problema 51.

•52 Uma boleadeira é composta por três esferas pesadas iguais, ligadas a um ponto comum por cordas resistentes de mesmo comprimento (Fig. 11-51a). Para lançar esta arma inventada na América do Sul você segura uma das esferas acima da cabeça e faz a mão girar em torno do pulso para fazer as outras duas esferas girarem em um plano horizontal em torno da mão. Depois de conseguir uma velocidade de rotação suficiente você arremessa a arma em direção ao alvo. Inicialmente a boleadeira gira em torno na esfera que foi mantida fixa, mas em pouco tempo todas as esferas passam a girar em torno do ponto comum das três cordas com velocidade angular ω_f (Fig. 11-51b). (a) Qual é a razão ω_f/ω_i ? (b) Qual é a razão das energias cinéticas de rotação correspondentes, K_f/K_i , no referencial do centro de massa?

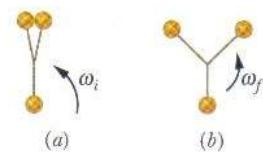


FIG. 11-51 Problema 52.

•53 Um disco de vinil horizontal de massa $0,10 \text{ kg}$ e raio $0,10 \text{ m}$ gira livremente em torno de um eixo vertical que passa pelo centro com uma velocidade angular de $4,7 \text{ rad/s}$. O momento de inércia do disco em relação ao eixo de rotação é $5,0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Um pedaço de massa de modelar de massa $0,020 \text{ kg}$ cai verticalmente e gruda na borda do disco. Qual é a velocidade angular do disco imediatamente após a massa cair?

•54 No salto em distância, um atleta deixa o solo com um momento angular que tende a fazer seu corpo rolar para a frente, o que o faria chegar ao chão na posição errada. O atleta combate esta tendência fazendo girar os braços estendidos para “absorver” o momento angular (Fig. 11-19). Em $0,700 \text{ s}$, um dos braços descreve $0,500 \text{ rev}$ e o outro descreve $1,000 \text{ rev}$. Trate cada braço como uma barra fina de massa $4,0 \text{ kg}$ e comprimento $0,60 \text{ m}$, girando em torno da extremidade. Qual é o módulo do momento angular total dos braços do atleta em relação a um eixo de rotação comum, passando pelos ombros, no referencial do atleta?

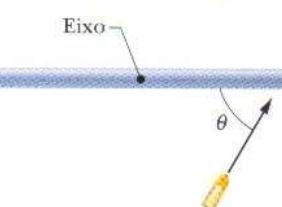


FIG. 11-52 Problema 55.

•55 Uma barra fina uniforme com $0,500 \text{ m}$ de comprimento e massa $4,00 \text{ kg}$ pode girar em um plano horizontal em torno de um eixo vertical passando pelo centro. A barra está em repouso quando uma bala de $3,0 \text{ g}$ é disparada, no plano de rotação, em direção a uma das suas extremidades. Vista de cima, a trajetória da bala faz um ângulo $\theta = 60,0^\circ$ com a haste (Fig. 11-52). Se a bala se aloja na barra e a velocidade angular da barra é 10 rad/s imediatamente após a colisão, qual é a velocidade da bala imediatamente antes do impacto?

••56 Uma barata de massa m está na borda de um disco uniforme de massa $4,00m$ que pode girar livremente em torno do centro como um carrossel. Inicialmente, a barata e o disco giram juntos com uma velocidade angular de $0,260 \text{ rad/s}$. A barata caminha até metade da distância ao centro do disco. (a) Qual é, nesse momento, a velocidade angular do sistema barata-disco? (b) Qual é a razão K/K_0 entre a nova energia cinética do sistema e a sua energia cinética antiga? (c) Por que a energia cinética varia?

••57 A Fig. 11-53 é uma vista de cima de uma barra fina uniforme de comprimento $0,800 \text{ m}$ e massa M girando horizontalmente a $20,0 \text{ rad/s}$ no sentido anti-horário em torno de um eixo que passa pelo centro. Uma partícula de massa $M/3,00$, inicialmente presa a uma extremidade da barra, é liberada e assume uma trajetória que é perpendicular à barra no instante em que a partícula foi liberada. Se a velocidade v_p da partícula é $6,00 \text{ m/s}$ maior que a velocidade da barra imediatamente após a liberação, qual é o valor de v_p ?



FIG. 11-53 Problema 57.

••58 Na Fig. 11-54 uma bala de $1,0 \text{ g}$ é disparada em um bloco de $0,50 \text{ kg}$ preso à extremidade de uma barra não-uniforme de $0,60 \text{ m}$ de comprimento e uma massa de $0,50 \text{ kg}$. O sistema bloco-barra-bala passa a girar no plano do papel, em torno de um eixo fixo que passa por A . O momento de inércia da barra em relação a esse eixo é $0,060 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Trate o bloco como uma partícula. (a) Qual é o momento de inércia do sistema bloco-haste-bala em relação ao eixo que passa pelo ponto A ? (b) Se a velocidade angular do sistema em relação ao eixo que passa por A imediatamente após o impacto é $4,5 \text{ rad/s}$, qual é a velocidade da bala imediatamente antes do impacto?

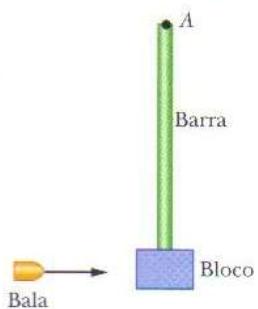


FIG. 11-54 Problema 58.

••59 Um disco uniforme de massa $10m$ e raio $3,0r$ pode girar livremente como um carrossel em torno do centro fixo. Um disco uniforme menor de massa m e raio r está sobre o disco maior, concêntrico com ele. Inicialmente, os dois discos giram juntos com uma velocidade angular de 20 rad/s . Em seguida, uma pequena perturbação faz com que o disco menor deslize para fora em relação ao disco maior, até que a sua borda fique presa na borda do disco maior. Depois disso, os dois discos passam novamente a girar juntos (sem que haja novos deslizamentos). (a) Qual é a velocidade angular final dos sistemas em relação ao centro do disco maior? (b) Qual é a razão K/K_0 entre a nova energia cinética do sistema e a energia cinética inicial?

••60 Uma plataforma horizontal com a forma de um disco circular gira sem atrito em torno de um eixo vertical que passa pelo centro do disco. A plataforma tem uma massa de 150 kg , um raio de $2,0 \text{ m}$ e um momento de inércia de $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao eixo de rotação. Uma estudante de 60 kg caminha lentamente da borda da plataforma em direção ao centro. Se a velocidade angular do sistema é $1,5 \text{ rad/s}$ quando a estudante está na borda, qual é a velocidade angular quando ela está a $0,50 \text{ m}$ de distância do centro?

••61 A barra uniforme (de $0,60 \text{ m}$ de comprimento e $1,0 \text{ kg}$ de massa) da Fig. 11-55 gira no plano do papel em torno de um eixo que passa por uma das extremidades, com um momento de inércia de $0,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Quando a barra passa pela posição mais baixa

colide com um pedaço de massa de modelar de $0,20 \text{ kg}$, que fica grudada na sua extremidade. Se a velocidade angular da barra imediatamente antes da colisão é $2,4 \text{ rad/s}$, qual é a velocidade angular do sistema haste-massa de modelar imediatamente após a colisão?

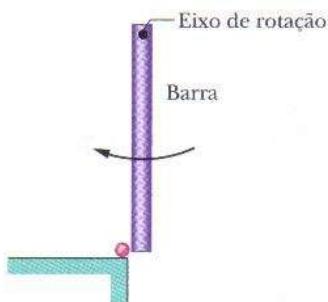


FIG. 11-55 Problema 61.

••62 Uma bailarina começa um tour jeté (Fig. 11-20a) com uma velocidade angular ω_i e um momento angular formado por duas partes: $I_{\text{perna}} = 1,44 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ da perna estendida, que faz um ângulo $\theta = 90,0^\circ$ com o corpo, e $I_{\text{tronco}} = 0,660 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ do resto do corpo (principalmente o tronco). Quando está quase atingindo a altura máxima suas duas pernas fazem uma ângulo $\theta = 30^\circ$ com o corpo e sua velocidade angular é ω_f (Fig. 11-20b). Supondo que I_{tronco} permanece o mesmo, qual é o valor da razão ω_f/ω_i ?

••63 A Fig. 11-56 é uma vista de cima de uma barra fina uniforme de comprimento $0,600 \text{ m}$ e massa M girando horizontalmente a $80,0 \text{ rad/s}$ no sentido anti-horário em torno de um eixo que passa pelo centro. Uma partícula de massa $M/3,00$, que se move horizontalmente com uma velocidade de $40,0 \text{ m/s}$, choca-se com a barra e fica presa. A trajetória da partícula é perpendicular à barra no momento do choque, que ocorre a uma distância d do centro da barra. (a) Para que valor de d a barra e a partícula permanecem em repouso após o choque? (b) Em que sentido a barra e a partícula começam a girar se d é maior que o valor calculado no item (a)?

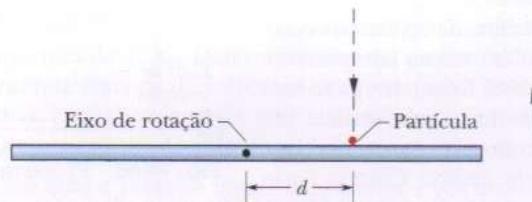


FIG. 11-56 Problema 63.

••64 Durante um salto até seu companheiro de número, um trapezista pretende fazer quatro cambalhotas em um intervalo de tempo $\Delta t = 1,87 \text{ s}$. Durante o primeiro e último quarto de cambalhota ele mantém o corpo esticado como na Fig. 11-57, com um momento de inércia $I_1 = 19,9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ em relação ao centro de

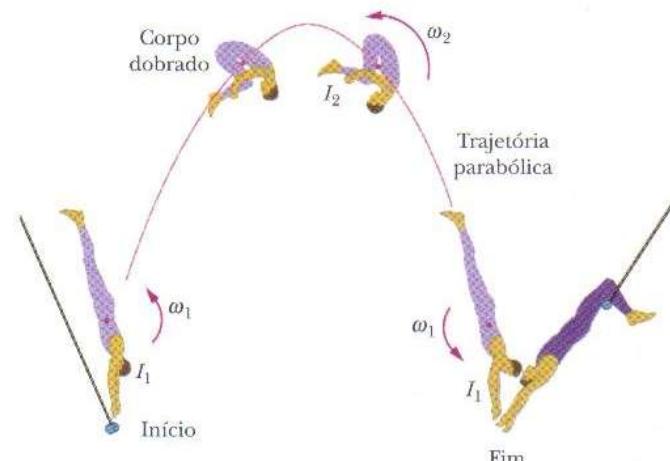


FIG. 11-57 Problema 64.

massa (o ponto da figura). Durante o resto do percurso ele mantém o corpo dobrado, com um momento de inércia $I_2 = 3,93 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Qual deve ser a velocidade angular ω_2 do trapezista quando está com o corpo dobrado?

•••65 Na Fig. 11-58, uma criança de 30 kg está em pé na borda de um carrossel estacionário de massa 100 kg e raio 2,0 m. O momento de inércia do carrossel em relação ao eixo de rotação é 150 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. A criança agarra uma bola de massa 1,0 kg lançada por um colega. Imediatamente antes de a bola ser agarrada ela tem uma velocidade v de módulo 12 m/s, fazendo um ângulo $\phi = 37^\circ$ com uma reta tangente à borda do carrossel, como mostra a figura. Qual é a velocidade angular do carrossel imediatamente após a criança agarrar a bola?

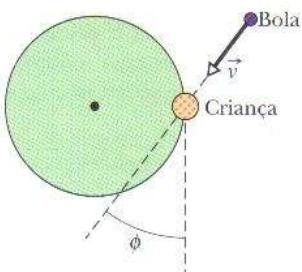


FIG. 11-58 Problema 65.

•••66 Na Fig. 11-59, um pequeno bloco de 50 g desliza para baixo em uma superfície curva sem atrito a partir de uma altura $h = 20 \text{ cm}$ e depois adere a uma barra uniforme de massa 100 g e comprimento 40 cm. A barra gira de um ângulo θ em torno do ponto O antes de parar momentaneamente. Determine θ .

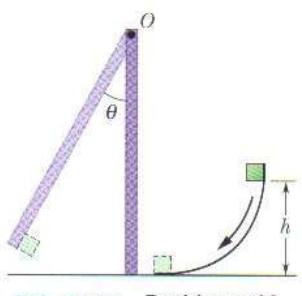


FIG. 11-59 Problema 66.

•••67 Duas bolas de 2,00 kg estão presas às extremidades de uma barra fina de 50,0 cm de comprimento e massa desprezível. A barra está livre para girar sem atrito em um plano vertical em torno de um eixo horizontal que passa pelo centro. Com a haste inicialmente na horizontal (Fig. 11-60), um pedaço de massa de modelar de 50,0 g cai em uma das bolas, atingindo-a com uma velocidade de 3,00 m/s e aderindo a ela. (a) Qual é a velocidade angular do sistema imediatamente após a colisão com a massa de modelar? (b) Qual é a razão entre a energia cinética do sistema após a colisão e a energia cinética do pedaço de massa de modelar imediatamente antes da colisão? (c) De que ângulo o sistema irá girar antes de parar momentaneamente?

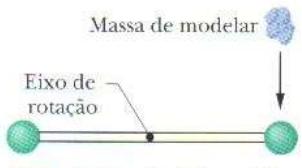


FIG. 11-60 Problema 67.

seção 11-12 Precessão de um Giroscópio

••68 Um pião gira a 30 rev/s em torno de um eixo que faz um ângulo de 30° com a vertical. A massa do pião é 0,50 kg, seu momento de inércia em relação ao eixo central é $5,0 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e seu centro de massa está a 4,0 cm do ponto de apoio. Se a rotação é no sentido horário quando vista de cima, quais são (a) a taxa de precessão e (b) o sentido da precessão quando o pião é visto de cima?

••69 Um certo giroscópio é formado por um disco uniforme com 50 cm de raio montado no centro de um eixo de 11 cm de comprimento e massa desprezível. O eixo está na posição horizontal, apoiado em uma das extremidades. Se o disco está girando em torno do eixo a 1000 rev/min, qual é a taxa de precessão?

Problemas Adicionais

70 Um bloco uniforme de granito na forma de um livro possui faces de 20 cm e 15 cm e 1,2 cm de espessura. A massa específica

(massa por unidade de volume) do granito é $2,64 \text{ g/cm}^3$. O bloco gira em torno de um eixo perpendicular às suas faces localizado a meia distância entre o centro e um dos cantos. Seu momento angular em torno desse eixo é $0,104 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$. Qual é sua energia cinética de rotação em torno desse eixo?

71 A Fig. 11-61 mostra uma vista de cima de um anel que pode girar em torno do centro como um carrossel. O raio externo R_2 é 0,800 m, o raio interno R_1 é $R_2/2,00$, a massa M é 8,00 kg e a massa da cruz no centro é desprezível. Inicialmente, o disco gira com uma velocidade angular de 8,00 rad/s, com um gato de massa $m = M/4,00$ na borda externa, a uma distância R_2 do centro. De quanto o gato aumentará a energia cinética do sistema gato-disco se rastejar até a borda interna, de raio R_1 ?

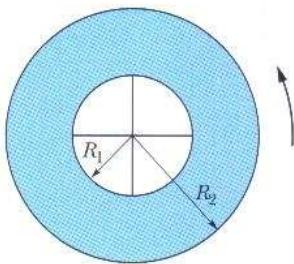


FIG. 11-61 Problema 71.

72 Uma partícula de 2,50 kg que se movendo horizontalmente em um piso com velocidade $(-3,00 \text{ m/s})\hat{j}$ sofre uma colisão perfeitamente inelástica com uma partícula de 4,00 kg que está se movendo horizontalmente no mesmo piso com velocidade $(4,50 \text{ m/s})\hat{i}$. A colisão ocorre nas coordenadas $(-0,500 \text{ m}, -0,100 \text{ m})$. Após a colisão e em termos dos vetores unitários, qual é o momento angular do sistema das duas partículas em relação à origem?

73 Duas partículas de massa $2,90 \times 10^{-4} \text{ kg}$ e velocidade 5,46 m/s se movem em sentidos opostos ao longo de retas paralelas separadas por uma distância de 4,20 cm. (a) Qual é o módulo L do momento angular do sistema das duas partículas em relação ao ponto médio da distância entre as duas retas? (b) O valor de L muda se o ponto em relação ao qual é calculado não está a meia distância entre as retas? Se o sentido de movimento de uma das partículas é invertido, qual é (c) a resposta do item (a) e (d) a resposta do item (b)?

74 Uma barra uniforme gira em um plano horizontal em torno de um eixo vertical que passa por uma das extremidades. A barra tem 6,00 m de comprimento, pesa 10,0 N e gira a 240 rev/min. Calcule (a) o momento de inércia em relação ao eixo de rotação e (b) o módulo do momento angular em torno desse eixo.

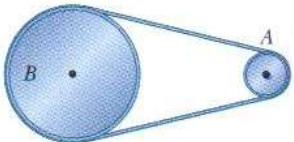


FIG. 11-62 Problema 75.

75 As rodas A e B na Fig. 11-60 são conectadas por uma correia que não desliza. O raio de B é 3,00 vezes maior que o de A . Qual é a razão I_A/I_B entre os momentos de inércia das duas rodas se elas têm (a) o mesmo momento angular em relação aos respectivos eixos centrais e (b) a mesma energia cinética de rotação?

76 No instante $t = 0$, o vetor posição de uma partícula de 2,0 kg em relação à origem é $\vec{r} = (4,0 \text{ m})\hat{i} - (2,0 \text{ m})\hat{j}$. Sua velocidade é dada por $\vec{v} = (-6,0t^2 \text{ m/s})\hat{i}$ para $t \geq 0$ em segundos. Quais são (a) o momento angular \vec{L} da partícula e (b) o torque $\vec{\tau}$ a que a partícula está submetida, ambos em relação à origem, em termos dos vetores unitários e para $t > 0$? Quais são (c) \vec{L} e (d) $\vec{\tau}$ em relação ao ponto $(-2,0 \text{ m}, -3,0 \text{ m}, 0)$ para $t > 0$?

77 Uma roda uniforme de massa 10,0 kg e raio 0,400 m está montada rigidamente em um eixo que passa pelo centro (Fig. 11-63). O raio do eixo é 0,200 m e o momento de inércia do conjunto roda-eixo em relação ao eixo é $0,600 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. A roda está inicial-

mente em repouso no alto de uma superfície que faz um ângulo $\theta = 30,0^\circ$ com a horizontal; o eixo está apoiado na superfície, enquanto a roda penetra em um sulco aberto na superfície, sem tocá-la. Depois de liberado, o eixo rola para baixo, suavemente e sem deslizamento, ao longo da superfície. Depois que o conjunto roda-eixo desce 2,00 m ao longo da superfície, quais são (a) sua energia cinética de rotação e (b) sua energia cinética de translação?

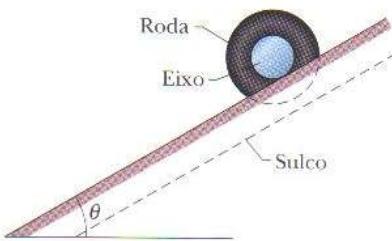


FIG. 11-63 Problema 77.

78 Suponha que o iôô no Problema 17, em vez de rolar a partir do repouso, é arremessado para baixo com uma velocidade inicial de 1,3 m/s. (a) Quanto tempo o iôô leva para chegar à extremidade da corda? Nesse momento, qual é o valor (b) da energia cinética total, (c) da velocidade linear, (d) da energia cinética de translação, (e) da velocidade angular e (f) da energia cinética de rotação?

79 Uma pequena esfera macia com raio 0,25 cm de raio e uma massa de 0,56 g rola sem deslizar no interior de um grande hemisfério fixo com 15 cm de raio e um eixo de simetria vertical. A esfera parte do repouso no alto do hemisfério. (a) Qual é sua energia cinética ao chegar ao fundo do hemisfério? (b) Que fração de sua energia cinética no fundo está associada à rotação em torno de um eixo que passa pelo seu centro de massa? (c) Qual é o módulo da força normal que a esfera exerce sobre o hemisfério no instante em que chega ao fundo?

80 Uma bola macia uniforme rola suavemente em um piso horizontal e depois começa a subir uma rampa com uma inclinação de 15° . A bola pára momentaneamente após ter rolado 1,50 m ao longo da rampa. Qual era sua velocidade inicial?

81 Um corpo de raio R e massa m rola suavemente com velocidade v em uma superfície horizontal e depois sobe uma colina até uma altura máxima h . (a) Se $h = 3v^2/4g$, qual é o momento de inércia do corpo em relação ao eixo de rotação que passa pelo seu centro de massa? (b) Que corpo pode ser este?

82 Uma roda de 0,250 m de raio, que está se movendo inicialmente a 43,0 m/s, rola em 225 m até parar. Calcule o módulo (a) da aceleração linear e (b) da aceleração angular da roda. (c) O momento de inércia da roda em torno do eixo central é 0,155 kg · m². Calcule o módulo do torque em relação ao eixo central devido ao atrito sobre a roda.

83 Se as calotas polares de gelo da Terra derretessem totalmente e a água voltasse para os oceanos, estes ficariam cerca de 30 m mais profundos. Que efeito isso teria sobre a rotação da Terra? Faça uma estimativa de qual seria a variação na duração do dia.

84 Um avião de 1200 kg está voando em uma linha reta a 80 m/s, 1,3 km acima do solo. Qual é o módulo do momento angular do avião em relação a um ponto no solo verticalmente abaixo do local onde ele se encontra?

85 Em um parquinho existe um carrossel com 1,20 m de raio e uma massa de 180 kg. Seu raio de giro (veja Problema 91 do

Capítulo 10) é 91,0 cm. Uma criança com 44,0 kg de massa corre com uma velocidade de 3,00 m/s ao longo de uma trajetória tangente à borda do carrossel, inicialmente em repouso, e pula no carrossel. Despreze o atrito entre os rolamentos e o eixo do carrossel. Calcule (a) o momento de inércia do carrossel em relação ao eixo de rotação, (b) o módulo do momento angular da criança em relação ao eixo de rotação do carrossel e (c) a velocidade angular do carrossel e da criança após ela saltar no carrossel.

86 Uma roda gira no sentido horário em torno do eixo central com um momento angular de 600 kg · m²/s. No instante $t = 0$, um torque de módulo 50 N · m é aplicado à roda para inverter a rotação. Em que instante t a velocidade angular da roda se anula?

87 Um carro de brinquedo de 3,0 kg se move ao longo de um eixo x com uma velocidade dada por $\vec{v} = -2,0t\hat{i}$ m/s, com t em segundos. Para $t > 0$, quais são (a) o momento angular \vec{L} do carro e (b) o torque τ sobre o carro, ambos calculados em relação à origem? Quais são (c) \vec{L} e (d) $\vec{\tau}$ em relação ao ponto (2,0 m, 5,0 m, 0)? Quais são (e) \vec{L} e (f) $\vec{\tau}$ em relação ao ponto (2,0 m, -5,0 m, 0)?

88 Um cano de paredes finas rola no chão. Qual é a razão entre sua energia cinética de translação e sua energia cinética de rotação em relação ao eixo central paralelo à sua maior dimensão?

89 Uma esfera macia com 36,0 N de peso sobe rolando um plano inclinado com um ângulo de $30,0^\circ$. Na base do plano inclinado o centro de massa da esfera possui uma velocidade de translação de 4,90 m/s. (a) Qual é a energia cinética da esfera na base do plano? (b) Que distância a esfera sobe ao longo do plano? (c) A resposta do item (b) depende da massa da esfera?

90 Um automóvel tem uma massa de 1700 kg. Ele acelera a partir do repouso até 40 km/h em 10 s. Suponha que as rodas são discos uniformes de 32 kg. Determine, no final do intervalo de 10 s, (a) a energia cinética de rotação de cada roda em torno do seu respectivo eixo, (b) a energia cinética total de cada roda e (c) a energia cinética total do automóvel.

91 Com eixo e raios de massa desprezível e um aro fino, uma certa roda de bicicleta tem um raio de 0,350 m e pesa 37,0 N; ela pode girar em torno do eixo com atrito desprezível. Um homem segura a roda acima da cabeça com uma das mãos, com o eixo na posição vertical, enquanto está sentado em um banco que pode girar sem atrito; a roda gira no sentido horário, quando vista de cima, com uma velocidade angular de 57,7 rad/s, e o banco está inicialmente em repouso. O momento de inércia do sistema *roda + homem + banco* em relação ao eixo de rotação comum é 2,10 kg · m². O homem usa a mão livre para interromper bruscamente a rotação da roda (em relação ao banco). Determine (a) a velocidade angular resultante e (b) o sentido de rotação do sistema.

92 Para uma pessoa de 84 kg que se encontra no equador, qual é o módulo do seu momento angular em relação ao centro da Terra devido à rotação da Terra?

93 Uma garota de massa M está em pé na borda de um carrossel sem atrito de raio R e momento de inércia I que não está se movendo. Ela joga uma pedra de massa m horizontalmente em uma direção tangente à borda do carrossel. A velocidade da pedra em relação ao chão é v . Depois disso, quais são (a) a velocidade angular do carrossel e (b) a velocidade linear da garota?

94 Uma partícula de 4,0 kg se move em um plano xy . No instante em que a posição e a velocidade da partícula são $\vec{r} = (2,0\hat{i} + 4,0\hat{j})$ m e $\vec{v} = -4,0\hat{j}$ m/s, a força que age sobre a partícula é $\vec{F} = -3,0\hat{i}$ N. Nesse instante, determine (a) o momento

angular da partícula em relação à origem, (b) o momento angular da partícula em relação ao ponto $x = 0, y = 4,0\text{ m}$, (c) o torque que age sobre a partícula em relação à origem e (d) o torque que age sobre a partícula em relação ao ponto $x = 0, y = 4,0\text{ m}$.

95 Na Fig. 11-64, uma força horizontal constante \vec{F}_{ap} de módulo 12 N é aplicada a um cilindro maciço uniforme através de uma linha de pescar enrolada no cilindro. A massa do cilindro é de 10 kg, seu raio é 0,10 m e o cilindro rola suavemente em uma superfície horizontal. (a) Qual é o módulo da aceleração do centro de massa do cilindro? (b) Qual é o módulo da aceleração angular do cilindro em relação ao centro de massa? (c) Em termos dos vetores unitários qual é a força de atrito que age sobre o cilindro?

96 (a) No Exemplo 10-8, quando o rotor explodiu qual foi o momento, em relação ao eixo de rotação, liberado para o ambiente? (b) Supondo que a maioria dos pedaços do rotor parou

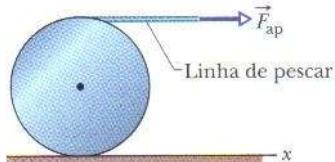


FIG. 11-64 Problema 95.

de se mover no máximo 0,025 s após a explosão, qual foi o módulo do torque médio a que esses pedaços foram submetidos, calculado em relação ao eixo de rotação?



97 Uma partícula de massa $M = 0,25\text{ kg}$ é liberada de um ponto que está a uma altura $h = 1,80\text{ m}$ acima do solo e a uma distância $s = 0,45\text{ m}$ de um ponto de observação O , como mostra a Fig. 11-65. Qual é o módulo do momento angular da partícula em relação a O quando a partícula percorreu metade da distância até o solo?

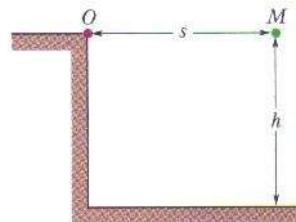


FIG. 11-65 Problema 97.

98 Em um certo instante, uma partícula de $0,80\text{ kg}$ está situada na posição $\vec{r} = (2,0\text{ m})\hat{i} + (3,0\text{ m})\hat{j}$. O momento linear da partícula está no plano xy e tem um módulo de $2,4\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ e uma direção de 115° medida no sentido anti-horário a partir do semi-eixo x positivo. Qual é o momento angular da partícula em relação à origem, em termos dos vetores unitários?

- (b) 3,0 kN; (c) 4,5 kN; (d) 20 m/s **37.** $9,9 \times 10^2 \text{ N}$ **39.** 3,0 mm/s
41. 55 cm **43.** (a) $-(0,15 \text{ m/s})\hat{i}$; (b) 0,18 m **45.** (a) 14 m/s;
(b) -45° **47.** (a) $(1,00\hat{i} - 0,167\hat{j}) \text{ km/s}$; (b) 3,23 MJ
49. $3,1 \times 10^2 \text{ m/s}$ **51.** (a) 33%; (b) 23%; (c) diminui **53.** (a) 721 m/s;
(b) 937 m/s **55.** (a) 4,4 m/s; (b) 0,80 **57.** (a) +2,0 m/s; (b) -1,3 J;
(c) +40 J; (d) o sistema recebeu energia de alguma fonte,
como, por exemplo, uma pequena explosão **59.** 25 cm
61. (a) 99 g; (b) 1,9 m/s; (c) 0,93 m/s **63.** (a) 1,2 kg; (b) 2,5 m/s
65. -28 cm **67.** (a) 3,00 m/s; (b) 6,00 m/s **69.** (a) 0,21 kg;
(b) 7,2 m **71.** (a) 433 m/s; (b) 250 m/s **73.** (a) $4,15 \times 10^5 \text{ m/s}$;
(b) $4,84 \times 10^5 \text{ m/s}$ **75.** 120° **77.** (a) $1,57 \times 10^6 \text{ N}$; (b) $1,35 \times 10^5$
kg; (c) 2,08 km/s **79.** (a) 46 N; (b) nenhuma **81.** (a) 1,78 m/s;
(b) menor; (c) menor; (d) maior **83.** (a) 1,92 m; (b) 0,640 m
85. 28,8 N **87.** 1,10 m/s **89.** (a) 7290 m/s; (b) 8200 m/s; (c) $1,271 \times 10^{10} \text{ J}$; (d) $1,275 \times 10^{10} \text{ J}$ **91.** (a) 1,0 kg/m/s; (b) $2,5 \times 10^2 \text{ J}$;
(c) 10 N; (d) 1,7 kN; (e) porque a resposta do item (c) inclui o
tempo entre as colisões **93.** (a) $(7,4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s})\hat{i} - (7,4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s})\hat{j}$;
(b) $(-7,4 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s})\hat{i}$; (c) $2,3 \times 10^3 \text{ N}$; (d) $2,1 \times 10^4 \text{ N}$;
(e) -45° **95.** (a) 3,7 m/s; (b) 1,3 N · s; (c) $1,8 \times 10^2 \text{ N}$
97. $1,18 \times 10^4 \text{ kg}$ **99.** +4,4 m/s **101.** (a) 1,9 m/s; (b) -30° ;
(c) elástica **103.** (a) 6,9 m/s; (b) 30° ; (c) 6,9 m/s; (d) -30° ; (e) 2,0
m/s; (f) -180° **105.** (a) 25 mm; (b) 26 mm; (c) para baixo;
(d) $1,6 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ **107.** (a) 0,745 mm; (b) 153° ; (c) 1,67 mJ
109. (a) $(2,67 \text{ m/s})\hat{i} + (-3,00 \text{ m/s})\hat{j}$; (b) 4,01 m/s; (c) 48,4°
111. 0,22% **113.** 190 m/s **115.** (a) $4,6 \times 10^3 \text{ km}$; (b) 73%
117. (a) 50 kg/s; (b) $1,6 \times 10^2 \text{ kg/s}$ **119.** (a) $-0,50 \text{ m}$; (b) $-1,8 \text{ cm}$;
(c) 0,50 m **121.** (a) $0,800 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$; (b) $0,400 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ **123.** 29 J
125. $5,0 \times 10^6 \text{ N}$ **127.** (a) 1; (b) $1,83 \times 10^3$; (c) $1,83 \times 10^3$;
(d) continuam as mesmas **129.** 5,0 kg **131.** 2,2 kg
133. (a) 11,4 m/s; (b) $95,1^\circ$ **135.** (a) 0; (b) 0; (c) 0

Capítulo 10

- T** 1. b e c **2.** (a) e (d) ($\alpha = d^2\theta/dt^2$ deve ser constante)
3. (a) sim; (b) não; (c) sim; (d) sim **4.** são todos iguais
5. 1, 2, 4, 3 (veja a Eq. 10-36) **6.** (veja a Eq. 10-40) 1 e 3, 4,
2 e 5 (zero) **7.** (a) para baixo na figura ($\tau_{\text{res}} = 0$); (b) menor
(considere os braços de alavanca) **P** 1. (a) c, a, b e d
empatados; (b) b, a e c, d **3.** c, a, b **5.** aumentar
7. (a) diminuir; (b) horário; (c) anti-horário **9.** todas
iguais **PR** 1. 14 rev **3.** 11 rad/s **5.** (a) 4,0 rad/s; (b) 11,9
rad/s **7.** (a) 4,0 m/s; (b) não **9.** (a) 30 s; (b) $1,8 \times 10^3 \text{ rad}$
11. (a) 3,00 s; (b) 18,9 rad **13.** 8,0 s **15.** (a) 44 rad; (b) 5,5 s;
(c) 32 s; (d) -2,1 s; (e) 40 s **17.** (a) $3,4 \times 10^2 \text{ s}$; (b) $-4,5 \times 10^{-3}$
rad/s²; (c) 98 s **19.** $6,9 \times 10^{-13} \text{ rad/s}$ **21.** (a) 20,9 rad/s; (b) 12,5
m/s; (c) 800 rev/min²; (d) 600 rev **23.** (a) $2,50 \times 10^3 \text{ rad/s}$;
(b) $20,2 \text{ m/s}^2$; (c) 0 **25.** (a) 40 s; (b) $2,0 \text{ rad/s}^2$ **27.** (a) $3,8 \times 10^3$
rad/s; (b) $1,9 \times 10^2 \text{ m/s}$ **29.** (a) $7,3 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$; (b) $3,5 \times 10^2 \text{ m/s}$;
(c) $7,3 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$; (d) $4,6 \times 10^2 \text{ m/s}$ **31.** (a) 73 cm/s^2 ; (b) 0,075;
(c) 0,11 **33.** 12,3 kg · m² **35.** 0,097 kg · m² **37.** (a) 1,1 kJ;
(b) 9,7 kJ **39.** (a) 0,023 kg · m²; (b) 11 mJ **41.** $4,7 \times 10^{-4}$
kg · m² **43.** (a) 49 MJ; (b) $1,0 \times 10^2 \text{ min}$ **45.** 4,6 N · m
47. $-3,85 \text{ Nm}$ **49.** (a) 28,2 rad/s²; (b) 338 N · m **51.** 0,140 N
53. $2,51 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ **55.** (a) 6,00 cm/s²; (b) 4,87 N; (c) 4,54 N;
(d) $1,20 \text{ rad/s}^2$; (e) 0,0138 kg · m² **57.** (a) $4,2 \times 10^2 \text{ rad/s}^2$;
(b) $5,0 \times 10^2 \text{ rad/s}^2$ **59.** (a) 19,8 kJ; (b) 1,32 kW **61.** 396 N · m
63. 5,42 m/s **65.** 9,82 rad/s **67.** (a) 5,32 m/s²; (b) 8,43 m/s²;
(c) $41,8^\circ$ **69.** (a) 314 rad/s²; (b) 7,54 m/s²; (c) 14,0 N; (d) 4,36 N
71. $6,16 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ **73.** (a) 1,57 m/s²; (b) 4,55 N; (c) 4,94 N
75. (a) $4,81 \times 10^5 \text{ N}$; (b) $1,12 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$; (c) $1,25 \times 10^6 \text{ J}$ **77.** 30 rev

- 79.** 3,1 rad/s **81.** (a) $0,791 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; (b) $1,79 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ **83.** (a) 2,3
rad/s²; (b) $1,4 \text{ rad/s}^2$ **85.** $1,4 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}$ **87.** 4,6 rad/s²
89. (a) -67 rev/min^2 ; (b) 8,3 rev **93.** 0,054 kg · m²
95. (a) $5,92 \times 10^4 \text{ m/s}^2$; (b) $4,39 \times 10^4 \text{ s}^{-2}$ **97.** 2,6 J **99.** (a) 0,32
rad/s; (b) $1,0 \times 10^2 \text{ km/h}$ **101.** (a) $7,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; (b) 7,2 m/s;
(c) 71° **103.** (a) $1,4 \times 10^2 \text{ rad}$; (b) 14 s **105.** (a) $221 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; (b)
 $1,10 \times 10^4 \text{ J}$ **107.** 0,13 rad/s **109.** $6,75 \times 10^{12} \text{ rad/s}$ **111.** (a) $1,5 \times$
 10^2 cm/s ; (b) 15 rad/s; (c) 15 rad/s; (d) 75 cm/s; (e) 3,0 rad/s
113. 18 rad **115.** (a) 10 J; (b) 0,27 m
- Capítulo 11**
- T** 1. (a) igual; (b) menor (considere a transferência
de energia como de energia cinética de rotação para energia
potencial gravitacional) **3.** (desenhe os vetores e use a regra
da mão direita) (a) $\pm z$; (b) $\pm y$; (c) $-x$ **4.** (veja a Eq. 11-21)
(a) 1 e 3; 2 e 4,5 (zero); (b) 2 e 3 **5.** (veja as Eqs. 11-23 e 11-16)
(a) 3, 1; 2 e 4 (zero); (b) 3 **6.** (a) todos iguais (mesmo τ , mesmo t
e, portanto, mesmo ΔL); (b) esfera, disco, anel (ordem inversa de
I) **7.** (a) diminui; (b) permanece o mesmo ($\tau_{\text{res}} = 0$ e, portanto,
L é conservado); (c) aumenta **P** 1. (a) 1, 2, 3 (zero);
(b) 1 e 2, 3; (c) 1 e 3, 2 **3.** (a) fica girando no mesmo lugar;
(b) rola na sua direção; (c) rola para longe de você **5.** *a, b e c, e, d* (zero)
7. *D, B e depois A e C empataos* **9.** (a) permanece o mesmo;
diminui, aumenta **PR** 1. (a) 0; (b) $(22 \text{ m/s})\hat{i}$; (c) $(-22 \text{ m/s})\hat{i}$;
(d) 0; (e) $1,5 \times 10^3 \text{ m/s}^2$; (f) $1,5 \times 10^3 \text{ m/s}^2$; (g) $(22 \text{ m/s})\hat{i}$;
(h) $(44 \text{ m/s})\hat{i}$; (i) 0; (j) 0; (k) $1,5 \times 10^3 \text{ m/s}^2$; (l) $1,5 \times 10^3 \text{ m/s}^2$
3. 0,020 **5.** $-3,15 \text{ J}$ **7.** (a) $(-4,0 \text{ N})\hat{i}$; (b) $0,60 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ **9.** (a) 63
rad/s; (b) 4,0 m **11.** 4,8 m **13.** (a) $-(0,11 \text{ m})\omega$; (b) $-2,1 \text{ m/s}^2$;
(c) -47 rad/s^2 ; (d) 1,2 s; (e) 8,6 m; (f) 6,1 m/s **15.** 0,50 **17.** (a) 13
cm/s²; (b) 4,4 s; (c) 55 cm/s; (d) 18 mJ; (e) 1,4 J; (f) 27 rev/s
19. (a) $(6,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{j} + (8,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$; (b) $(-22 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{i}$ **21.** $(-2,0$
 $\text{N} \cdot \text{m})\hat{i}$ **23.** (a) $(50 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$; (b) 90° **25.** (a) $(-1,5 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{i} -$
 $(4,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{j} - (1,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$; (b) $(-1,5 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{i} - (4,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{j} - (1,0$
 $\text{N} \cdot \text{m})\hat{k}$ **27.** (a) $9,8 \text{ kg m}^2/\text{s}$; (b) $+z$ **29.** (a) 0; (b) $(8,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{i} +$
 $(8,0 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$ **31.** (a) 0; (b) $-22,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; (c) $-7,84 \text{ N} \cdot \text{m}$;
(d) $-7,84 \text{ N} \cdot \text{m}$ **33.** (a) $(-1,7 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s})\hat{k}$; (b) $(+56 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$;
(c) $(+56 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2)\hat{k}$ **35.** (a) $48 \text{ fm N} \cdot \text{m}$; (b) aumentando
37. (a) 1,47 N · m; (b) 20,4 rad; (c) $-29,9 \text{ J}$; (d) 19,9 W
39. (a) $4,6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; (b) $1,1 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; (c) $3,9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
41. (a) $1,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; (b) $4,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ **43.** (a) 3,6 rev/s; (b) 3,0;
(c) a força que o homem exerce sobre os tijolos converte energia
interna do homem em energia cinética **45.** (a) 267 rev/min;
(b) 0,667 **47.** (a) 750 rev/min; (b) 450 rev/min; (c) horário
49. 0,17 rad/s **51.** (a) 1,5 m; (b) 0,93 rad/s; (c) 98 J; (d) 8,4 rad/s;
(e) $8,8 \times 10^2 \text{ J}$; (f) da energia interna das patinadoras **53.** 3,4 rad/s
55. $1,3 \times 10^3 \text{ m/s}$ **57.** 11,0 m/s **59.** (a) 18 rad/s; (b) 0,92
61. 1,5 rad/s **63.** (a) 0,180 m; (b) horário **65.** 0,070 rad/s
67. (a) 0,148 rad/s; (b) 0,0123; (c) 181° **69.** 0,041 rad/s **71.** 39,1 J
73. (a) $6,65 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; (b) não; (c) 0; (d) sim **75.** (a) 0,333;
(b) 0,111 **77.** (a) 58,8 J; (b) 39,2 J **79.** (a) 0,81 mJ; (b) 0,29;
(c) $1,3 \times 10^2 \text{ N}$ **81.** (a) $mR^2/2$; (b) um cilindro circular
macio **83.** a velocidade de rotação ficaria menor; o dia ficaria
cerca de 0,8 s mais longo **85.** (a) 149 kg · m²; (b) 158 kg · m²/s;
(c) 0,744 rad/s **87.** (a) 0; (b) 0; (c) $-30r^2\hat{k} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; (d) $-90r^2\hat{k}$
N · m; (e) $30r^2\hat{k} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$; (f) $90r^2\hat{k} \text{ N} \cdot \text{m}$ **89.** (a) 61,7 J; (b) 3,43 m;
(c) não **91.** (a) 12,7 rad/s; (b) horário **93.** (a) $mvR/(I + MR^2)$;
(b) $mvR^2/(I + MR^2)$ **95.** (a) 1,6 m/s²; (b) 16 rad/s²; (c) $(4,0 \text{ N})\hat{i}$
97, 0,47 kg · m²/s