UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
4320195 - Física Geral e Experimental para Engenharia I

LISTA 05

Rotação de corpos rígidos

1. A hélice de um avião gira a 1900 rev/min.

   (a) Calcule a velocidade angular da hélice em rad/s.
   R: 199 rad/s

   (b) Quantos segundos a hélice leva para girar 35 graus?
   R: $0,00307\ s$

2. Uma criança está empurrando um carrosel. O deslocamento angular do carrosel varia com o tempo de acordo com a relação $\theta(t) = \gamma t + \beta t^3$, onde $\gamma = 0,400\ rad/s$ e $\beta = 0,0120\ rad/s^3$.

   (a) Calcule a velocidade angular do carrosel em função do tempo.
   R: $\omega(t) = \gamma + 3\beta t^2$

   (b) Qual é o valor da velocidade angular inicial?
   R: $\omega(0) = \gamma = 0,400\ rad/s$

   (c) Calcule o valor da velocidade angular instantânea para $t = 5,00\ s$ e a velocidade média angular para o intervalo do tempo de $t = 0$ até $t = 5,00\ s$. Mostre que a velocidade média angular não é igual à média das velocidades angulares para $t = 0$ até $t = 5,00\ s$ e explique a razão dessa diferença.
   R: $\omega(5) = 1,30\ rad/s$, $\omega_{media} = 0,70\ rad/s$, média das velocidades $= 0,85\ rad/s$.

3. O ângulo descrito por uma roda de bicicleta girando é dado por $\theta(t) = a + bt^2 - ct^3$, onde a, b e c são constantes positivas tais que se t for dado em segundos, θ deve ser medido em radianos.

   (a) Calcule a aceleração angular da roda em função do tempo.
   R: $\alpha(t) = 2b - 6ct$

(b) Em que instantes a velocidade angular instantânea da roda é nula?
R: $t = 0$ e $t = \frac{2b}{3c}$

4. Um corpo rígido roda em torno de um eixo fixo com o deslocamento angular dado por $\theta(t) = at - bt^3$, onde $a = 6,0\ rad/s$ e $b = 2,0\ rad/s^3$ e $t \geq 0$. Ache os valores médios da velocidade angular e da aceleração angular para o intervalo de tempo de $t = 0$ até o instante em que o corpo para.
R: $\omega_{media} = \frac{2a}{3} = 4\ rad/s$ e $\alpha_{media} = -\sqrt{3ab} = -6,0\ rad/s^2$.

5. Um ventilador elétrico é desligado, e sua velocidade angular diminui uniformamente de 500 rev/min até 200 rev/min em $4,00\ s$.

   (a) Ache a aceleração angular em rev/s^2 e o número de revoluções ocorridas no intervalo de $4,00\ s$.
   R: $\alpha = -1,25\ rev/s^2$ e $23,3$ revoluções

   (b) Supondo que a aceleração angular calculada no item (a) permaneça constante, durante quantos segundos, depois de desligado o aparelho, a hélice continuará a girar até parar?
   R: $t = 6,67\ s$

6. A roda de uma olaria gira com aceleração angular constante igual a $2,25\ rad/s^2$. Depois de $4,00\ s$, o ângulo descrito pela roda é de $60,0\ rad$. Qual era a velocidade angular inicial da roda?
R: $\omega_0 = 10,5\ rad/s$.

7. Para um movimento com aceleração angular constante

   (a) Deduza uma expressão que forneça $\theta - \theta_0$ em função de ω, α e t (não use ω_0).
   R: $\theta - \theta_0 = \omega t - \frac{1}{2}\alpha t^2$

   (b) Para $t = 8,0\ s$, uma engrenagem gira em torno de um eixo fixo a $4,50\ rad/s$. Durante o intervalo precedente de $8,0\ s$ ela girou através de um ângulo de $40,0\ rad$. Use o resultado da parte (a) para calcular a aceleração constante da engrenagem.
   R: $\alpha = -0,125\ rad/s^2$

   (c) Qual era a velocidade angular de engrenagem para $t = 0$?
   R: $\omega_0 = 5,5\ rad/s$

8. Calcule o momento de inércia de um aro (um anel fino) de raio R e massa M em relação a um eixo perpendicular ao plano do aro passando pela sua periferia.
R: $I = 2MR^2$

9. Uma placa metálica fina de massa M tem forma retangular com lados a e b. Use o teorema dos eixos paralelos para determinar seu momento de inércia em relação a um eixo perpendicular ao plano da placa passando por um de seus vértices.
   R: $I = \frac{1}{3}M(a^2 + b^2)$

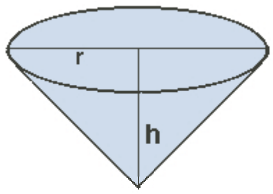
10. Ache o momento de inércia de um disco maciço, uniforme, de raio R e massa M em relação a um eixo perpendicular ao plano do disco passando pelo seu centro.
    R: $I = \frac{1}{2}MR^2$

11. Uma barra delgada de comprimento L possui massa por unidade de comprimento variando a partir da extremidade esquerda, onde $x = 0$, de acordo com $\frac{dm}{dx} = \gamma x$, onde γ é uma constante de unidade kg/m^2.

    (a) Calcule a massa total da barra em termos de γ e L.
    R: $M = \frac{\gamma L^2}{2}$

    (b) Calcule o momento de inércia da barra em relação a um eixo perpendicular à barra e passando pela sua extremidade esquerda.
    R: $I = \frac{1}{2}ML^2$

12. Determine o momento de inércia de um cone maciço uniforme em relação a um eixo que passa através de seu centro . O cone possui massa M e altura h. O raio do círculo da sua base é igual a r.
    R: $I = \frac{3}{10}Mr^2$



13. Um cilindro oco tem massa m, raio externo R_2 e raio interno R_1. Mostrar que o momento de inércia em relação ao eixo de simetria é

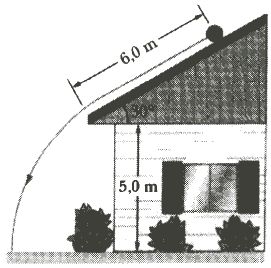
$$I = m\frac{R_2^2 + R_1^2}{2}$$

14. Um corpo esférico sólido de raio igual a 10 cm e massa de 12 kg, parte do repouso e rola uma distância de $6,0$ m, descendo o telhado de uma casa, cuja inclinação é igual a $30°$.

(a) Qual a aceleração linear do corpo durante o rolamento?
R: $a = 3,5\ m/s^2$

(b) Qual é a força de atrito f_e?
R: $f_e = 16,8\ N$

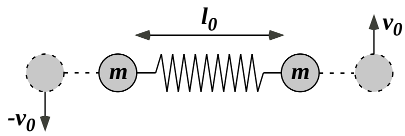
(c) Qual é a velocidade do corpo quando ele sai do telhado?
R: $v = 6,48\ m/s$



15. Um ioiô é composto por dois discos cuja espessura é b e cujo raio é R. Os dois discos estão ligados por um eixo central estreito de raio R_0. Em torno desse eixo está enrolado um fio de comprimento L e espessura desprezível. O momento de inércia do sistema, com relação ao seu centro de massa é dado por I_{CM}. Supondo o atrito desprezível, encontre a velocidade linear do ioiô quando ele sobe o fio.
R: $v = -\left[\frac{2MR_0^2 gL}{(I_{CM}+MR_0^2)}\right]^{1/2}$

16. Um cilindro de massa m e raio r, é solto (a partir do repouso) do topo de um plano inclinado que faz um ângulo α com a horizontal. Sabendo que o cilindro deve descer o plano inclinado rolando sem deslizar, encontre sua aceleração.
R: $a = \frac{2}{3} g sen(\alpha)$

17. Duas partículas de mesma massa m estão presas às extremidades de uma mola de massa desprezível, inicialmente com seu comprimento relaxado l_0. A mola é esticada até o



dobro desse comprimento e é solta depois de comunicar velocidades iguais e opostas v_0 e $-v_0$ às partículas, perpendiculares à direção da mola, tais que $kl_0^2 = 6mv_0^2$, onde k é a constante da mola. Calcule as componentes (v_r,v_θ) radial e transversal da velocidade das partículas quando a mola volta a passar pelo seu comprimento relaxado.
R: $v_r = 0$ e $v_\theta = 2v_0$

18. Considere o movimento de uma partícula de massa m num campo de forças centrais associado à energia potencial $U(r)$, onde r é a distância da partícula ao centro de forças O. Neste movimento, a magnitude $l = |\vec{l}|$ do momento angular da partícula em relação a O se conserva. Sejam (r, θ) as componentes em coordenadas polares do vetor de posição r da partícula em relação à origem O.

    (a) Mostre que as componentes em coordenadas polares do vetor velocidade v da partícula são $v_r = \frac{dr}{dt}$ (velocidade radial) e $v_\theta = r\frac{d\theta}{dt}$ (velocidade transversal). Mostre que $l = mrv_\theta$.

    (b) Mostre que a energia total E da partícula é dada por $E = \frac{mv_r^2}{2} + \frac{l^2}{(2mr^2)} + U(r)$

19. Uma mesa de coquetéis tem um tampo giratório, que é uma tábua circular de raio R e massa M, capaz de girar com atrito desprezível em torno do eixo vertical da mesa. Uma bala de massa $m \ll M$ e velocidade v, disparada por um convidado que abusou dos coquetéis, numa direção horizontal, vai-se encravar na periferia da tábua.

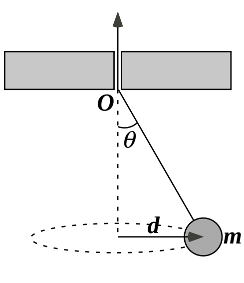
    (a) Qual é a velocidade angular de rotação adquirida pela tábua?
    R: $\omega = \frac{2mv}{MR}$

    (b) Que fração da energia cinética inicial é perdida no impacto?
    R: $1 - \frac{2m}{M}$

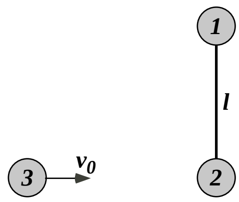
20. Uma bolinha presa a um fio de massa desprezível gira em torno de um eixo vertical com velocidade escalar constante, mantendo-se a uma distância $d = 0,5\ m$ do eixo; o ângulo θ entre o fio e a vertical é igual a 30°. O fio passa sem atrito através de um orifício O numa placa, e é puxado lentamente para cima até que o ângulo θ passa a ser de 60°.

    (a) Que comprimento do fio foi puxado?
    R: $\Delta l = 0,6\ m$

    (b) De que fator variou a velocidade de rotação?
    R: $\frac{\omega_2}{\omega_1} = 2,08$



21. Um haltere formado por dois discos 1 e 2 iguais de massas m unidos por uma barra rígida de massa desprezível e comprimento $l = 30\ cm$ repousa sobre uma mesa de ar horizontal. Um terceiro disco 3 de mesma massa m desloca-se com atrito desprezível e velocidade $v_0 = 3\ m/s$ sobre a mesa, perpendicularmente ao haltere, e colide frontalmente com o disco 2, ficando colado a ele. Descreva completamente o movimento subseqüente do sistema.
R: $v_{CM} = 1\ m/s$ na direção de v_0 e $\omega = 5\ rad/s$



22. Dois patinadores de massa $60\ kg$, deslizando sobre uma pista de gelo com atrito desprezível, aproximam-se com velocidades iguais e opostas de $5\ m/s$, segundo retas paralelas, separadas por uma distância de $1,40\ m$.

    (a) Calcule o vetor momento angular do sistema e mostre que é o mesmo em relação a qualquer ponto e se conserva.
    R: $l = 420\ kg\, m^2/s$ perpendicularmente à pista

    (b) Quando os patinadores chegam a $1,40\ m$ um do outro, estendem os braços e dão-se as mãos, passando a girar em torno do centro de massa comum. Calcule a velocidade angular de rotação.
    R: $\omega = 7,1\ rad/s$

23. Um corpo de massa inicial M inicialmente em repouso está preso à extremidade de uma corda de tamanho l, quando esticada. A outra extremidade da corda está presa a um suporte, colocado em uma mesa que não oferece atrito. Esse corpo possui uma válvula que é capaz de expelir um gás, perpendicularmente ao fio e paralelamente à mesa, numa taxa $\lambda\ [kg/s]$ e com uma velocidade escalar V_E relativa ao corpo. O corpo sai do repouso e começa a girar em torno do suporte do fio. Determine o momento angular da partícula num instante t qualquer, tomando $t = 0$ no instante em que a válvula é aberta.
R: $L = (M - \lambda t)\, l\, V_E\, ln \left[\frac{M}{(M-\lambda t)}\right]$

24. A molécula de oxigênio, O_2, tem massa total de $5,3 \times 10^{-26}\ kg$ e um momento de inércia de $1,94 \times 10^{-46}\ kg\, m^2$, em relação ao eixo que atravessa perpendicularmente

a linha de junção dos dois átomos. Suponha que essa molécula tenha em um gás a velocidade de 500 m/s e que sua energia cinética de rotação seja dois terços da energia cinética de translação. Determine sua velocidade angular.
R: $\omega = 6,75 \times 10^{12}\ rad/s$

25. Uma força é aplicada tangencialmente à borda de uma polia que tem 10 cm de raio e momento de inércia de $1 \times 10^{-3}\ kg\,m^2$ em relação ao seu eixo. A força tem módulo variável com o tempo, segundo a relação $F(t) = 0,5t + 0,30t^2$, com F em Newtons e t em segundos. A polia está inicialmente em repouso. Em $t = 3\ s$, quais são

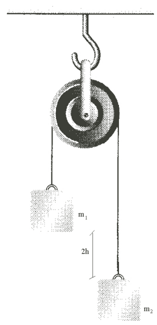
    (a) a sua aceleração angular e
    R: $\alpha = 420\ rad/s^2$

    (b) sua velocidade angular?
    R: $\omega = 495\ rad/s$

26. Considere dois corpos com $m_1 > m_2$ ligados por um fio de massa desprezível que passa sobre uma polia de raio R e momento de inércia $I = \frac{MR^2}{2}$ ao redor de seu eixo de rotação, como na figura a seguir. O fio não desliza sobre a polia. A polia gira sem atrito. Os corpos são soltos do repouso e estão separados por uma distância vertical de $2h$. Expresse as respostas em função de m_1, m_2, M, g e h.

    (a) Encontre as velocidades translacionais dos corpos quando passam um pelo outro.
    R: $v = \left[\frac{2gh(m_1-m_2)}{\left(m_1+m_2+\frac{M}{2}\right)}\right]^{1/2}$

    (b) Encontre a aceleração linear dos corpos.
    R: $a = \frac{(m_1-m_2)}{\left(m_1+m_2+\frac{M}{2}\right)}g$



27. Uma chaminé alta, de forma cilíndrica, cai se houver uma ruptura na sua base. Tratando a chaminé como um bastão fino, de altura h, expresse

(a) a componente radial da aceleração linear do topo da chaminé em função do ângulo que ela faz com a vertical, e

R: $a_r = 3g[1 - cos(\theta)]$

(b) a componente tangencial dessa mesma aceleração.

R: $a_\theta = \frac{3}{2} g\, sen(\theta)$

(c) Para que ângulo θ a aceleração é igual a g?

R: $\theta = 34,5°$

28. Dois blocos idênticos, de massa M cada um, estão ligados por uma corda de massa desprezível, que passa por uma polia de raio R e de momento de inércia I (figura a seguir). A corda não desliza sobre a polia; desconhece-se existir ou não atrito entre o bloco e a mesa; não há atrito no eixo da polia. Quando esse sistema é liberado, a polia gira de um ângulo θ, num tempo t, e a aceleração dos blocos é constante. Todas as respostas devem ser expressas em função de M, I, R, θ, g e t.

(a) Qual a aceleração angular da polia?

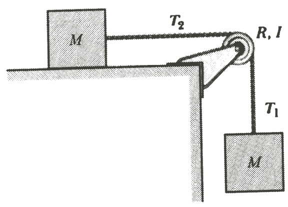
R: $\alpha = \frac{2\theta}{t^2}$

(b) Qual a aceleração dos dois blocos?

R: $a = \frac{2\theta R}{t^2}$

(c) Quais as tensões na parte superior e inferior da corda?

R: $T_1 = M\left(g - \frac{2\theta R}{t^2}\right)$ e $T_2 = Mg - \frac{2M\theta R}{t^2} - \frac{2I\theta}{Rt^2}$



29. Uma roda de bicicleta de massa M e raio R_1 (massa dos raios da roda desprezível) pode girar livremente em torno de um eixo horizontal. Um fio de massa desprezível é enrolado em torno de seu diâmetro, e ligado a um bloco de massa $m_1 = \frac{M}{5}$, passando por uma polia que é um disco de massa $m_2 = \frac{4M}{5}$ e raio R_2, como visto na figura.

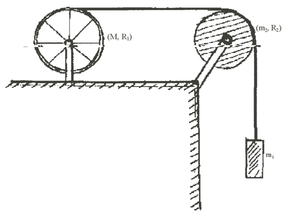
(a) Faça um diagrama mostrando as forças aplicadas pelo fio em cada um dos três corpos.

(b) Obtenha a força exercida pelo fio na roda de bicicleta, em termos de M e da aceleração a da massa m_1.

R: $F = Ma$

(c) Determine a força exercida pelo fio na massa m_1, em termos de a e M.
R: $F = \frac{M(g-a)}{5}$

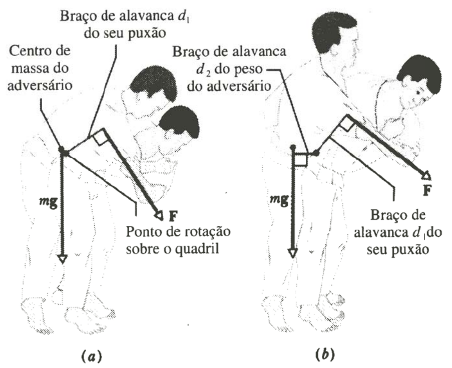
(d) Determine a aceleração a da massa m_1.
R: $a = \frac{g}{8}$



30. Para atirar ao solo um adversário de 80 kg, você utiliza o deslocamento em torno do quadril, um golpe básico do judô em que você tenta puxá-lo pelo uniforme com uma força F, que tem um braço de alavanca $d_1 = 0,30\ m$ em relação ao ponto de apoio (eixo de rotação) no seu quadril direito, sobre o qual deseja girá-lo com uma aceleração angular de $-12\ rad/s^2$, ou seja, uma aceleração no sentido horário na figura a seguir. Suponha que o momento de inércia I em relação ao ponto de rotação seja 15 $kg\,m^2$.

(a) Qual deve ser o módulo de F se, inicialmente, você incliná-lo para frente, para fazer com que o centro de massa dele coincida com o seu quadril (figura a)?
R: $F = 600\ N$

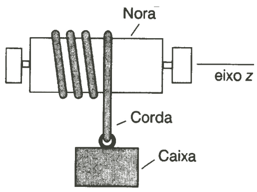
(b) Qual será o módulo de F se o adversário permanecer ereto e o vetor peso dele tiver um braço de alavanca $d_2 = 0,12\ m$ em relação ao eixo de rotação (figura b)?
R: $F = 913,6\ N$



31. Libera-se uma caixa que está presa a uma corda enrolada em uma nora (figura a seguir). A massa da caixa é $M_c = 35\ kg$, e a massa e o raio da nora são $M_n = 94\ kg$ e $R_n = 83\ mm$. Determine

(a) o módulo a da aceleração linear da caixa e
R: $a = 4,2\ m/s^2$

(b) a tensão F_T da corda. A nora pode ser tratada como um cilindro uniforme de raio R_n; despreza-se o torque devido ao atrito nos mancais da corda.
R: $F_T = 197,4\ N$

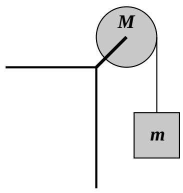


32. A figura a seguir mostra um disco uniforme cuja massa M é de $2,5\ kg$ e cujo raio é igual a $20\ cm$, montado sobre um eixo horizontal fixo. Um bloco cuja massa m é de $1,2\ kg$ está pendurado em uma corda leve enrolada em torno da borda do disco. Para o instante $t = 2,5\ s$, calcule

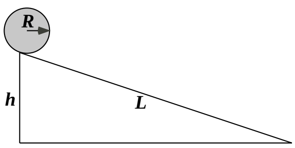
(a) em que ângulo gira o disco?
R: $\theta = 75\ rad$

(b) qual a velocidade angular do disco?
R: $\omega = 60\ rad/s$

(c) qual é a energia cinética de rotação do disco?
R: $T_R = 90\ J$



33. Um cilindro de massa M e raio R rola sem escorregar para baixo em um plano inclinado de comprimento L e altura h. Encontre a velocidade do seu centro de massa quando o

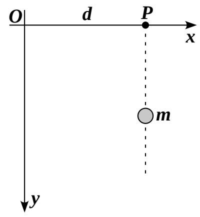


cilindro alcança a base do plano.
R: $v_{CM} = \sqrt{\frac{4}{3}gh}$

34. Uma esfera, um cilindro e um aro, todos com o mesmo raio R, partem do repouso e rolam para baixo sobre o mesmo plano inclinado. Qual corpo atingirá a base primeiro?
R: a esfera

35. O que é maior, o momento angular da Terra associado à rotação em torno de seu eixo ou o seu momento angular associado ao movimento orbital em torno do Sol?
R: o momento angular orbital.

36. Uma partícula de massa m parte do repouso no ponto P indicado na figura abaixo.



(a) Calcule o torque da força gravitacional sobre a partícula em relação à origem O.
R: $\tau = mgd$

(b) Qual é o momento angular da partícula que cai, para um dado instante de tempo t, em relação ao ponto O?
R: $L = mgtd$

37. Sob determinadas circunstâncias, uma estrela pode sofrer um colapso e se transformar em um objeto extremamente denso, constituído principalmente por nêutrons e chamado "Estrela de Nêutrons". A densidade de uma estrela de nêutrons é aproximadamente 10^{14} vezes maior do que a da matéria comum. Suponha que a estrela seja uma esfera maciça e homogênea antes e depois do colapso. O raio inicial da estrela era de $7,0 \times 10^5\ km$ (comparável com o raio do Sol); seu raio final é igual a 16 km. Supondo que a estrela original completava um giro em 30 dias, encontre a velocidade angular da estrela de nêutrons.
R: $\omega = 3,89 \times 10^3\ rad/s$

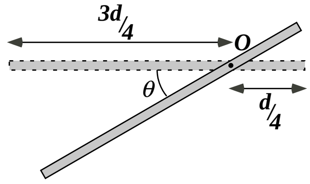
38. Uma mesa giratória grande gira em torno de um eixo vertical fixo, fazendo uma revolução em $6,00\ s$. O momento de inércia da mesa giratória em torno desse eixo é

igual a 1200 $kg\,m^2$. Uma criança com massa de $40,0$ kg, que estava inicialmente em repouso no centro da mesa, começa a correr ao longo de um raio. Qual é a velocidade angular da mesa giratória quando a criança está a uma distância de $2,00$ m do centro? (Suponha que a criança possa ser considerada uma partícula).
R: $\omega = 0,924$ rad/s

39. Uma porta sólida de madeira com largura de $1,00$ m e altura de $2,00$ m é articulada em um de seus lados e possui massa total de $40,0$ kg. Inicialmente ela está aberta e em repouso, a seguir, uma porção de material amorfo e pegajoso de massa igual a $0,500$ kg, se deslocando perpendicularmente à porta com velocidade de $12,0$ m/s, colide no centro da porta. Calcule a velocidade angular final da porta. A porção do material supracitado contribui significativamente para o momento de inércia?
R: $\omega = 0,223$ rad/s

40. Ocasionalmente uma estrela de nêutrons sofre uma aceleração repentina e inesperada conhecida como "Glitch". Uma explicação é que o glitch ocorre quando a crosta da estrela de nêutrons sofre uma pequena sedimentação, fazendo diminuir o momento de inércia em torno do eixo de rotação. Uma estrela de nêutrons com velocidade angular $\omega_0 = 70,4$ rad/s sofreu um glitch em outubro de 1975 que fez sua velocidade angular aumentar para $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, onde $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 2,01 \times 10^{-6}$. Se o raio da estrela de nêutrons era de 11 km, qual foi sua diminuição na sedimentação dessa estrela? Suponha que a estrela de nêutrons seja uma esfera maciça e homogênea.
R: $1,1$ cm

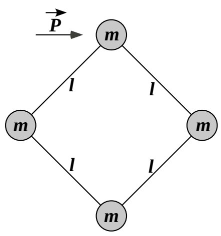
41. Uma haste metálica delgada de comprimento d e massa M pode girar livremente em torno de um eixo horizontal, que a atravessa perpendicularmente, à distância $d/4$ de uma extremidade. A haste é solta a partir do repouso, na posição horizontal.



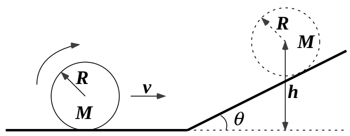
   (a) Calcule o momento de inércia I da haste com respeito ao eixo em torno do qual ela gira.
   R: $I = \frac{7}{48}Md^2$

(b) Calcule a velocidade angular ω adquirida pela haste após ter caído de um ângulo θ (figura abaixo), bem como a aceleração angular α.
R: $\omega = \left[\frac{24}{7}\frac{g}{d}sen(\theta)\right]^{1/2}$ e $\alpha = \frac{12}{7}\frac{g}{d}cos(\theta)$

42. Quatro discos iguais de massas m ocupam os vértices de uma armação quadrada formada por quatro barras rígidas de comprimento l e massa desprezível. O conjunto está sobre uma mesa de ar horizontal, podendo deslocar-se sobre ela com atrito desprezível. Transmite-se um impulso instantâneo $\vec{P}$ a uma das massas, na direção de uma das diagonais do quadrado (figura). Descreva completamente o movimento subseqüente do sistema.
R: $\vec{v}_{CM} = \frac{\vec{P}}{4m}$ e $\omega = \frac{\sqrt{2}P}{4ml}$

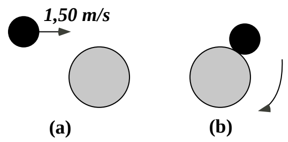


43. Uma roda cilíndrica homogênea, de raio R e massa M, rola sem deslizar sobre um plano horizontal, deslocando-se com velocidade v, e sobe sobre um plano inclinado de inclinação θ, continuando a rolar sem deslizar (figura a seguir). Até que altura h o centro da roda subirá sobre o plano inclinado?
R: $h = R + \frac{3}{4}\frac{v^2}{g}$



44. Um disco com uma massa de $80,0\ g$ e um raio de $4,00\ cm$ desliza ao longo de uma mesa de ar à velocidade de $1,50\ m/s$ como mostrado na figura. Ele faz uma colisão oblíqua com um segundo disco tendo raio $6,00\ cm$ e massa $120\ g$ (inicialmente em repouso) de forma que suas bordas apenas se toquem. Como suas bordas estão revestidas com uma cola de ação instantânea, os discos ficam grudados e giram após a colisão (ver figura).

(a) Qual é o momento angular do sistema em relação ao centro de massa?
R: $L = 72000\ g\,cm^2/s$



(b) Qual é a velocidade angular ao redor do centro de massa?
R: $\omega = 9,47\ rad/s$

45. Um giroscópio possui movimento de precessão em torno de um eixo vertical. Descreva o que ocorre com a velocidade angular de precessão quando são feitas as seguintes mudanças nas variáveis, mantendo-se as outras grandezas constantes:

    (a) a velocidade angular de spin do volante dobra;

    (b) o peso total dobra;

    (c) o momento de inércia em torno do eixo do volante dobra;

    (d) a distância entre o pivô e o centro de gravidade dobra;

    (e) O que ocorreria se todas as quatro variáveis indicadas nos itens de (a) até (d) dobrassem de valor ao mesmo tempo?

46. Considere um giroscópio com um eixo que não está na direção horizontal, mas possui uma inclinação β em relação à horizontal. Mostre que a velocidade angular da precessão não depende do valor de β.