A força de Coriolis

Quando um corpo está em movimento em relação a um referencial que gira, além da força centrífuga há uma outra força fictícia sobre o corpo: é a **força de Coriolis**, que tem esse nome porque seu estudo foi feito pelo francês Gustave Gaspar Coriolis (1792-1843). Num referencial que gira, a força centrífuga existe tanto no caso em que o corpo está em repouso como no caso em que está em movimento, mas a força de Coriolis só aparece quando o corpo está em movimento. Não faremos o estudo matemático dessa força, pois sua complexidade está acima do nível do nosso curso. No entanto, daremos alguns exemplos para que você perceba seu efeito.

Na figura 1 representamos uma situação em que dois indivíduos, *A* e *B*, estão sobre uma plataforma que gira em relação ao solo, onde está o indivíduo *C*. Para simplificar, vamos supor que o indivíduo *A* esteja no centro da plataforma.

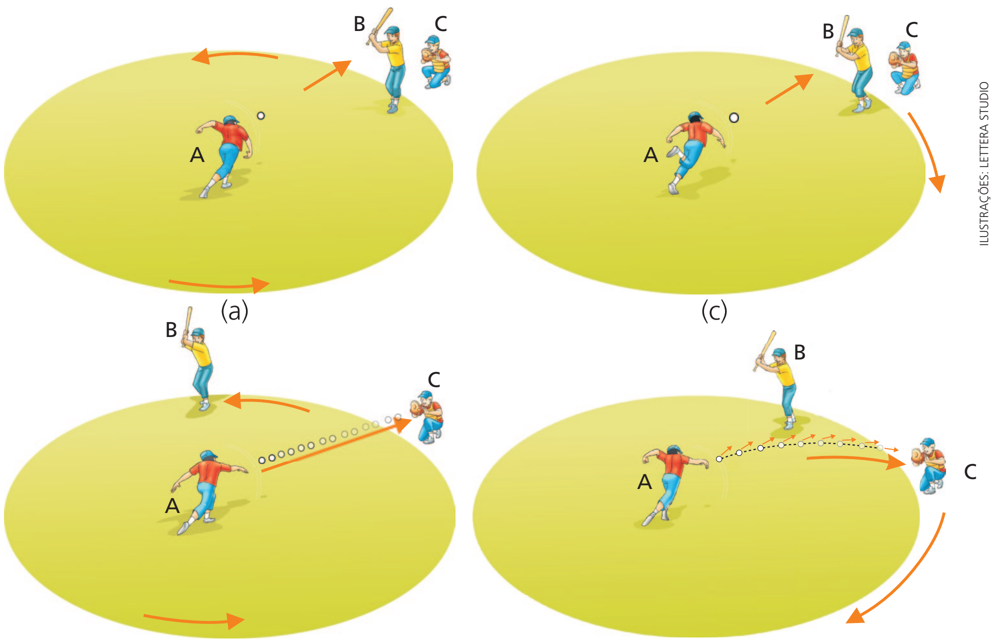


Figura 1.

O indivíduo *A* joga uma bola para *B* (fig. 1a). Porém, devido à rotação da plataforma, a bola não chega a *B*; quem a recebe é o indivíduo *C*. Nas figuras 1a e 1b, temos a trajetória da bola em relação ao observador *C* que está fixo no solo. Nas figuras 1c e 1d, representamos a trajetória da bola para os indivíduos *A* e *B*; para eles, é o indivíduo *C* que está girando, e a trajetória da bola é uma curva.

A diferença básica está no seguinte: a força centrífuga empurra a bola para fora, afastando-a radialmente do centro, enquanto a força de Coriolis torce sua trajetória lateralmente, provocando desvios na direção de sua velocidade vetorial (fig. 2).

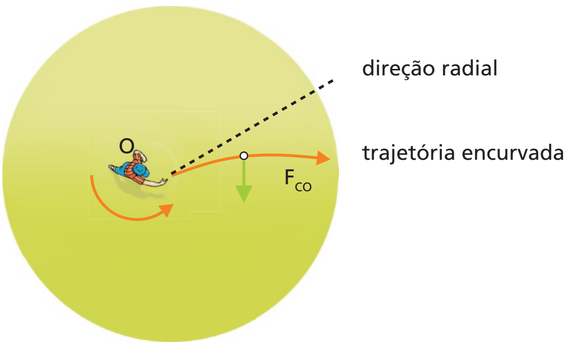


Figura 2.

O garoto *A* vê a bola desenhar uma trajetória curva, entortada para a direita, e atribui o fato à existência de uma força fictícia, que é a força de Coriolis. Para o garoto *A*, o seu referencial está na plataforma girando e, portanto, não é um referencial inercial. Lembremo-nos de que o referencial inercial deverá estar em repouso ou em MRU. No caso, a plataforma está em MCU.

Vejamos alguns exemplos em que aparece a força de Coriolis:

- Soltamos uma pedra da boca de um poço, bem no centro do seu círculo. Esta não cairá no centro da água, lá no fundo do poço, mas baterá nas paredes laterais (fig. 3). A Terra tem movimento de rotação e nesse caso o nosso referencial não é inercial. A força de Coriolis é a responsável pelo desvio de trajetória da pedra.

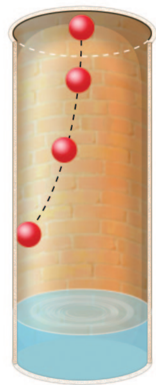


Figura 3.

- Qualquer objeto que despencar de uma altura razoável sofrerá a influência de Coriolis, e sua trajetória será desviada. Nos experimentos que Galileu teria feito na torre de Pisa, a força de Coriolis também desviou as balas de canhão. Porém, esse desvio foi muito pequeno, da ordem de alguns milímetros, e nem Galileu percebeu.
- A formação de ciclones tem sua explicação na força de Coriolis.

Exercícios

1. (Fund. Carlos Chagas-SP) Nas corridas em circuito oval, as pistas são acentuadamente inclinadas. Suponha que uma pista tem 10 m de largura e um desnível de 6,0 m entre as margens externa e interna. Um automóvel, nesta pista, pode descrever uma curva de raio 120 m sem depender de atrito. A máxima velocidade, em m/s, do automóvel nas condições descritas é:

a) 30

b) 35

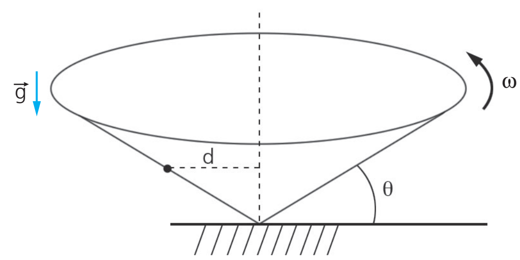
c) 40

d) 45

e) 50

(Adote: $g = 10\ m/s^2$ e $\pi \cong 3$.)

2. (ITA-SP) Um funil que gira com velocidade angular uniforme em torno do seu eixo vertical de simetria apresenta uma superfície cônica que forma um ângulo θ com a horizontal, conforme a figura. Sobre esta superfície, uma pequena esfera gira com a mesma velocidade angular mantendo-se a uma distância *d* do eixo de rotação.



Nestas condições, o período de rotação do funil é dado por:

a) $2\pi\sqrt{\dfrac{d}{g\ \text{sen}\ \theta}}$

b) $2\pi\sqrt{\dfrac{d}{g\cos\theta}}$

c) $2\pi\sqrt{\dfrac{d}{g\tan\theta}}$

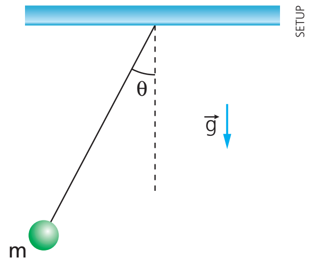
d) $2\pi\sqrt{\dfrac{2d}{g\ \text{sen}\ 2\theta}}$

e) $2\pi\sqrt{\dfrac{d\cos\theta}{g\tan\theta}}$

3. Considere o raio da Lua igual a $1{,}6 \cdot 10^6$ m e o módulo da aceleração da gravidade na superfície lunar igual a $1{,}6$ m/s².
A velocidade de um satélite rasante à Lua tem módulo igual, em km/s, a:

a) 0,80
b) 1,6
c) 3,2
d) 4,8
e) 8,0

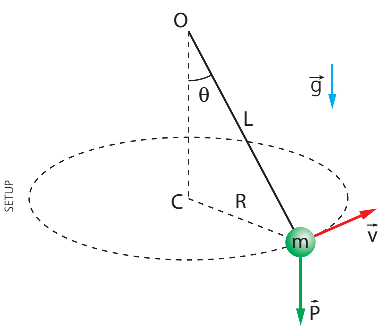
4. (UF-ES) Um pêndulo é formado por uma esfera de massa *m* presa ao teto por um fio inextensível e de massa desprezível. Ele oscila livremente e, no instante em que sua velocidade é nula, o fio forma um ângulo θ com a vertical, conforme a figura.



Nesse instante a intensidade da força que traciona o fio é:

a) nula
b) mg sen θ
c) mg tg θ
d) mg
e) mg cos θ

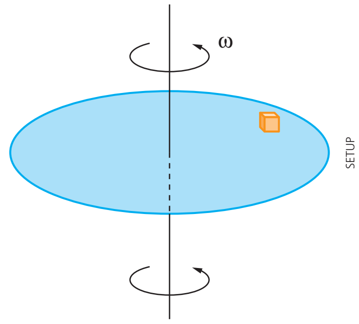
5. (OBF-Brasil) Em um pêndulo cônico temos uma corda de comprimento *L* e na sua extremidade um corpo de massa *m*, que realiza um movimento circular no plano (veja figura). Como consequência deste movimento, a corda descreve a figura de um cone, razão pela qual o pêndulo adquire esse nome.



Determine:

a) a velocidade angular ω do corpo em função do módulo da aceleração da gravidade *g*, do comprimento *L* e do ângulo θ de inclinação da corda;
b) o tempo para o corpo dar uma volta completa.

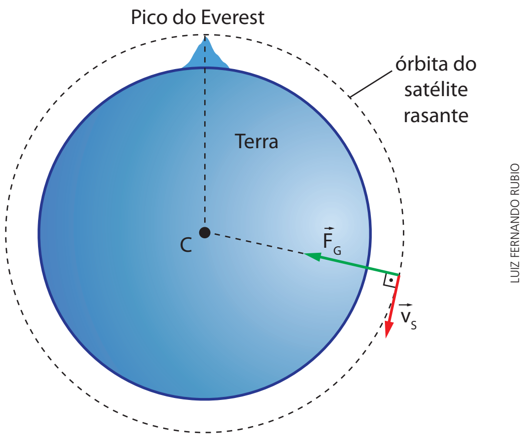
6. (Unesp-SP) Um pequeno bloco de massa *m* é colocado sobre um disco giratório, plano e horizontal, inicialmente em repouso, a uma distância *R* do eixo do disco. O disco é então posto a girar com pequena aceleração angular, até que sua velocidade angular atinja um certo valor ω. A partir deste valor de velocidade angular, o bloco começa a deslizar sobre o disco.



Representando por *g* o módulo da aceleração da gravidade e considerando-se o instante em que o bloco está prestes a deslizar sobre o disco:

a) determine, em função desses dados, o módulo da força centrípeta F_c que atua sobre o bloco;
b) calcule, em função desses dados, o coeficiente de atrito estático μ_e entre o bloco e o disco.

7. Nos estudos de Astronomia, definimos três velocidades, chamadas velocidades cósmicas, que são calculadas, no caso do planeta Terra, imaginando ausência da atmosfera (isto é, desprezando-se o efeito do ar) e não se considerando efeitos ligados à rotação do planeta.
A velocidade cósmica primeira é a velocidade de satelização, isto é, a velocidade com que deveríamos lançar um corpo, horizontalmente, do Pico do Everest (ponto culminante da Terra) para transformá-lo em um satélite rasante da Terra, em órbita circular e movimento uniforme.
A velocidade cósmica segunda é a velocidade de escape, que é a velocidade mínima de lançamento de um corpo, a partir da superfície terrestre, para que ele saia do campo gravitacional da Terra (vá para o infinito) e seu valor é da ordem de 11,2 km/s.
A velocidade cósmica terceira é a velocidade mínima de lançamento de um corpo, a partir da superfície terrestre, para que ele saia do Sistema Solar e seu valor é da ordem de 45 km/s.



Calcule:

a) a velocidade cósmica primeira a partir dos seguintes dados:

- raio da Terra: $R = 6{,}4 \cdot 10^6$ m
- módulo da aceleração da gravidade junto à superfície terrestre: $g = 10$ m/s^2

b) o período de translação desse satélite rasante. Adote $\pi = 3$.

8. (Fuvest-SP) Um avião voa horizontalmente sobre o mar com velocidade constante de módulo *v*, a ser determinado. Um passageiro, sentado próximo ao centro de massa do avião, observa que a superfície do suco de laranja, que está em um copo sobre a bandeja fixa ao seu assento, permanece paralela ao plano da bandeja. Estando junto à janela e olhando numa direção perpendicular à da trajetória do avião, o passageiro nota que a ponta da asa esquerda do avião tangencia a linha do horizonte, como mostra a figura *A*. O piloto anuncia que, devido a um problema técnico, o avião fará uma curva de 180° para retornar ao ponto de partida. Durante a curva, o avião inclina-se para a esquerda, de um ângulo $\theta = 30°$, sem que haja alterações no módulo de sua velocidade e na sua altura. O passageiro, olhando sempre na direção perpendicular à da velocidade do avião, observa que a ponta da asa esquerda permanece durante toda a curva apontando para um pequeno rochedo que aflora do mar, como representado na figura *B*. O passageiro também nota que a superfície do suco permaneceu paralela à bandeja e que o avião percorreu a trajetória semicircular de raio *R* (a ser determinado), em 90 s. Percebe, então, que com suas observações e alguns conhecimentos de Física que adquiriu no ensino médio, pode estimar a altura e a velocidade do avião.

NOTE E ADOTE
$\pi = 3$; sen 30° = 0,5; cos 30° = 0,86; tg 30° = 0,6; módulo da aceleração da gravidade: $g = 10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

ILUSTRAÇÕES: CONCEITOGRAF

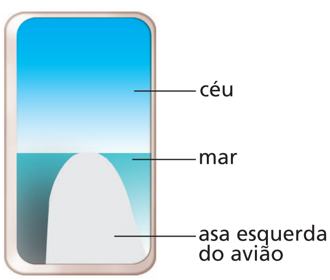


Figura A.

Figura B.

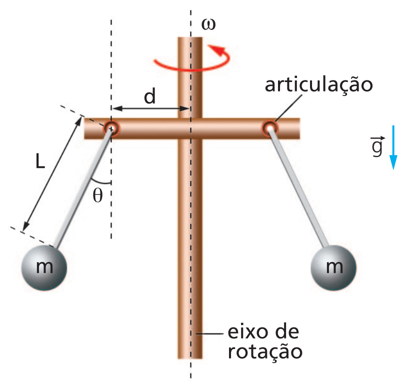
As distâncias envolvidas no problema são grandes em relação às dimensões do avião.

a) Encontre uma relação entre *v*, *R*, *g* e θ, para a situação descrita.

b) Estime o módulo *v* da velocidade do avião, em km/h ou m/s.

c) Estime o valor da altura *H*, acima do nível do mar, em metros, em que o avião estava voando.

9. (Unicamp-SP) As máquinas a vapor, que foram importantíssimas na Revolução Industrial, costumavam ter um engenhoso regulador da sua velocidade de rotação, como é mostrado esquematicamente na figura abaixo. As duas esferas afastavam-se do eixo devido ao movimento angular e acionavam um dispositivo regulador da entrada de vapor, controlando assim a velocidade de rotação, sempre que o ângulo θ atingia 30°. Considere hastes de massa desprezível e comprimento $L = 0{,}2$ m, com esferas de massa $m = 0{,}18$ kg em suas pontas, $d = 0{,}1$ m e aproxime $\sqrt{3} \cong 1{,}8$. Adote $g = 10$ m/s^2.



a) Faça um diagrama indicando as forças que atuam sobre uma das esferas.

b) Calcule a velocidade angular ω para a qual $\theta = 30°$.