

Física I p/ IO – FEP111 (4300111)

2º Semestre de 2010

Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Professor: **Antonio Domingues dos Santos**

E-mail: adsantos@if.usp.br

Fone: 3091.6886

Referencial Inercial

Se analisarmos um movimento a partir de um referencial que se move relativamente a outro referencial inercial, veremos o movimento de forma diferente.

Se o referencial tem uma velocidade v_r em relação ao primeiro e um corpo se move com velocidade v em relação ao primeiro referencial.

$$\vec{v}' = \vec{v} + \vec{v}_r \quad \longrightarrow \quad \vec{a}' = \vec{a} \quad \longrightarrow \quad \vec{F}' = \vec{F}$$

Ambos os referenciais são equivalentes e inerciais.

Mas, se o segundo referencial se move em MRUV em relação ao referencial inercial,

$$\vec{v}' = \vec{v} + \vec{v}_{r0} + \vec{a}_r t \quad \longrightarrow \quad \vec{a}' = \vec{a} + \vec{a}_r \quad \longrightarrow \quad \vec{F}' = \vec{F} + \vec{F}_r$$

F_r é uma força fictícia (não real), de caráter inercial.

A Lei da Ação e Reação não vale para esta força.

Referencial não inercial

A fim de entender melhor o movimento de um sistema rotatório, consideremos um carro trafegando a alta velocidade numa rodovia, e que se aproxima de uma rampa curva, de saída da estrada, como está na Fig. 6.10. Quando o carro entra na curva, à esquerda, o passageiro no banco do carona escorrega para a direita e bate na porta. Nesse ponto, a reação da porta assegura que o passageiro não seja projetado para fora do carro. O que provoca o movimento do carona para a porta?

Uma explicação popular, porém *imprópria*, assegura que uma certa força, misteriosa, empurra o carona para fora. (Esta força é chamada força “centrífuga”, mas não usaremos o termo, pois provoca, muitas vezes, a maior confusão.)

O passageiro carona inventa esta força fictícia a fim de explicar o que acontece no seu referencial acelerado.

A explicação correta do fenômeno é a seguinte: antes de o carro entrar na rampa de saída, o passageiro descreve uma trajetória reta, o que está conforme à primeira lei de Newton: a tendência natural de um corpo é continuar a se mover numa reta. Se, no entanto, uma força centrípeta (dirigida para o centro de curvatura), suficientemente grande, agir sobre o passageiro, ele descreverá uma trajetória curva, junto com o carro. A origem dessa força centrípeta é a força de atrito entre o passageiro e o assento do carro. Se esta força de atrito não for bastante grande, o passageiro escorregará no assento quando o carro fizer a curva. Quando o passageiro bate na porta, a reação da porta provoca uma força centrípeta suficiente para que o passageiro siga a mesma trajetória curva do carro. O passageiro escorrega

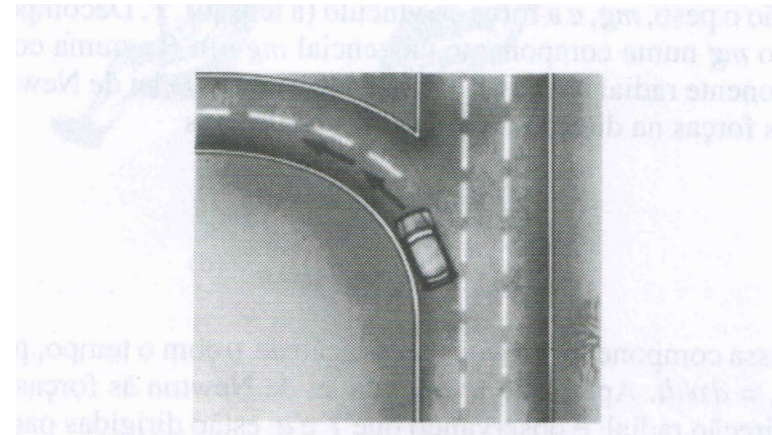


Fig. 6.10 Carro tomando uma rampa curva de saída.

para o lado não em virtude de alguma força misteriosa, dirigida para fora, mas pela *inexistência de uma força centrípeta suficientemente grande para que possa descrever a trajetória curva descrita pelo carro*.

Em resumo, é preciso grande cuidado em distinguir as forças reais das forças inerciais (fictícias) na descrição dos movimentos em referenciais acelerados. Um observador, num carro que faz uma curva, está num referencial acelerado, e inventa uma força fictícia para fora, tentando explicar por que é empurrado para fora da curva. O observador estacionário, fora do carro, só considera as forças reais que atuam sobre o passageiro. Para esse observador, a misteriosa força para fora *não existe*! A única força real externa sobre o passageiro (excluindo-se o peso, é claro) é a força centrípeta (para dentro) provocada pelo atrito, ou a força normal provocada pela porta.

Referencial não inercial

$$\text{Observador inercial} \begin{cases} (1) & \sum F_x = T \sin \theta = ma \\ (2) & \sum F_y = T \cos \theta - mg = 0 \end{cases}$$

Então, resolvendo simultaneamente (1) e (2), o observador inercial determina a aceleração do vagão pela relação

$$a = g \tan \theta$$

Em virtude, portanto, de o desvio do fio em relação à vertical servir de medida da aceleração do vagão, é possível usar um pêndulo simples como se fosse um acelerômetro.

Segundo o observador não inercial que está no vagão, Fig. 6.11b, a esfera está em repouso e a aceleração é nula. Por isso, o observador não inercial, a fim de equilibrar a componente horizontal de T , introduz uma *força fictícia*, $-ma$, e afirma que a força resultante que age sobre a esfera é nula! Nesse referencial não inercial, a segunda lei de Newton, expressa nas componentes das forças, escreve-se

$$\text{Observador não inercial} \begin{cases} \sum F'_x = T \sin \theta - ma = 0 \\ \sum F'_y = T \cos \theta - mg = 0 \end{cases}$$

Estas expressões são equivalentes a (1) e (2); portanto, o observador não inercial chega ao mesmo resultado matemático que o observador inercial. No entanto, a interpretação física sobre o desvio do fio é *diferente* nos dois referenciais. Observe que embora se tenha usado um pêndulo, nesta aplicação não há oscilações.

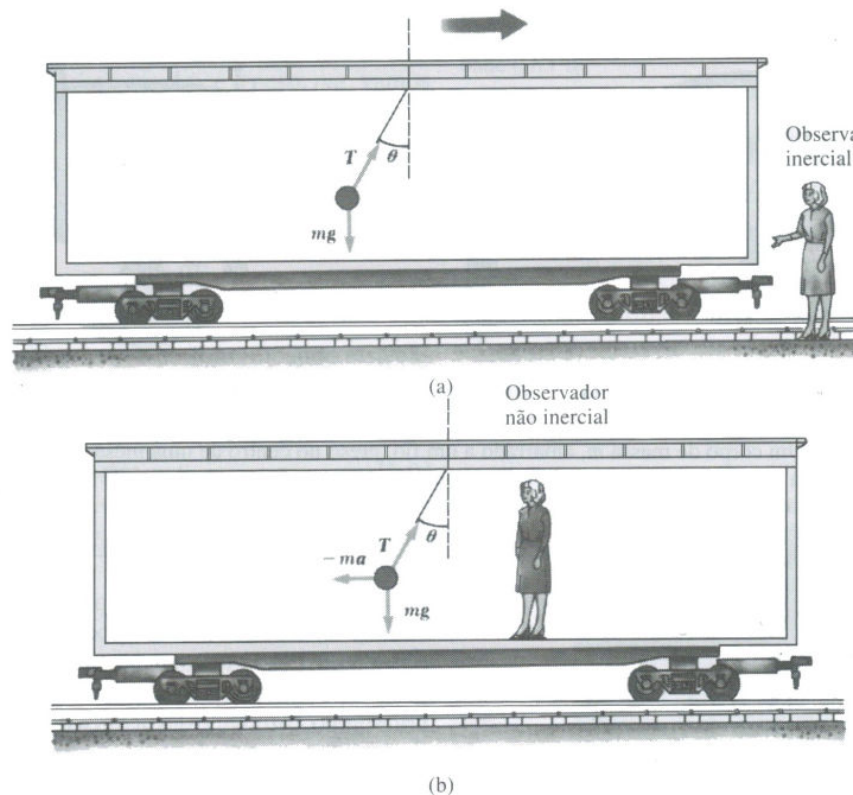


Fig. 6.11 (Exemplo 6.8) (a) Uma esfera, pendurada no teto de um vagão acelerado para a direita, sofre o desvio que aparece na figura. O observador inercial, fora do vagão, afirma que a aceleração da esfera é provocada pela componente horizontal da tensão T . (b) Um observador não inercial, solidário com o vagão, diz que a força líquida sobre a esfera é nula e que o desvio do fio em relação à vertical se deve a uma força fictícia, $-ma$, que equilibra a componente horizontal de T .

Referencial não inercial

EXEMPLO 6.9 Força Fictícia num Sistema Rotatório

Um observador num sistema rotatório é outro exemplo de observador não inercial. Suponhamos um corpo de massa m sobre uma mesa rotatória, horizontal, preso a um fio, como mostra a Fig. 6.12. De acordo com um observador inercial, se o corpo gira uniformemente, tem uma aceleração centrípeta v^2/r , onde v é a velocidade tangencial. O observador inercial conclui que essa aceleração centrípeta é provocada pela força da tensão no fio, T , e escreve a segunda lei de Newton como $T = mv^2/r$.

Para um observador não inercial, solidário com a mesa, o corpo está em repouso. Então para aplicar a segunda lei de Newton, este observador introduz uma força fictícia *para fora*, a chamada *força centrífuga*, cujo módulo é mv^2/r . Segundo, ainda, o observador não inercial, essa força “centrífuga” equilibra a força da tensão e, portanto, $T - mv^2/r = 0$.

É preciso que você tenha cuidado ao usar forças fictícias ou inerciais, para descrever fenômenos físicos. Lembre-se de que as forças fictícias, como a força centrífuga, só são usadas nos referenciais não inerciais, ou acelerados. Ao resolver problemas é, em geral, mais conveniente usar referenciais inerciais.

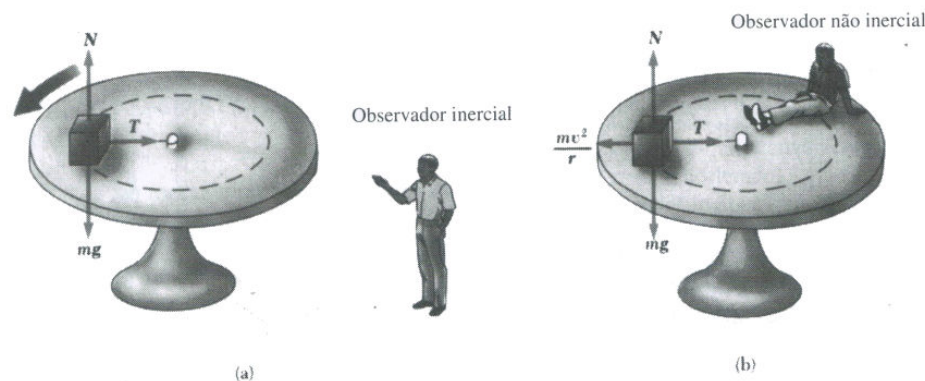
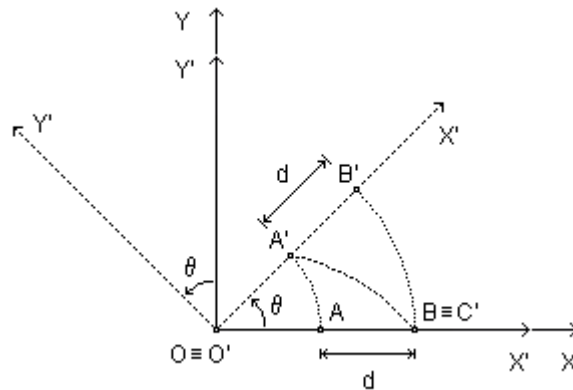


Fig. 6.12 (Exemplo 6.9) Um corpo de massa m , amarrado a um fio, preso no centro de uma mesa rotatória horizontal. (a) O observador inercial afirma que a força centrípeta é proporcionada pela força da tensão no fio, T . (b) O observador não inercial, afirma que o corpo não está acelerado, e introduz, então, uma força centrífuga fictícia mv^2/r , que atua para fora e equilibra a tensão.

Força de Coriolis

Para compreender como aparece a força de Coriolis, considere-se uma partícula que se desloca em MRU sobre o eixo X de um referencial inercial XY, deslocando-se do ponto A ao ponto B durante o intervalo de tempo Δt e, também, o movimento da partícula em um referencial não inercial X'Y' que gira em sentido anti-horário, com velocidade angular de módulo ω em relação ao referencial inercial XY.



Durante o intervalo de tempo Δt , a partícula se desloca do ponto A ao ponto B no referencial XY.

Durante o mesmo intervalo de tempo Δt , a partícula se desloca, no referencial X'Y', do ponto A' ao ponto C', com um movimento curvilíneo. Esse movimento curvilíneo pode ser decomposto em um MRU, do ponto A' ao ponto B' sobre o eixo X', e um MRUV, do ponto B' ao ponto C', na direção do eixo Y' e em sentido contrário àquele considerado como positivo para esse eixo.

No referencial X'Y', a velocidade da partícula entre os pontos A' e B' tem módulo constante dado por:

$$v' = d / \Delta t$$

Por outro lado, neste mesmo referencial, os pontos A e B têm velocidades de módulos:

$$v'_A = \omega r'_A \quad \text{e} \quad v'_B = \omega r'_B$$

de modo que a distância d' , percorrida em MRUV entre os pontos B' e C', pode ser escrita:

$$d' = v'_A \Delta t + \frac{1}{2} a' (\Delta t)^2 = \omega r'_B \Delta t$$

onde r'_A e r'_B representam as distâncias O'A' e O'B', respectivamente, e a' representa o módulo da aceleração ao longo da trajetória curvilínea entre os pontos B' e C', aceleração esta dirigida segundo o eixo Y', mas com sentido contrário àquele escolhido como positivo para ele.

Usando $v'_A = \omega r'_A$ e $r'_B - r'_A = v' \Delta t$, segue-se que:

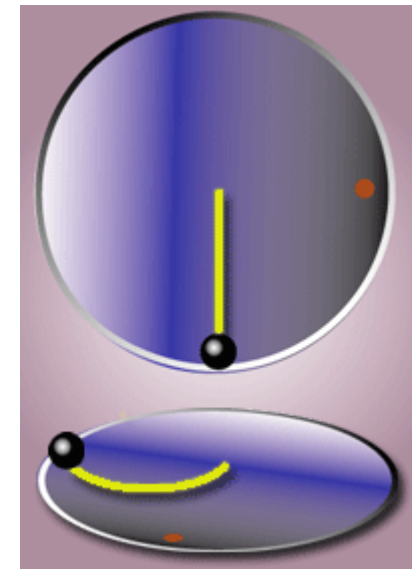
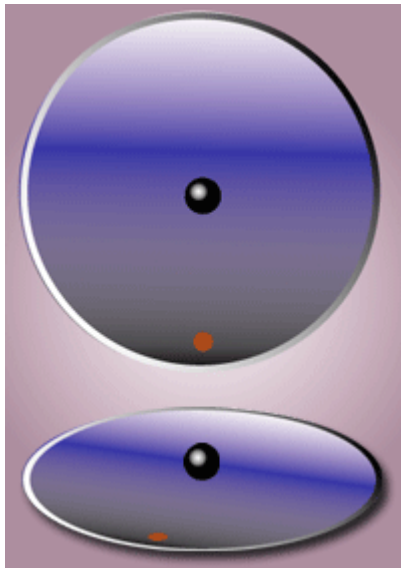
$a' = 2v'\omega$ ou, de forma mais geral:

$$\vec{a}' = 2\vec{v}' \times \vec{\omega}$$

Força de Coriolis

$$\vec{F}_c = m\vec{a} = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$$

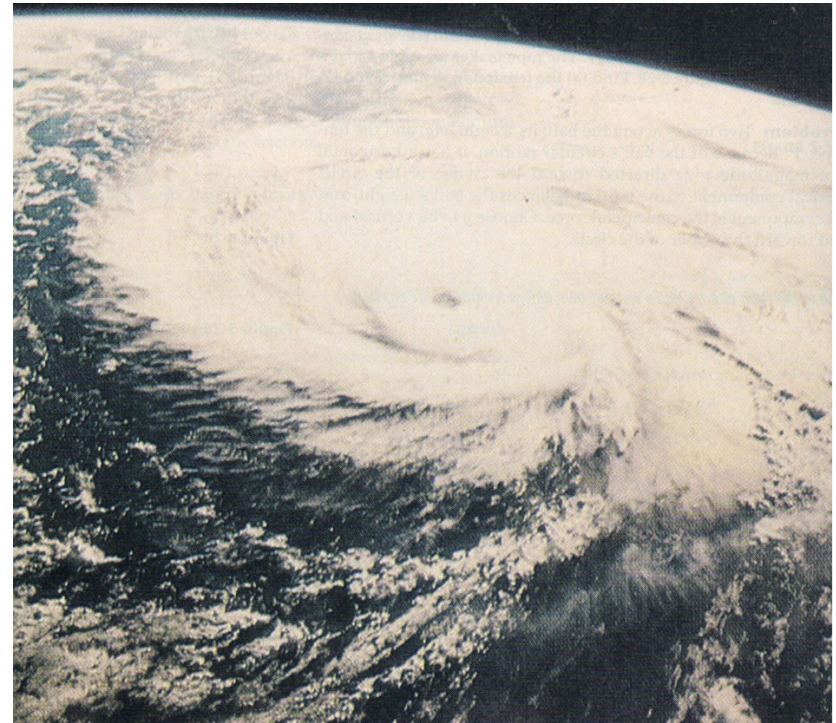
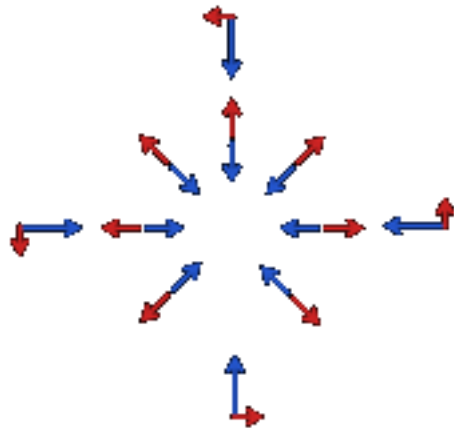
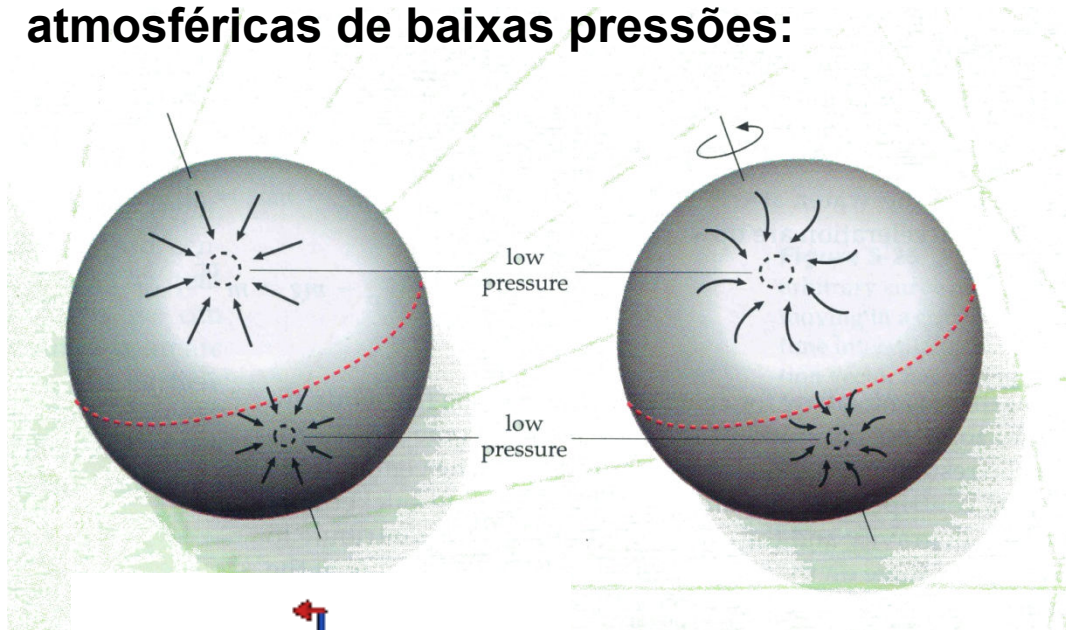
Identifica-se a força de Coriolis como fictícia ou inercial devido ao fato desta existir somente em referenciais em movimento circular em relação a um inercial. Neste caso a força de Coriolis aparece junto com a força centrífuga, e como a força centrífuga, não é uma força na definição precisa do termo, ou seja, real. A força de Coriolis depende da velocidade do corpo em relação ao referencial girante, e é nula, por definição, no caso de um corpo imóvel em relação a este referencial. A força centrífuga, por sua vez, depende da *posição* do corpo em relação ao centro de rotação, e na maioria das vezes não é nula, mesmo para partículas paradas em relação ao referencial em rotação. Pode-se assim dizer que a força centrífuga é o componente estático da força inercial que se manifesta no referencial em rotação enquanto que a força de Coriolis é o componente dinâmico.



Força de Coriolis e Ciclones

$$\vec{F}_c = m\vec{a} = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$$

Na presença de zonas atmosféricas de baixas pressões:



Outros exemplos:
Pêndulo de Foucault e o ralo da pia.

