Museu de Topografia Prof. Laureano Ibrahim Chaffe
Departamento de Geodésia – IG/UFRGS

EFEITO DE EÖTVÖS

Texto original: **Wikipédia, a enciclopédia livre** **Agosto/2010**

Ampliação e ilustração: **Iran Carlos Stalliviere Corrêa-IG/UFRGS**

No início do século XX, uma equipa do Instituto de Geodésia de Potsdam efetuou uma experiência baseada na medida da gravidade, em navios em movimento, nos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico. Enquanto estudava os resultados desta experiência, o físico húngaro **Loránd Eötvös** (*1848-1919*) verificou que os valores eram **menores** quando o navio se movia para **oriente** e **maiores** quando se movia para **ocidente**. Ele identificou este fenômeno como consequência principal da rotação da Terra. Em 1908 foram efetuadas novas medições no Mar Negro com dois navios, um movendo-se para oriente e outro para ocidente. Os resultados provaram a **teoria de Eötvös**. Desde então os geodesistas usam a seguinte fórmula para corrigir a velocidade relativa da Terra durante uma medição gravimétrica.

$$a_r = 2\Omega\mu\cos\phi + \frac{\mu^2 + v^2}{R}$$

Onde:

- Ω - rotação da Terra
- μ - velocidade na direção latitudinal (Este-Oeste)
- ϕ - latitude do lugar do observador
- v - velocidade na direcção longitudinal (Norte-Sul)
- R - raio da Terra

O primeiro termo na fórmula, **$2\Omega u\cos(\phi)$**, corresponde ao **efeito de Eötvös**. O segundo termo é uma refinação que em circunstâncias normais é muito menor que o efeito de Eötvös.

Explicação Física

O **efeito de Eötvös** sofre variação quanto maior for a força ascendente a ser introduzida para manter um corpo em flutuação neutral.

Movimento ao longo do equador

Dando atenção à flutuação, será usado um exemplo com **balões** ou **dirigíveis**. Vamos considerar um dirigível com uma massa de 10 t e com uma velocidade de cruzeiro de 25 m/s (90km/h).

Para calcular o quanto o dirigível necessita para flutuar neutralmente quando este estiver estacionário relativamente à Terra, há que se levar em conta o fato de se ter um movimento de rotação. Sobre o equador, a velocidade de rotação na superfície da Terra é de cerca de 465 m/s. A quantidade de **força centrípeta** necessária para causar o movimento de uma massa ao longo de um caminho circular de raio igual a 6.378 km (raio equatorial da Terra), a 465 m/s, é de cerca de 0,034 newtons por cada quilograma de massa. Para o dirigível de 10 toneladas, essa quantidade é de **340 newtons**. A quantidade de **força de flutuação** necessária é igual à massa do dirigível, multiplicada pela aceleração da gravidade, menos aqueles 340 newtons. Em outras palavras, qualquer objeto que se mova solidariamente com a Terra sobre o equador tem o seu peso reduzido em **0,34%**, graças à rotação da Terra.

Quando circula a 25m/s para oriente, a velocidade total torna-se 465 + 25 = 490m/s, o que requer uma força centrípeta de cerca de 375 newtons. Circulando a 25m/s para ocidente, a velocidade total é 465 - 25 = 440 m/s, necessitando de 305 newtons. Assim, se o dirigível estiver em flutuação neutra enquanto circula para oriente, não continuará a estar em flutuação neutra após uma inversão de marcha. Após a inversão de marcha, o peso de 10 t (10.000 kg) terá um acréscimo de 7 kg, e o dirigível terá de ser compensado para manter o equilíbrio. Por outro lado, num planeta sem rotação, ao efetuar-se a mesma inversão de marcha não seria necessário uma compensação por parte do condutor para manter a flutuação neutra.

Em **meteorologia**, há que se levar em conta este efeito nos modelos de alta precisão. As massas de ar que têm uma velocidade relativa em relação à Terra têm tendência a migrar para outra altitude, pelo que este efeito tem de ser considerado.

Dedução da fórmula para um caso simplificado

Dedução da fórmula para o movimento ao longo do equador.

Um sistema de coordenadas conveniente para esta situação é o sistema de **coordenadas inercial** que se move solidário ao centro de massa da Terra. É válido o seguinte: os objetos que se encontram em repouso na superfície da Terra, com rotação solidária com a Terra, estão a circular em torno do eixo da Terra, com uma força centrípeta respeitante ao sistema de coordenadas inercial.

O que se procura é a diferença entre a **aceleração centrípeta** do dirigível, estando este estacionário em relação à Terra e tendo velocidade respectivamente à Terra.

Notação:

a_u - aceleração centrípeta total quando se move ao longo da superfície da Terra.
a_s - aceleração centrípeta quando se encontra estacionário respectivamente à Terra.
Ω - velocidade angular da Terra: uma revolução por dia Sideral.
ω_r - velocidade angular da massa relativa à velocidade angular da Terra.
$(\Omega + \omega_r)$ - velocidade angular total da massa.
$\omega_r * R = u$ - velocidade da massa relativa à Terra.
R - raio da Terra.

$$a_r = a_\mu - a_s$$

$$a_r = (\Omega + \omega_r)^2 R - \Omega^2 R$$

$$a_r = \Omega^2 R + 2\Omega\omega_r R + \omega_r^2 R - \Omega^2 R$$

$$a_r = 2\Omega\omega_r R + \omega_r^2 R$$

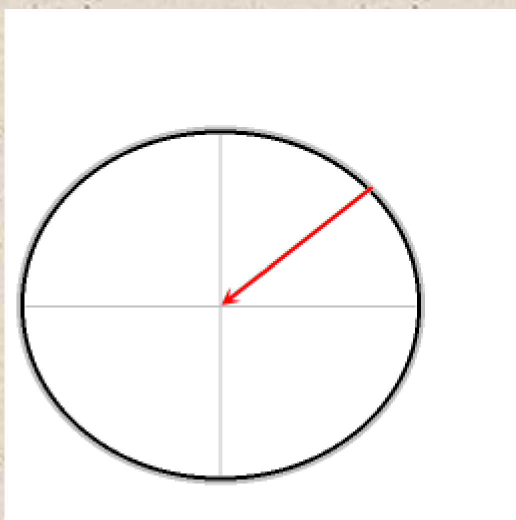
$$a_r = \Omega\mu + \frac{\mu^2}{R}$$

Pode ser verificado facilmente que no caso de movimento ao longo do **equador**, a fórmula, para qualquer latitude, pode ser simplificada para a fórmula seguinte:

$$a_r = 2\Omega\mu\cos\phi + \frac{\mu^2 + v^2}{R}$$

O segundo termo representa a **aceleração centrípeta** necessária para que o dirigível siga a curvatura da Terra. É independente, quer da rotação da Terra quer da direção do movimento. Por exemplo, quando um dirigível que efetue medição gravimétrica, circule sobre um dos pólos a altitude constante, a trajetória do veículo seguirá a curvatura da Terra. O primeiro termo na fórmula é então zero, devido ao cosseno ser zero quando o ângulo (*neste caso a latitude no pólo*) é 90º, e o segundo termo representa então a **aceleração centrípeta** para seguir a curvatura da Terra.

Explicação



A **força da gravidade** e a força normal. A força resultante age como a **força centrípeta** necessária.

A dedução matemática do **efeito de Eötvös** para o movimento ao longo do equador explica o fator 2 no primeiro termo da fórmula de correção de Eötvös.

Devido a esta rotação, a Terra não tem uma forma esférica, sendo achatada nos pólos e alargada no equador. O vetor da força da gravidade está dirigido para o centro da Terra. A força normal é perpendicular à superfície local.

Nos **pólos** e no **equador**, a força da gravidade e a força normal têm o mesmo módulo mesma direção e sentidos opostos. A qualquer outra latitude intermediaria, essas forças não têm a mesma direção, pelo que há uma força resultante que aponta para o eixo da Terra. A qualquer latitude existe uma quantidade precisa de força centrípeta que é necessária para manter uma espessura regular da camada atmosférica.

Novamente o exemplo do dirigível é conveniente para explicar as forças aplicadas. Quando o dirigível tem uma velocidade relativa à

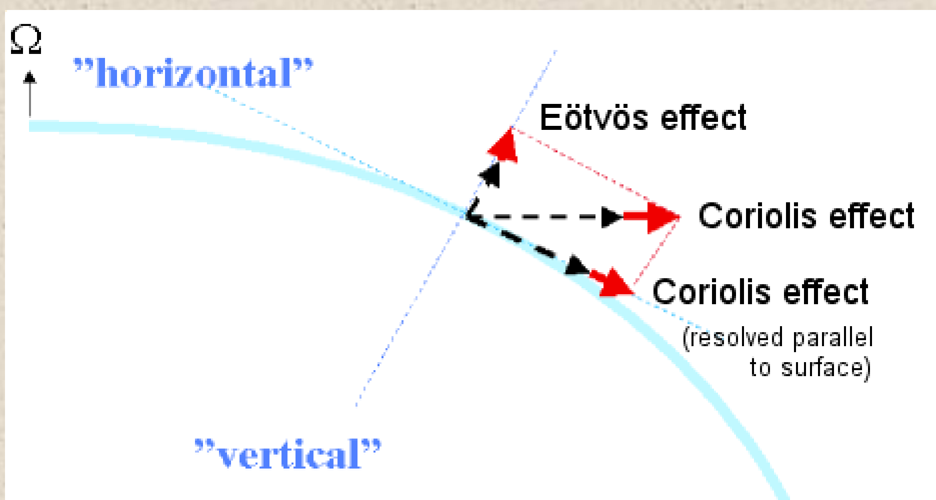
Terra na direção latitudinal então o peso do veículo não é o mesmo de quando está estacionário em relação à Terra.

Se o dirigível tiver um movimento no sentido Oeste-Este, então terá tendência a um aumento de velocidade, representando uma diminuição do peso, comparado com o peso que teria numa situação estacionária relativa à Terra.

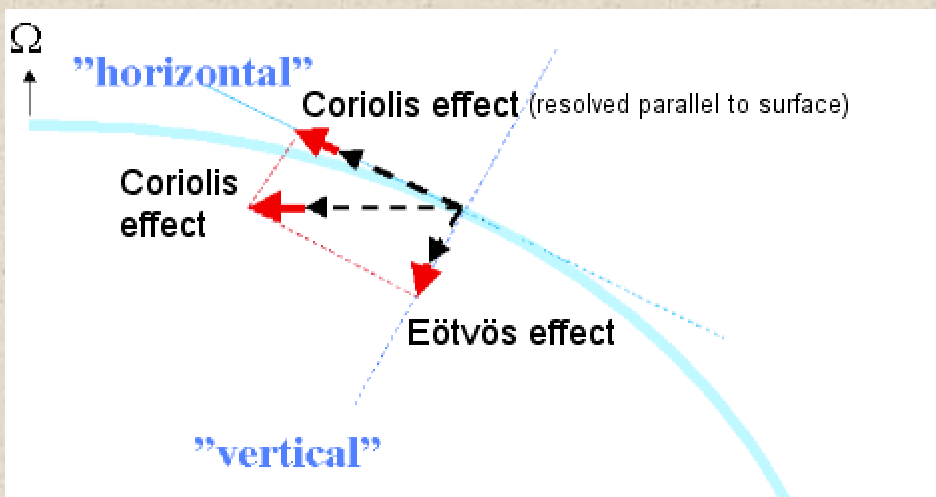
Se o dirigível tiver um movimento no sentido Este-Oeste, então terá tendência a perder velocidade, representando um aumento do peso.

O primeiro termo do **efeito de Eötvös** é proporcional à componente da força centrípeta necessária perpendicular à superfície local da Terra, e é assim descrita por uma lei do cosseno: quanto mais próximo do equador, mais forte é o efeito.

Movimento ao longo de uma latitude de 60 graus



O efeito de Eötvös para um objeto em movimento para leste ao longo de uma latitude de 60º. O objeto tende a afastar-se do eixo da Terra.



O efeito de Eötvös para um objeto em movimento para oeste ao longo de uma latitude de 60º. O objeto tende a aproximar-se do eixo da Terra.

Um objeto localizado a 60º de latitude, movendo-se solidário com a Terra, percorre uma trajetória circular, com um raio de cerca de 3.190 km e uma velocidade de cerca 233 m/s.

Essa trajetória circular requer uma **força centrípeta** de cerca de 0,017 newtons para cara quilograma de massa, 170 newtons para um dirigível de 10.000 kg. Para calcular o **efeito de Eötvös** a uma latitude de 60º de latitude, a componente que é perpendicular à superfície local (*vertical local*) é tomada, o que aos 60º de latitude é metade da força total. Assim, a essa latitude, qualquer objeto movendo-se solidário à Terra tem o seu peso reduzido em 0,08% graças à rotação da Terra.

Quando o dirigível circula a 25m/s para **oriente**, a velocidade total torna-se 233+25 = 258, o que requer uma força centrípeta de cerca de 208 newtons e uma componente vertical local de cerca de 104 newtons. Circulando a 25m/s para ocidente, a velocidade total torna-se 233-25 = 208m/s, o que requer uma força centrípeta de cerca 135 newtons e uma componente vertical local de cerca de 68 newtons. Assim, após fazer uma inversão de marcha o dirigível terá de ser reequilibrado pelo condutor, devido à diferença de 4 kg necessárias para a nova força de flutuação neutra.

Os diagramas também mostram a componente na direção paralela à superfície local. Em **meteorologia** e **oceanografia**, é costume referir-se aos efeitos da componente paralela à superfície local como a força de Coriolis.

Referências

- O efeito de Coriolis. PDF. 870 KB 17 páginas. Discussão entre o meteorologista Anders Persson sobre vários aspetos da geofísica cobrindo o efeito de Coriolis sobre como é tido em consideração na Meteorologia e Oceanografia, o efeito de Eötvös o pêndulo de Foucault e as colunas de Taylor.

Obtida de: