

**MUSEU DE TOPOGRAFIA PROF. LAUREANO IBRAHIM CHAFFE**  
**DEPARTAMENTO DE GEODÉSIA – UFRGS**

**GRAVIMETRIA**

**Texto original de:**

<http://www.cartografia.eng.br/artigos/gravimetria.asp>  
*Conceitos Básicos de Gravimetria*

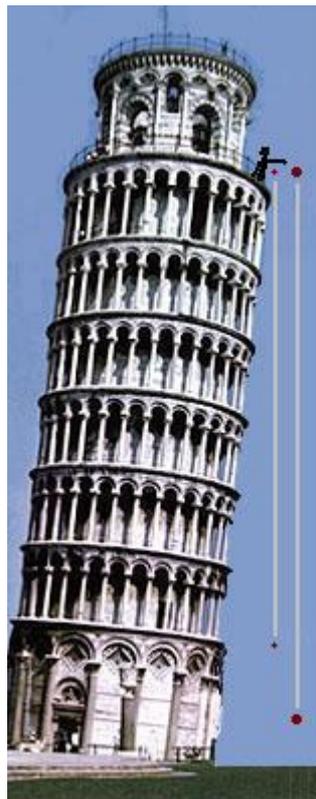
**Ampliação e ilustrações de autoria de;**

***Iran Carlos Stalliviere Corrêa***

Museu de Topografia Prof. Laureano Ibrahim Chaffe – Porto Alegre-RS

***Medições da Força da Gravidade***

Há 400 anos Galileu Galilei realizou suas experiências com a gravidade observando corpos em queda livre na torre de Pisa.



*Experiência de Galilei sobre a gravidade, junto a Torre de Pisa*

Uma questão que inquietou muito os cientistas do século XVII foi a conclusão a que chegou Galileu Galilei (1564 -1642), de que os corpos quando abandonados juntos, de uma mesma altura, atingem o solo ao mesmo tempo.

Desde a Grécia antiga, os Aristotélicos acreditavam que o tempo de queda de dois corpos de diferentes massas, abandonados de uma mesma altura, era diferente. Para eles, quanto maior a massa dos corpos, mais rápidos eles alcançariam seu estado natural: **o solo**.

Essa idéia perdurou por quase dois mil anos, até que Galileu resolveu analisar o movimento de queda dos corpos seguindo uma metodologia científica. Após muitos experimentos, ele chegou a seguinte conclusão:

***Dois corpos de massas distintas, abandonados juntos de uma mesma altura, caem simultaneamente, atingindo o solo ao mesmo tempo.***

A aceleração gravitacional que Galileu determinou para a queda livre de um corpo foi de  $5 m.seg^{-2}$ .

Desde então, a distribuição gravitacional da Terra tem se tornada mais bem conhecida graças ao aumento na precisão das medidas da gravidade.

A pesquisa gravimétrica mede a **Aceleração da Gravidade "g"**. O valor médio de "g", observado na superfície da Terra, é de  $9,80 m.s^{-2}$ .

A **Atração Gravitacional** depende da densidade das rochas de sub-superfície, ocasionando com que "g" varie de ponto para ponto da superfície da Terra.

A **Densidade "p"** é o parâmetro físico ao qual a gravimetria responde.

### ***Exemplos:***

- **MicroGravidade:** Localização de cavidades subterrâneas, localização de tumbas geológicas (*baixa densidade do ar em relação ao solo*);

- **Pequena Escala:** Mapeamento do leito topográfico (*alta densidade do leito em relação ao solo*), exploração mineral (*alta densidade de massa em relação à rocha hospedeira*);

- **Média Escala:** Localização de domos de sal na exploração de petróleo (*baixa densidade do sal em relação aos sedimentos*);

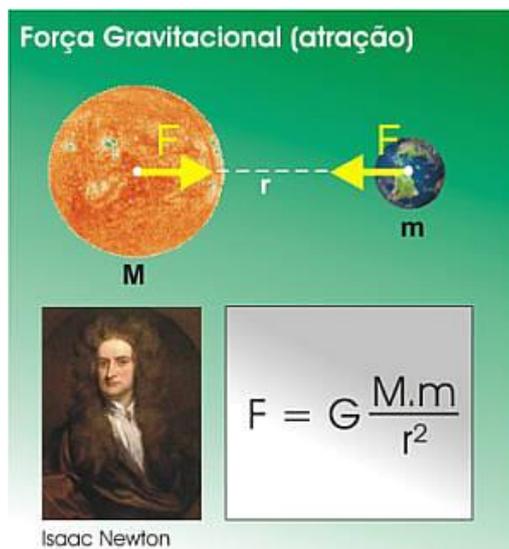
- **Larga Escala:** Estimativa de espessura da crosta (*baixa densidade da crosta em relação à maior densidade do manto*).

### **As Leis de Newton da Gravitação**

A pesquisa gravimétrica é baseada na **Lei da Gravitação Universal** de Newton (1642-1727), descrita no livro "*Principia Mathematica*", em 1687.

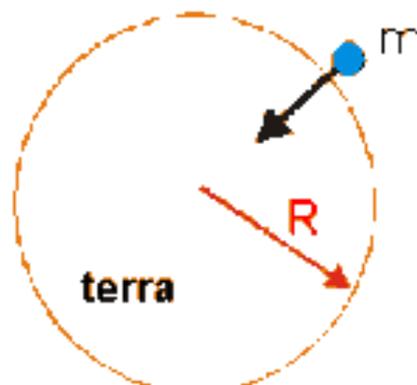
### **A Lei da Gravitação Universal de Newton**

A força de atração entre dois corpos de massas conhecidas é diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles.



Onde "M" e "m" são as massas dos dois corpos, e "r" a distância entre eles, e "G = 6,67.10<sup>-11</sup> Nm<sup>2</sup>.kg<sup>-2</sup> é a Constante Gravitacional".

### **Na Terra**



Entre a Terra, de massa "M" e raio "R", e um corpo de massa "m" em sua superfície, existe uma **energia potencial gravitacional** dada por:

$$E_p = -\frac{g.M.m}{R}$$

Onde "gM" é o peso da massa, e "g" é a aceleração da gravidade, ou na média,  $9,80 \text{ ms}^{-2}$ .

### **Unidades de Gravidade**

Galileu realizou a primeira medida da aceleração devida à gravidade, deixando objetos cair da torre inclinada de Pisa. Em homenagem a Galileu, a **Unidade de Gravidade** no sistema c.g.s. é chamada **Gal**.

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm.s}^{-2}$$

Os atuais medidores de gravidade são extremamente sensíveis e podem medir "g" em uma (1) parte por bilhão ( $10^9$ ) (*Equivalente a medir a distância da Terra à Lua com precisão de 1 metro*).



Gravímetro

Assim a Unidade c.g.s., normalmente utilizada nas medidas de gravidade é o **miliGal**.

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-3} \text{ cm.s}^{-2}$$

No sistema m.k.s. (SI) a Gravidade é medida em  $m.s^{-2}$  ou **u.g.** (*Unidade de Gravidade*).

$$10 \text{ u.g.} = 1 \text{ mGal}$$

Ambos "**mGal**" e "**u.g.**"; são medidas normalmente usadas na pesquisa gravimétrica.

### **Exemplo:**

Qual é o valor de "g" em mGal ?

$$g = 9,8 \text{ ms}^{-2} = 980 \text{ cms}^{-2} = 980.000 \text{ mGal} = 9.800.000 \text{ u.g.}$$

### **Precisão das Medições Gravimétricas**

Na Terra = 0,1 u.g. No Mar = 10 u.g. (*devido ao movimento da embarcação*).

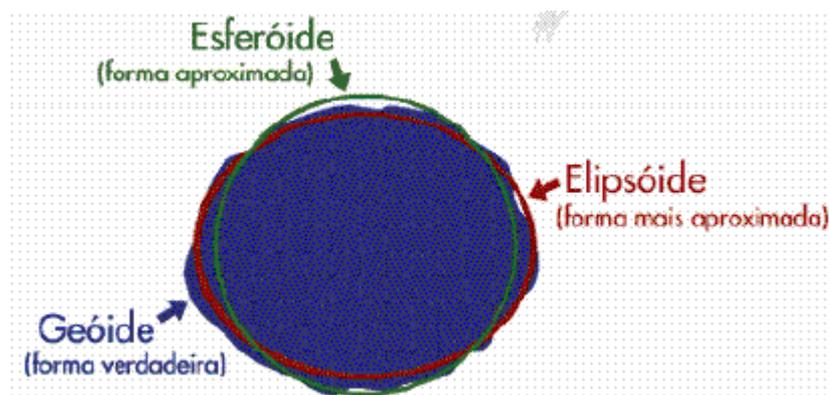
### **Forma da Terra**

Se a Terra fosse uma esfera uniforme, "**g**" seria uma constante. No entanto, a gravidade varia com a variação da densidade da Terra, e a Terra não é uma esfera perfeita.

A Terra tem a forma de uma esfera achatada nos pólos devido a seu movimento de rotação.

O raio é maior no Equador devido a maior força centrífuga que tende a acelerar a massa central, dirigindo-a para fora de seu centro.

$$\text{Raio do Equador} = \text{Raio do Pólo} + 21 \text{ km} = 6378 \text{ km}$$

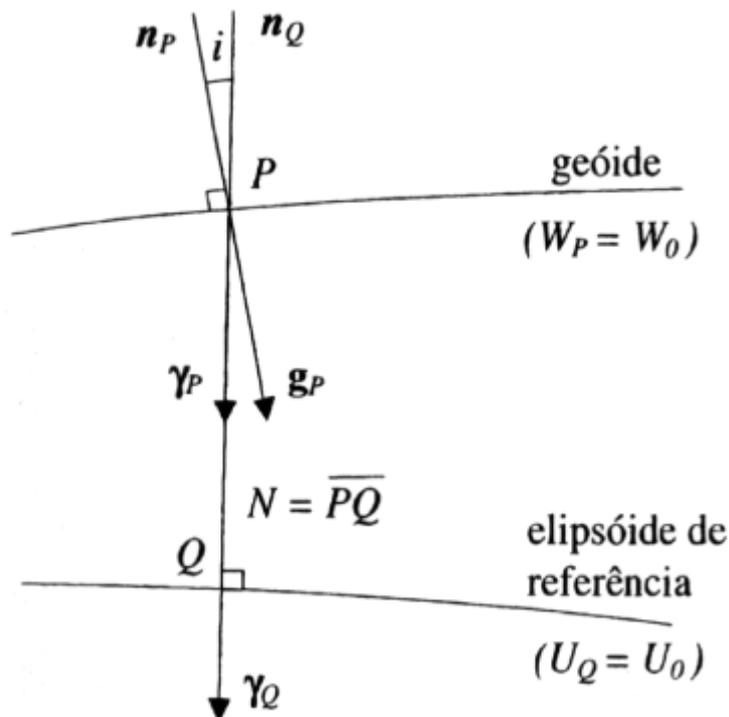


O formato da Terra é descrito matematicamente como uma "**Elipse de Rotação**". A topografia da superfície da Terra é também um importante fator a ser levado em conta na medição da gravidade.

A superfície média do mar, desprezando-se os efeitos das marés e dos ventos, prolongada continente adentro, vem a formar o que chamamos de **GEÓIDE**.

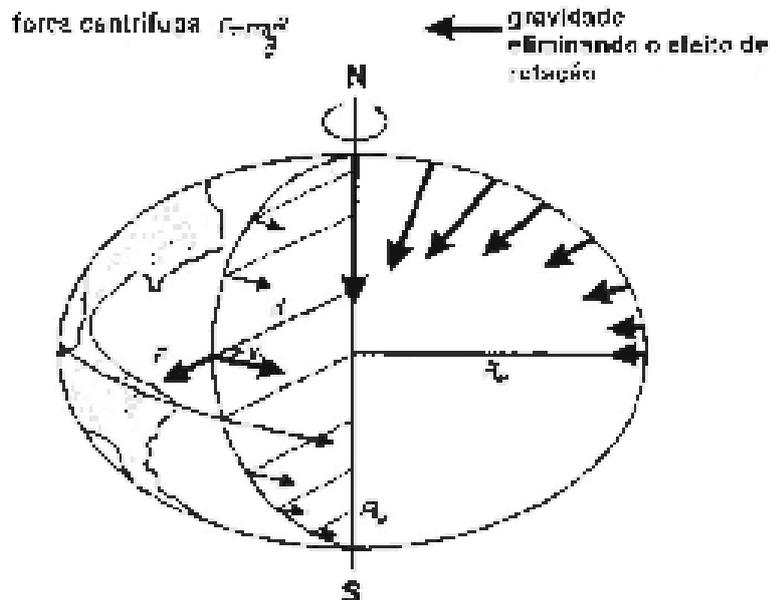
O Geóide representa uma superfície na qual o Campo Gravitacional tem o mesmo valor, e por isso é chamada de **Superfície Equipotencial**. (Se o valor da gravidade variasse, existiria uma força gravitacional que forçaria a água a fluir de um lugar ao outro).

A força da atração Gravitacional é um vetor, e é em todos os lugares perpendicular ao Geóide.



### **Variação da Gravidade com a Latitude**

A gravidade é 51.860 u.g. maior nos polos que no Equador. A aceleração, devido à gravidade, varia com a latitude devido a dois efeitos:



1 - A forma da Terra

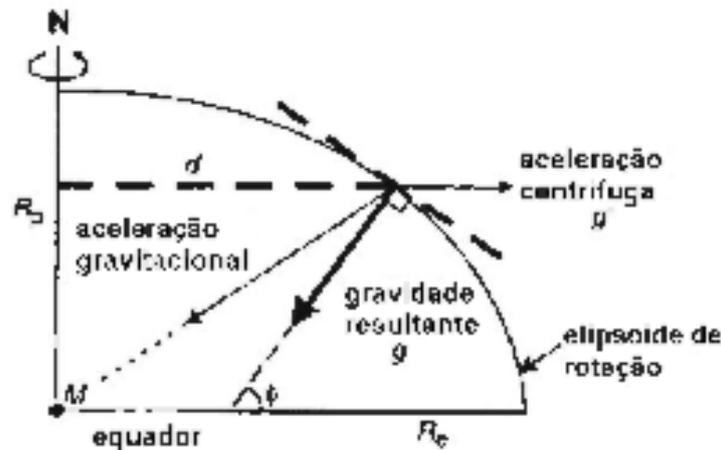
2 - A rotação da Terra. (A aceleração centrífuga diminui o valor de "g"). Este efeito é maior no equador onde a velocidade rotacional é maior, 1.674 km/h. Nos polos este efeito é zero.

Para uma elipse uniforme de rotação, a medida da gravidade é a resultante do vetor atração gravitacional e do vetor aceleração centrífuga.

Latitude (graus)	Valor de g (aceleração da gravidade em m/s <sup>2</sup> )
0	9,780
10	9,782
20	9,786
30	9,793
40	9,802
50	9,812
60	9,813
70	9,826
80	9,831
90	9,837

Aceleração da gravidade conforme a Latitude

## Fórmula Internacional da Gravidade



Em 1743 **Alexis Claude Clairaut** deduziu a fórmula que expressa a variação da gravidade com a latitude.

$$g_{\phi} = g_0(1 + \alpha \cdot \text{sen}^2 \phi - \beta \cdot \text{sen}^2 \phi)$$

Onde "**g<sub>0</sub>**" é o valor da gravidade ao nível do mar na linha do equador e **φ** é a latitude.



*Alexis Claude Clairaut (1713-1765)*

## Densidades do Material Geológico

É preciso saber com precisão o valor da densidade das rochas para poder se interpretar as informações dos resultados das medições da gravidade. A densidade é medida em  $\text{g.cm}^{-3}$ .

As rochas sedimentares exibem a maior faixa de variação de densidade. Tipicamente o contraste entre camadas adjacentes de rochas sedimentares é menor que  $2,3 \text{ g.cm}^{-3}$ .

<b>Densidades típicas de algumas rochas</b>
Basalto – 3,0 g/cm <sup>3</sup>
Granito – 2,7 g/cm <sup>3</sup>
Arenito – 2,3 g/cm <sup>3</sup>

## **Medições da Gravidade**

Há basicamente dois tipos de medidas da gravidade.

### **1) Gravidade Absoluta**

Esta é medida sob condições de laboratório, utilizando experimentos cuidadosos, podendo ser empregado dois métodos;

- Corpo em queda;
- Pêndulo

Utilizado para fornecer valores absolutos de “**g**” como padrões nacionais.

### **2) Gravidade Relativa**

Na maioria das aplicações, somente a variação da **gravidade relativa** a uma estação principal é necessária.

As leituras das medições são gravadas em estações secundárias para que as diferenças relativas sejam bem conhecidas.

O espaçamento das estações varia;

- 2 a 3 km<sup>2</sup> para pesquisas regionais;
- 8 a 10 por km<sup>2</sup> para pesquisa de hidrocarbonetos;
- 5 a 50 m para trabalhos de precisão, como arqueologia;
- 0,5 m para trabalhos de microgravidade.

## **Instrumentos**

### **Medidor de Gravidade baseado em pêndulo**

A Gravidade foi medida com um pêndulo em 1749 por Pierre Bouguer. O método foi comumente usado até a década de 30 do século passado, na pesquisa dos hidrocarbonetos.



*Pierre Bouguer (1698-1758)*

Em 1735, Bouguer viaja pelos Andes com Charles Marie de La Condamine e Louis Godin com o propósito de medir um grau do meridiano próximo do equador. Foram necessários dez anos para completar esta tarefa, cujo relato é publicado em 1749 em **Détermination de la Figure de la Terre** (*Determinação da forma da Terra*). Durante esta viagem, efetuou observações **gravimétricas** em altitude, pondo em evidência a anomalia que tem o seu nome.

### **Período de um pêndulo**

A gravidade é inversamente proporcional ao quadrado do período de oscilação "**T**", de um pêndulo oscilante.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \left( 1 + \frac{\text{sen}^2 \theta}{16} \right)}$$

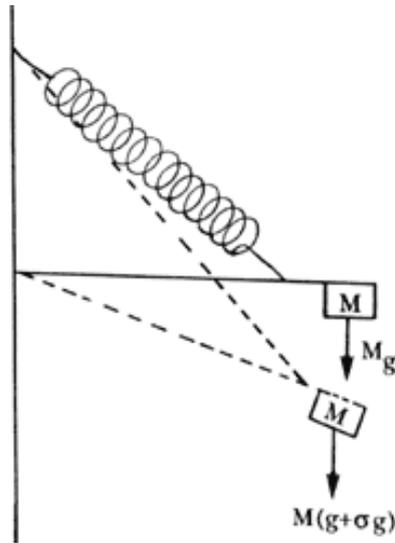
Onde "**L**" é o comprimento do pêndulo, "**g**" a aceleração da gravidade e " $\theta$ " é o ângulo formado entre a vertical e a posição do pêndulo.

Se o pêndulo oscilar em idênticas condições em dois locais, a diferença relativa de "**g**" pode ser achada;

### **Gravímetros de mola**

Os gravímetros são essencialmente uma massa suspensa por um

sistema sofisticado de molas, e têm sido usados para medir a **gravidade relativa**, desde a década de 30 do século passado.



Como o peso da massa (massa x gravidade) aumenta, a mola se estende.

### **A Lei de Hooke**

A **lei de Hooke** é a lei da física relacionada a elasticidade de corpos, que serve para calcular a deformação causada pela força exercida sobre um corpo, tal que a força é igual ao deslocamento da massa a partir do seu ponto de equilíbrio, vezes a característica constante da mola ou do corpo que sofrerá deformação:

$$F = k.\Delta l$$

A quantidade da extensão da mola é proporcional à força solicitante.

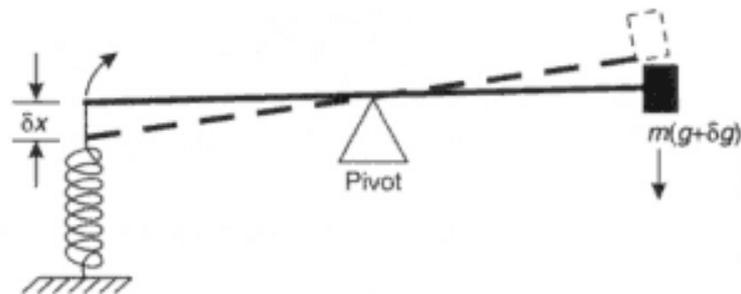
Em gravimetria, a força solicitante é a variação da gravidade, sendo a constante da mola, "**k**" conhecida.

As variações de "**g**" são pequenas, assim as extensões da mola são mínimas. Para uma mola de 30 cm de comprimento, a variação em seu comprimento é de  $3.10^{-8}$  (30nm), o qual é menor que o comprimento da luz em 500 nm.

Assim são necessários mecanismos para amplificar o efeito da distensão da mola.

### Gravímetros Estáveis

**Gravímetros estáveis** consistem de uma massa fixa no fim de uma haste, com pivots em um fulcro, e balanceado por uma mola tensionada.

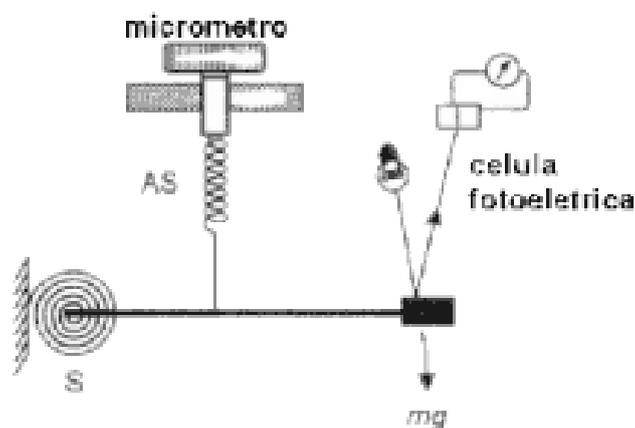


A mudança na gravidade afeta o peso da massa o qual é balanceado pela força restauradora da mola

### Gravímetro Askania

No **gravímetro Askania**, a haste é equilibrada na mola principal. Um feixe de luz é refletido a uma célula fotovoltaica.

A deflexão da massa altera a direção do feixe luminoso e altera a voltagem no circuito.



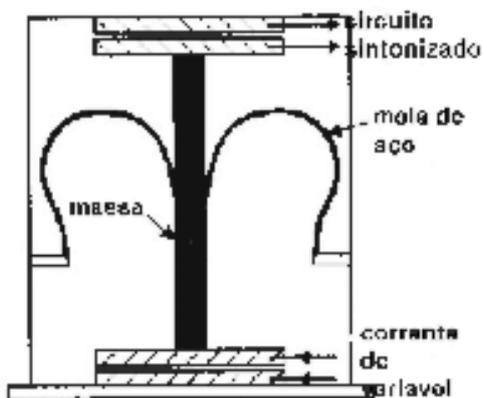
## **Gravímetros Estáveis utilizando Amplificação Elétrica**

Alguns gravímetros, incluindo o usual SCINTREX CG-3, usam a pequena extensão de massa para alterar a capacitância em um circuito elétrico.

### **Gravímetro Boliden**

A massa está na forma de uma bobina com duas placas de metal suspensas entre duas outras placas de metal.

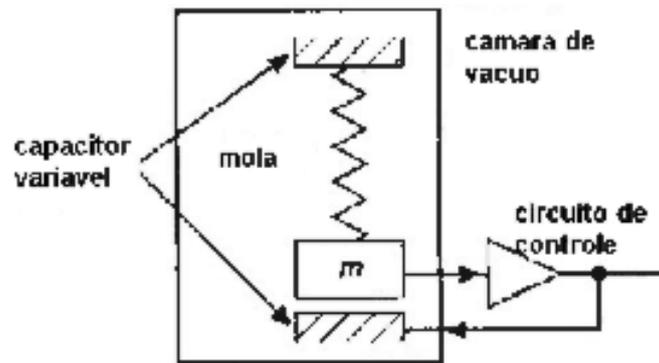
A variação da gravidade move a massa e muda a capacitância entre as placas, detectadas por um circuito sintonizado.



### **Gravímetro Scintrex CG-3**



*Gravímetro SCINTREX CG-3*



Este utiliza circuito de realimentação para restaurar a massa na posição zero.

### **Gravímetros Instáveis (Astaticos)**

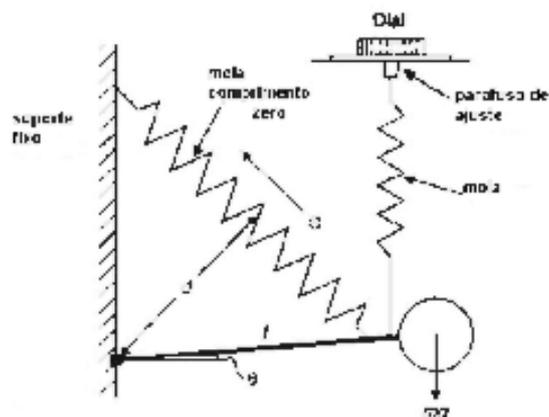
Em um sistema estável, a massa retornará a posição de equilíbrio após pequenas perturbações. Nos sistemas instáveis, a massa continua a se mover.

### **Exemplos**

Estáveis - Um lápis repousando em uma mesa. Levante um lado, ele cai de volta à mesa

Instáveis - Um lápis em pé. Empurre-o e ele cai.

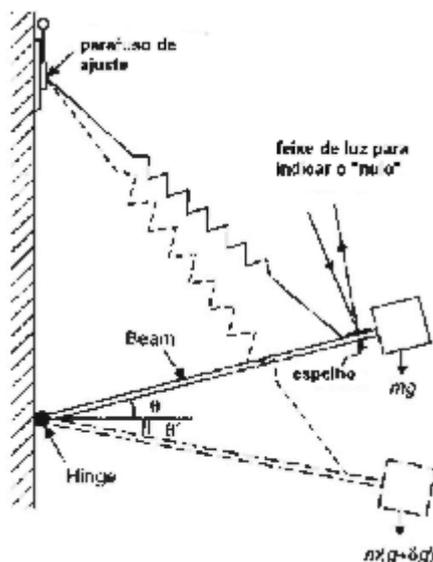
**Gravímetros Instáveis** usam a instabilidade mecânica para exagerar o pequeno movimento devido à variação da gravidade.



A variação no valor da gravidade distende a mola, mas encurta " $d$ ", reduzindo o aumento na força de restauração e permitindo assim

uma variação maior do movimento. (É necessário ajustar precisamente).

### **Gravímetro Instável LaCoste-Romberg**



A mola é feita de metal com alta condutividade térmica, para minimizar o efeito da expansão térmica.

A mola é pretensionada na fábrica. (*Comprimento zero*)

A leitura é efetuada em um visor que mostra a luz refletida do feixe.

É utilizado o ajuste de nulo por parafuso micrométrico.

A precisão vai a 0,03 u.g.

### **Gravímetros utilizados em embarcações**

Os que são utilizados em medições estáticas - Usam instrumentos de controle remoto.

Para medições contínuas - **Gravímetros** são estabilizados contra o efeito das inclinações das embarcações.

São utilizadas variações de gravímetros do tipo LaCoste-Romberg.

## **Correções**

Fator de calibração do gravímetro.

Correção do Geóide

## **Anomalias da Gravidade**

A diferença entre as anomalias observadas e o valor da Fórmula Internacional da Gravidade, no mesmo local é a chamada **Anomalia Gravitacional**.

## **Marés Terrestres**

A Terra também responde a gravidade do Sol e da Lua como os oceanos, mas o movimento é muito menor. As correções são feitas por leituras repetidas na mesma estação.

## **Correção do Ar Livre**

Correção da redução na gravidade devido à altura sobre o Geóide, independente das rochas existentes abaixo.

A **correção do ar livre** é a diferença entre a gravidade medida ao nível do mar e em uma elevação, "h", no espaço livre.

$$\text{Correção do ar livre} = 3,086 \text{ u.g./m}$$

Com a precisão atual das medições gravimétricas, de 0,1 u.g., a elevação pode ser conhecida na faixa de 5 cm.

## **Anomalia do Ar livre**

## **Correções do terreno**

Precisam ser aplicadas onde medições são realizadas próximas às montanhas ou vales.

Se a estação estiver próxima as elevações, há uma força extra para cima atuando no gravímetro, que reduz a leitura.

Se a estação estiver próxima a um vale, existe uma ausência de forças para baixo, afetando o instrumento.

As correções de terreno podem ser computadas usando máscaras, como as chamadas **Cartas Hammer**.

### **Correção EOTVOS**

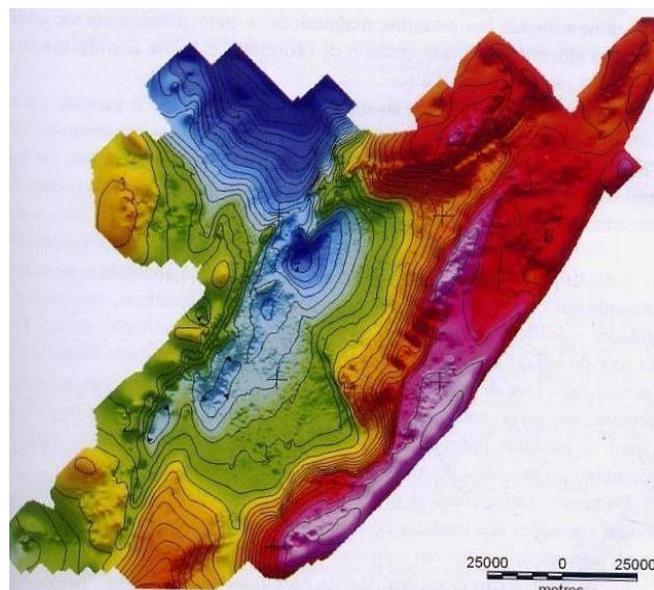
Se o gravímetro está se movendo em um veículo, como em um navio ou aeroplano, ele é afetado pela componente vertical da aceleração, **efeito Coriolis** a qual depende da velocidade e direção do movimento.

### **Anomalias Gravitacionais**

A interpretação de dados geofísicos não é única, porém como muitas interpretações, pode ser ambígua.

Anomalias gravitacionais refletem a estrutura da densidade da massa da terra e são tratadas como informações básicas no mapeamento de pesquisa e na investigação das estruturas subterrâneas.

Como exemplo, no Japão, mapas de anomalias gravitacionais do arquipélago japonês são publicados periodicamente com uma precisão de 2 mGal.



*Mapa Bouguer da Bacia do Recôncavo, BA. As cores vermelha, verde e azul indicam embasamento progressivamente mais profundo*



*Gravímetro absoluto transportável IMGC-02.*

## **Referência Bibliográfica**

"Introdução a Geofísica", Simon Fraser University

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Gravimetria>

<http://www.cartografia.eng.br/artigos/gravimetria.asp>

[http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://www.geocities.com/ussgeology/index\\_arquivos/geologiadopetroleo\\_arquivos/figurasgeologiapetroleo/cap03gpf03.jpg&imgrefurl=http://www.geocities.com/ussgeology/index\\_arquivos/geologiadopetroleo.htm&usg=\\_\\_jItGyxybuioSa2zKYt4Qsk88-kM=&h=620&w=667&sz=71&hl=pt-BR&start=5&tbnid=2S\\_X7zNynlWi5M:&tbnh=128&tbnw=138&prev=/images%3Fq%3Dmapa%2Bgravimetrico%26gbv%3D2%26hl%3Dpt-BR%26sa%3DG](http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://www.geocities.com/ussgeology/index_arquivos/geologiadopetroleo_arquivos/figurasgeologiapetroleo/cap03gpf03.jpg&imgrefurl=http://www.geocities.com/ussgeology/index_arquivos/geologiadopetroleo.htm&usg=__jItGyxybuioSa2zKYt4Qsk88-kM=&h=620&w=667&sz=71&hl=pt-BR&start=5&tbnid=2S_X7zNynlWi5M:&tbnh=128&tbnw=138&prev=/images%3Fq%3Dmapa%2Bgravimetrico%26gbv%3D2%26hl%3Dpt-BR%26sa%3DG)