

# GRAVIMETRIA

## 6. Reduções gravimétricas

- As reduções gravimétricas, através da determinação dos efeitos do terreno em excesso sobre o valor da gravidade medida, surge como um requisito obrigatório;
- Na abordagem de Stokes, o geóide é a superfície de fronteira (que divide espaço interior do exterior), sobre o qual devem ser conhecidos os valores de anomalias da gravidade assumidos como valores de fronteira tal como definidos na E.F.G.F.;
- Isto significa, que as massas exteriores à superfície do geóide devem ser removidas, para que o potencial  $T$ , e consequentemente, a ondulação do geóide  $N$ , seja uma função harmónica sobre a fronteira e no seu espaço exterior;

# GRAVIMETRIA

## 6. Reduções gravimétricas

- A solução de Stokes resulta da resolução do 3º Problema de Fronteira, através da integração dos valores de anomalias da gravidade assumidos como valores de fronteira

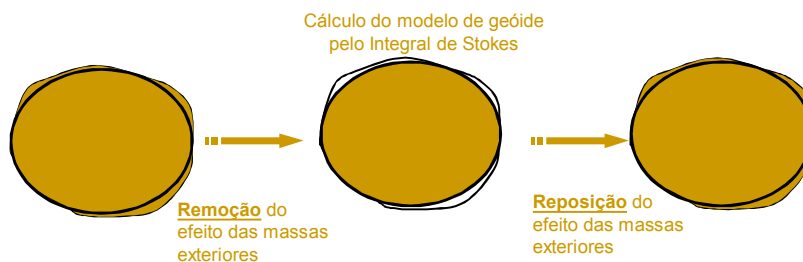
$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \\ \Delta g_p = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{R} T \end{cases} \quad T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma$$

- Com  $N = \frac{T}{\gamma}$  resulta  $N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma$

# GRAVIMETRIA

## 6. Reduções gravimétricas

- Na prática, são calculados os efeitos de atracção gravitacional dessas massas em excesso a remover dos valores observados de anomalias, e posteriormente, repostos sobre a forma de ondulações (efeito indirecto);
- É usada a chamada “**Técnica de Remoção - Reposição**”.



Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6. Reduções gravimétricas

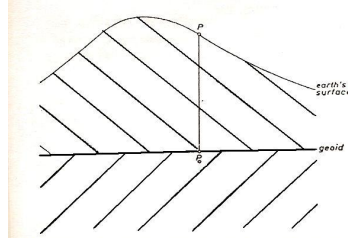
- As reduções gravimétricas servem de ferramenta a 3 aplicações principais:
  1. Determinação do geóide;
  2. Interpolação de valores de gravidade;
  3. Estudo e investigação da crosta terrestre;
- Só as duas primeiras aplicações são de natureza geodésica, a 3ª aplicação é do interesse da Geofísica e Geologia;
- A redução é feita em duas etapas: 1ª - as massas topográficas são totalmente removidas e/ou deslocadas para o interior do geóide; 2ª - a estação gravimétrica é transladada da superfície topográfica para a superfície do geóide;
- A 1ª etapa requer o conhecimento da densidade das massas topográficas que são removidas;

Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6. Reduções gravimétricas



- A remoção das massas exteriores, através das reduções gravimétricas, regulariza a superfície física terrestre, permitindo uma adequada determinação do campo gravítico;
- As irregularidades do campo gravítico devido à diferença de altitude das estações são também removidas, permitindo maior rigor na interpolação dos valores da gravidade;

# GRAVIMETRIA

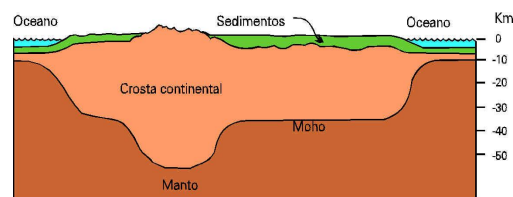
## 6. Reduções gravimétricas

- As correcções de redução de valores da gravidade são:
  1. Redução Ar-livre;
  2. Correção de terreno;
  3. Redução de Bouguer;
  4. Redução isostática;
- A 1ª correcção corresponde somente à translação da posição da estação de observação;
- A 2ª e 3ª correspondem à remoção das massas exteriores ao geóide;
- E, a 4ª correcção resulta do princípio de equilíbrio isostático em que se encontra a crosta terrestre; e ainda, do facto de as anteriores não removerem completamente os efeitos das massas exteriores.

# GRAVIMETRIA

## 6.1 Efeitos topográfico e Isostático

- A crosta encontra-se em equilíbrio isostático;
- O efeito das massas redundantes acima do geóide é compensado pela menor densidade das massas subjacentes;
- Nos oceanos, a deficiência das massas é compensada pela maior densidade das massas sob o geóide;
- O geóide, sendo equipotencial, não é muito afectada pela presença de uma superfície topográfica irregular;



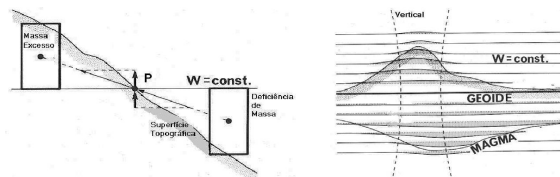
Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6.2 Correção de terreno

- As superfícies equipotenciais afastam-se na presença de topografia (de montanhas);
- As observações gravimétricas realizadas na superfície topográfica são fortemente afectadas pela topografia e o seu efeito é tanto maior quanto maior for a elevação da estação;
- Um excesso de massa  $+\Delta m$  acima do ponto P exerce uma atracção no sentido ascendente, diminuindo o valor da gravidade no ponto;
- Uma deficiência de massa  $-\Delta m$  abaixo do ponto P provoca também uma diminuição do valor de g em P;



Geodesia Física – Aula 12

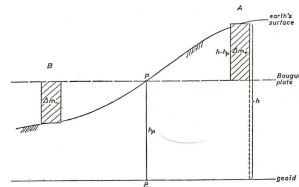
FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6.2 Correção de terreno

- A correção de redução do valor da gravidade devido ao efeito de terreno é dada por:

$$\delta g_t = -G\rho h_p \iint_{X_1, Y_1}^{X_2, Y_2} \frac{h}{r^3} dXdY$$



- A correção de terreno é sempre positiva, aumentando o valor da gravidade observado;
- Esta correção tem por objectivo regularizar a superfície topográfica, obtendo uma topografia definida por um planalto com a altitude da estação e de densidade constante  $\rho$ , designado por Planalto de Bouguer,

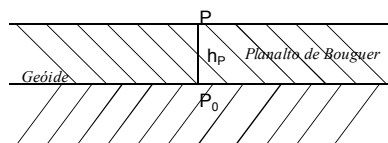
$$g_t = g_{obs} + \delta g_t$$

# GRAVIMETRIA

## 6.3 Redução de Bouguer

- A remoção das massas acima do geóide correspondentes ao planalto de Bouguer é dada por:

$$\delta g_B = 2\pi G\rho h_p$$



$$\delta g_B = 0.1119 h_p \text{ mGal}$$

- Resultando o valor da gravidade após remoção das massas exteriores ao geóide:

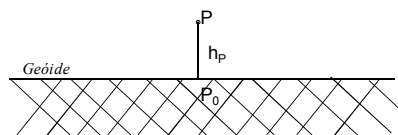
$$g_B = g_{obs} + \delta g_t - \delta g_B$$

# GRAVIMETRIA

## 6.4 Redução ar-livre

- Após a remoção das massas acima do geóide a estação gravimétrica P fica suspensa no espaço exterior; é necessário então, mover a estação para o geóide, usando uma redução do gradiente vertical da gravidade;

$$\delta g_{at} = -\frac{\partial \gamma}{\partial h} h_p \cong 0.3086 h_p \text{ mGal}$$



- Resultando o valor da gravidade reduzida ao geóide:

$$g_B = g_{obs} + \delta g_t - \delta g_B + \delta g_{at}$$

# GRAVIMETRIA

## 6.5 Redução de anomalias da gravidade

- As reduções podem ser aplicadas aos valores da gravidade observada, ou directamente aos valores das anomalias da gravidade;
- Assim temos:

- Anomalias ar-livre:

$$A g_{at} = (g_p - \gamma_Q) + 0.3086 h_p \text{ mGal}$$

- Anomalias simples de Bouguer:

$$A g'_B = (g_p - \gamma_Q) + 0.1967 h_p \text{ mGal}$$

- Anomalia completa ou refinada de Bouguer:

$$A g_B = (g_p - \gamma_Q) + \delta g_t + 0.1967 h_p \text{ mGal}$$

# GRAVIMETRIA

## 6.6 Redução isostática

- Se as massas topográficas se sobrepusessem numa crosta homogênea, as reduções de Bouguer removeriam as principais irregularidades do campo gravítico;
- Em consequência disso, as anomalias de Bouguer seriam muito pequenas e oscilavam em torno de zero;
- Na prática, as anomalias de Bouguer são sistematicamente negativas nas zonas montanhosas, atingindo, em média -100 mGal por cada 1000 metros de elevação;
- Os próprios desvios da vertical são mais pequenos do que o esperado; no sec. XIX, J.H. Pratt nos Himalaias calculou um valor de 28" e obteve por observação apenas 5";
- Isto resulta de uma deficiência de massa debaixo das montanhas; quer isto dizer que as massas topográficas montanhosas são, de alguma forma, compensadas pelas suas "raízes";

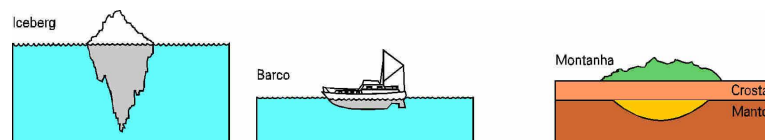
Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6.6 Redução isostática

- *Isostasia* – estado de equilíbrio gravitacional, e suas alterações, entre a litosfera (crosta) e astenosfera (manto externo);
- É o simples equilíbrio no deslocamento do volume de um fluido (astenosfera) pela flutuação de um sólido (litosfera), tal como no equilíbrio hidrostático de um iceberg ou de um barco;
- Quanto maior for o peso da litosfera (força da gravidade), maior o volume de astenosfera que é deslocada para manter o equilíbrio gravitacional;



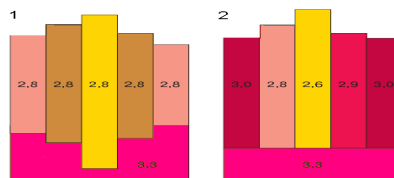
Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6.6 Redução isostática

- Para interpretar e justificar o equilíbrio isostático tem-se recorrido a vários modelos explicativos, dos quais se destacam: 1 – **Modelo Airy-Heiskanen** e 2 – **Modelo de Pratt-Hayford**;
- Modelo de Airy, foi desenvolvido matematicamente por Heiskanen, postula que as diferenças de altitude topográfica são compensadas por variações na espessura da crosta;
- Modelo de Pratt, foi desenvolvido matematicamente por Hayford, postula que as diferenças de altitude topográfica são compensadas por variações de densidade (laterais) da rocha que constitui a litosfera;



Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

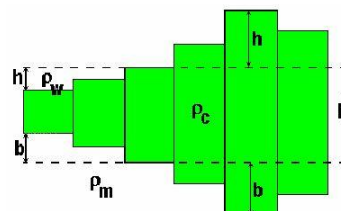
## 6.6 Redução isostática

- Segundo o *Modelo de Airy-Heiskanen*, a montanha assenta numa “raiz” de material menos denso que o manto;
- Quanto maior for a montanha, maior será a raiz;
- Para uma espessura da crosta  $H$  (cerca de 30 Km), de densidade  $\rho_c = 2.67 \text{ g/cm}^3$ , uma elevação da crosta  $h$  acima do geóide deverá ser compensada por uma raiz de espessura:

$$b = \frac{\rho_c h}{\rho_m - \rho_c} = 4.45 h$$

- No oceano por uma anti-raiz de:

$$b = \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_m - \rho_c} h = 2.73 h$$



Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG



# GRAVIMETRIA

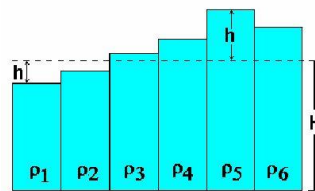
## 6.6 Redução isostática

- Segundo o *Modelo de Pratt-Hayford*, a montanha ao crescer diminui de densidade, tal que, quanto maior for a montanha menor é a sua densidade;
- Baseia-se na condição de que em cada coluna a massa é constante;
- Pratt propôs uma camada superficial até uma dada profundidade (nível de compensação), cerca de 100 Km (H), que apresenta variações de densidades laterais de acordo com a topografia:

$$\rho_h = \rho_c \frac{H}{H + h}$$

- Sob o oceano é :

$$\rho_h = \frac{\rho_c H + \rho_w h}{H + h}$$



Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

## 6.6 Redução isostática

- O objectivo das reduções isostáticas é obter a regularização da densidade da crosta terrestre (com igual densidade) de acordo com um qualquer modelo de isostasia;
- Embora as anomalias de Bouguer sejam localmente representativas, quando consideramos regiões extensas, elas espelham a influência dos mecanismos de compensação isostática da crosta terrestre;
- As reduções de Bouguer não removem completamente os efeitos das massas topográficas em excesso;
- Com o modelo isostático de Airy, as massas topográficas são usadas para encher as raízes dos continentes, alterando a densidade de  $\rho=2.67$  para  $\rho=3.27 \text{ g/cm}^3$ ;
- Com o modelo isostático de Pratt, as massas topográficas são distribuídas entre o nível de compensação e o nível do mar;

Geodesia Física – Aula 12

FCUL-EG

# GRAVIMETRIA

---

## 6.7 Anomalia isostática

- Com as reduções isostáticas, a topografia (massas) é removida conjuntamente com a compensação, resultando uma crosta homogénea;
- São executados 3 passos:
  - 1 – remoção da compensação isostática;
  - 2 – remoção das massas topográficas;
  - 3 – redução ar-livre ao nível do geóide;

- Gravidade isostática reduzida:

$$g_I = g + \delta g_c + (\delta g_t - \delta g_B) + \delta g_{al}$$

- Anomalia isostática é definida por:  $\Delta g_I = g_I - \gamma$

# GRAVIMETRIA

---

## 6.7 Cálculo das reduções

- Enquanto que as reduções do planalto de Bouguer dependem apenas da altitude da estação, as reduções topográfica e isostática necessitam de um Modelo Digital de Terreno (DTM);
- Para o cálculo das reduções topográfica e isostática o terreno é dado na forma de grelha de altitudes, com as quais se calcula o valor de redução para cada ponto estação (por integração);
- O modelo de terreno é dividido em duas grelhas de espaçamento diferentes, uma malha mais fina e outra menos densa, por forma a dividir o cálculo em duas componentes de influência em função da distância (mais próxima e mais afastada);
- Quanto maior for a resolução do MDT (ideal 40 m) maior é o rigor das reduções;
- Na prática só se aplica a redução isostática às zonas montanhosas, pelo facto de a sua influência em zonas de baixa altitude ser desprezável.