

DEFORMAÇÕES DA TERRA

1. Deformações temporais da Terra

- Sendo o objectivo principal da Geodesia, a determinação da forma da Terra e o estudo dos seus movimentos relativos, ela terá de se ocupar das suas deformações temporais;
- Há muito que as deformações, provocadas pelos mais variados fenómenos, eram conhecidas, contudo, só muito recentemente passou a ser possível a sua medição rigorosa;
- O que para a geodesia constituía ruído das observações, para outros (geofísicos e geólogos), era o sinal de fenómenos conhecidos;
- Como a precisão das observações estavam aquém da magnitude desses fenómenos, não era possível distinguir o ruído das observações e daí medir as pequenas deformações;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

1. Deformações temporais da Terra

- Em relação à escala de tempo, as variações na forma da terra são classificadas como:
 - Seculares (lineares e lentas);
 - Periódicas (de horas a dezena de anos);
 - Episódicas (acelerações e desacelerações súbitas);
- As deformações sísmicas, embora por um lado, se possam considerar Episódicas, são de periódicas de elevada frequência, mas com um efeito muito reduzido sobre o trabalho geodésico;
- Apesar de o papel da Geodesia incidir sobre movimentos seculares e de baixa frequência, tem sido prática a utilização de estações GPS permanentes para monitorizar zonas de alta sismicidade;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

1. Deformações temporais da Terra

- Para a Geodesia só interessam movimentos recentes e contemporâneos, os que causam efeito sobre a actual forma da terra e do campo gravítico, e conseqüentemente, nos sistemas de referência;
- As outras geociências, ao contrário, têm interesse no estudo histórico dos movimentos ocorridos há milhares de anos;
- Como o estudo sistemático dos fenómenos seculares e de longo período só começou nas últimas décadas, o conhecimento quantitativo de muitos deles ainda não é um dado adquirido;
- Por vezes, com os dados fornecidos pela Geodesia, não se sabe se estamos perante um fenómeno de natureza secular ou um fenómeno de longo período;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

1. Deformações temporais da Terra

- A Superfície da Terra (litosfera) comporta-se como um meio visco-elástico;
- Por um lado, se as forças deformantes actuam apenas durante um curto período, ou varia muito rapidamente, a deformação da Terra é elástica;
- Por outro, se as forças deformantes actuam durante longos períodos, a resposta da Terra é viscosa; após o desaparecimento da força a Terra recupera a sua forma original;
- O conhecimento e modelos fornecidos pelas outras geociências são fundamentais para que a Geodesia possa definir adequadamente as metodologias nos seus estudos;

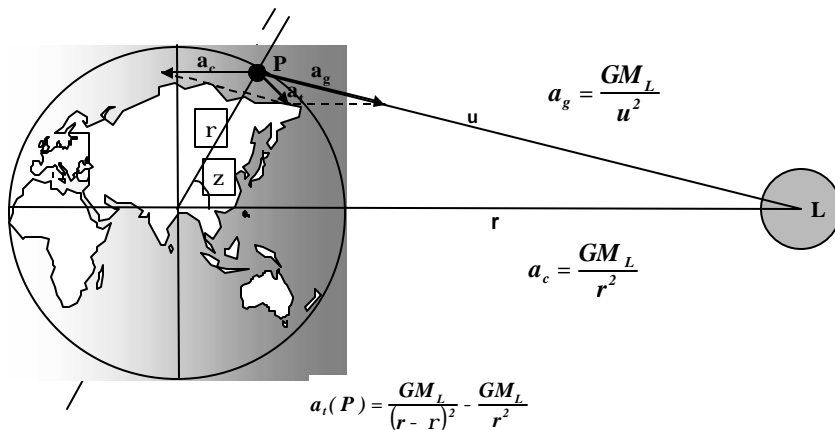
DEFORMAÇÕES DA TERRA

2. As várias deformações

- As deformações que interessam à Geodesia e que destacamos aqui, são as provocadas pelos seguintes fenómenos:
 - Fenómeno de maré terrestre;
 - Deformações da crosta devido a cargas superficiais;
 - Movimentos tectónicos;
 - Variações meteorológicas;
 - Acção humana;
 - Outras.

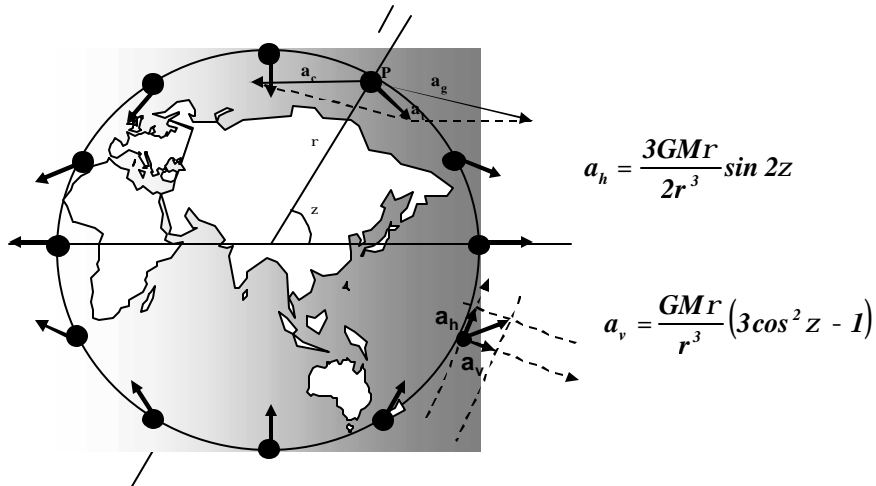
DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré



DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré

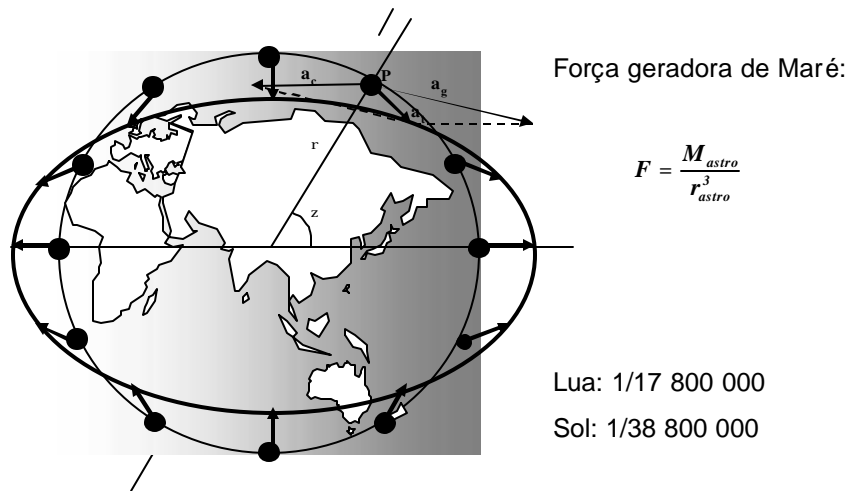


Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré



Lua: 1/17 800 000

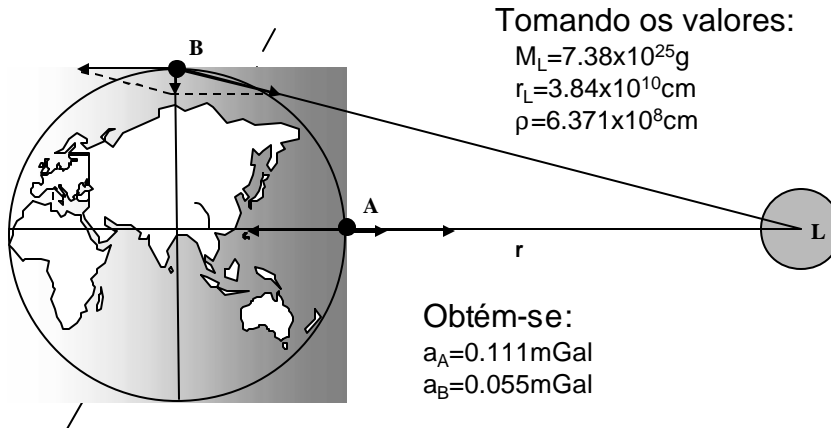
Sol: 1/38 800 000

Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré



DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré

- A força geradora de maré pode ser representada por um função potencial de um campo vectorial;
- Combinando as duas componentes de potencial, obtém o *potencial luni-solar de maré*, em desenvolvimento de harmónicas esféricas:

$$W_m(P) = \frac{GM_L}{r_L} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{r^n}{r_L^n} P_n(\cos Z_L) + \frac{GM_S}{r_S} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{r^n}{r_S^n} P_n(\cos Z_S)$$

- Os restantes planetas geram da mesma forma um potencial de maré idêntico, mas significativamente mais pequeno:

Corpo	Lua	Sol	Vénus	Júpiter	Marte
Potencial	1.0	0.4618	5.4E-5	5.9E-6	1.0E-6

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.1 Fenómeno de Maré

- O potencial de maré pode ser convertido em 3 tipos de deformações com interesse particular para a Geodesia:
 - *Varição gravítica de maré*, δg ;
 - *Inclinação de maré*, $\delta\theta$;
 - *Elevação de maré*, δh ;
- A variação gravítica é a responsável pela alteração do valor da gravidade medido à superfície, afectando as observações realizadas pelos gravímetros (máx = 0.28mGal);
- A inclinação é dada pelo desvio de direcção que o vector gravidade sofre pelo efeito do potencial de maré em cada posição e em cada instante (máx = 0.017'');
- A elevação é a variação em altitude das superfícies equipotenciais (máx = 53cm), e que no mar provoca a onda de maré oceânica;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

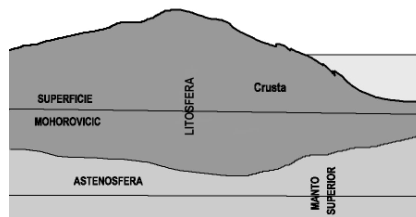
2.1 Fenómeno de Maré

- Em qualquer ponto à superfície, o potencial luni-solar varia com o tempo e com a distância zenital (Z) da Lua e do Sol;
- As principais periodicidades destas variações são diurnas e semidiurnas, uma é devida à posição do astro, a outra devida à rotação da Terra;
- A contribuição predominante do potencial de maré é o lunar semidiurno, o M₂, com um período ½ dia lunar (1 dia+50min);
- A *elevação permanente de maré* (com período infinito) é responsável por um aumento no achatamento permanente das superfícies equipotenciais;
- Esta elevação permanente provoca uma depressão de 28cm nos pólos e uma elevação de 14cm no equador, correspondente a um decréscimo de 0.006 em 1/f;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- A crosta é composta por placas sólidas e menos pesadas que as camadas internas, com uma densidade média de $\sigma=2.67 \text{ g/cm}^3$;
- A crosta flutua sobre o manto superior, um material mais denso ($\sigma=3.27 \text{ g/cm}^3$) em estado de fusão;
- A fronteira entre a crosta sólida e o manto superior é difícil de distinguir, já que a Reologia e a Sismologia não são concordantes;



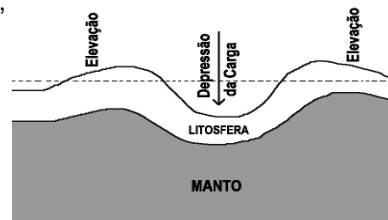
Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- A crosta é sujeita a cargas provenientes de diferentes fenômenos que acontecem à superfície da terra;
- Qualquer destas cargas produz uma deformação vertical regional da crosta;



- A cedência da crosta afecta também a zona circundante, por virtude da resistência lateral da litosfera;
- A subsidência será máxima sob a carga e diminuirá gradualmente com a distância;

Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- As várias fontes existentes que provocam a carga superficial:
 - Carga do gelo glacial;
 - Carga da água da desglaciação;
 - Depósitos em bacias sedimentares;
 - Carga oceânica das marés;
 - Grandes reservatórios de água (barragens);
 - Grandes cidades;
 - Cheias provocadas pelas grandes precipitações;
 - Acumulação de neve;
 - Pressões atmosféricas;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- Na Antártida estima-se uma *massa de gelo* de $2.7 \times 10^{19} \text{Kg}$ e na Gronelândia de $3 \times 10^{18} \text{Kg}$;
- As cargas de gelo mais relevantes foram as que cobriram na última glaciação, as zonas do Canadá, Escandinávia, Sibéria, Himalaias, Alpes e extremo sul da América;
- Na última glaciação, terminada à 6-10 mil anos, estima-se que a depressão vertical tenha atingido os 500m, com uma camada de gelo de alguns quilómetros;
- A água proveniente do degelo glacial contem o mesmo peso, é uma massa que se desloca e se espalha por uma área muito maior, por isso, provoca menos carga;
- Esta carga de água glacial provoca dois efeitos, a subida do nível médio do mar e o efeito de carga em toda a zona oceânica;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- Os depósitos de sedimentos em bacias de grandes rios, são uma fonte considerável de carga;
- O Mississipi deposita cerca de 2×10^{11} Kg/ano de inertes, e em tempo de cheias aumenta para os 8×10^{11} Kg/ano;
- Nos últimos anos foi relatada uma subsidência da ordem dos 10cm na bacia do Mississipi;
- A massa de água que se desloca com a onda de maré provoca também uma pressão sobre a crosta, à qual esta responde de forma elástica;
- Esta é uma das poucas deformações que é previsível, com grande grau de certeza;
- De forma semelhante, são os grandes reservatórios artificiais de água, com uma carga periódica sazonal provocam uma deformação elástica de igual período;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.2 Cargas Superficiais

- Após ao desaparecimento da carga a crosta reajusta-se (“rebound”), respondendo de acordo com o princípio de equilíbrio isostático (rever modelos de isostasia);



- As placas da litosfera flutuam, em equilíbrio sobre a astenosfera, logo as variações na profundidade de submersão são compensadas por variações na densidade e na espessura da litosfera;
- Quando a carga desaparece, a parte elástica da litosfera relaxa instantaneamente, a parte não elástica eleva-se lentamente até atingir um novo equilíbrio isostático (comportamento visco-elástico) – elevação pós-glacial isostática;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

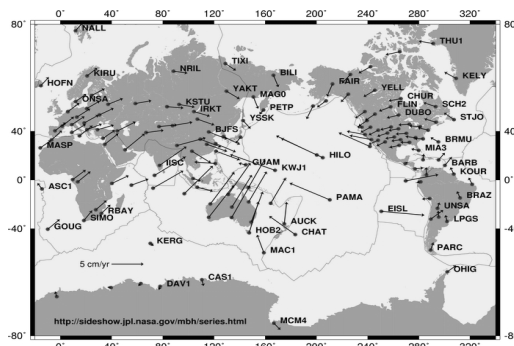
2.3 Deformações tectónicas

- Embora a ideia de as placas litosféricas se estarem a mover sobre a parte superior do manto fosse proposta por Wegner em 1929, só nas décadas de 60 e 70 é que ganhou crédito;
- Actualmente está firmemente estabelecida, e existem em curso diversos projectos importantes de investigação para determinar as velocidades relativas das placas;
- Os resultados destes projectos, nos quais a Geodesia dá um contributo com as novas técnicas de posicionamento, servem para explicar melhor os mecanismos tectónicos e delinear as fronteiras exactas dessas placas;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.3 Deformações tectónicas

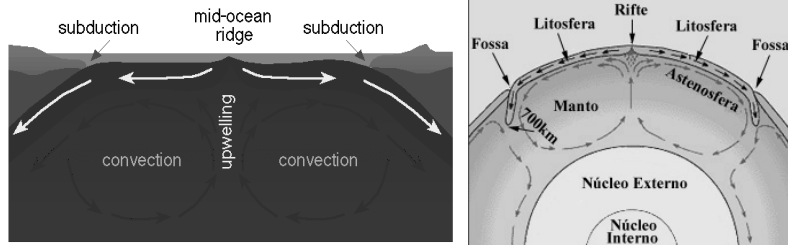
- Movimento das placas baseado em dados de satélites GPS, com velocidades relativas de 1.1 cm/ano no sudoeste Atlântico, a 14.5 cm/ano na Nova Guiné



DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.3 Deformações tectónicas

- A compreensão actual das forças que geram tais movimentos ainda é inadequada;
- A convecção termal no interior da astenosfera parece, de alguma forma, explicar em parte esses movimentos;

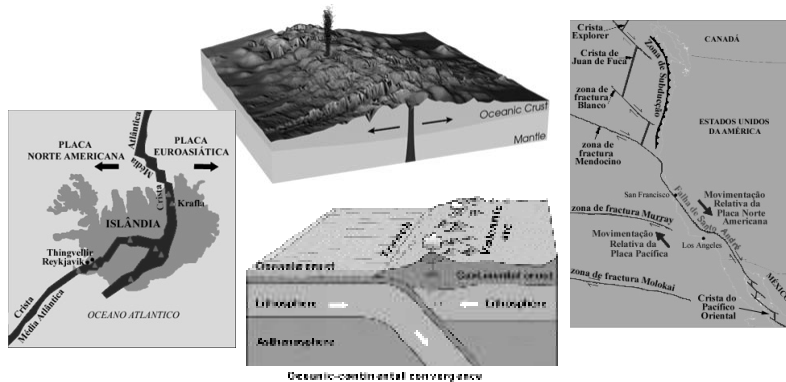


- As fossas submarinas do Japão apresentam um movimento horizontal relativo de 7.5 cm/ano

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.3 Deformações tectónicas

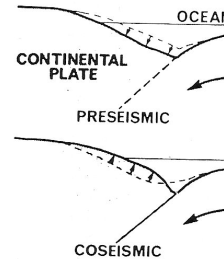
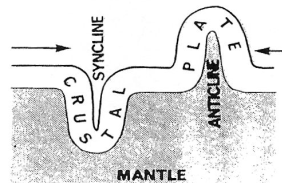
- Existem 3 tipos de fronteiras entre placas: Convergentes; Divergentes e Transformantes (deslizamento lateral) ;



DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.3 Deformações tectônicas

- Movimentos pré-sísmicos e co-sísmicos são gerados em fronteiras de compressão, onde normalmente a placa oceânica cede e faz subducção sobre a placa continental;
- Outra manifestação importante é o desenvolvimento de geossinclinais como produto de tensões laterais;



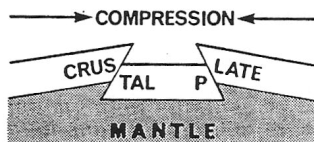
Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.3 Deformações tectônicas

- As falhas não estão confinadas às regiões em torno das fronteiras, elas desenvolvem-se mesmo no interior das placas;
- As placas são arrastadas vagarosamente sobre o manto, introduzindo tensões adicionais que provocam tais fraturas;
- Duas notáveis configurações são o Graben e a Escarpa;



Introdução à Geodesia – Aula 21

FCUL-EG

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.4 Outras deformações

- Outras espécie de deformação que tem lugar nas camadas superficiais da crosta terrestre é devida à compactação do terreno;
- Esta deformação manifesta-se sob a forma de uma subsidência local ou regional;
- A causa principal é a extracção de minério, hidrocarbonetos, gás natural, etc.;
- A extracção excessiva de água subterrânea tem também como resultado assentamentos consideráveis (alguns metros) de áreas relativamente grandes;
- Colapsos de cavidades subterrâneas, naturais ou criadas pelo homem é outra fonte de subsidência conhecida;

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.5 Conclusões

- Muitos outros fenómenos se podem apresentar como causas de deformações locais e regionais da crosta da Terra;
- O que mais importa na Geodesia são as deformações que causam alterações na forma da Terra, e conseqüentemente, na geometria do campo gravítico e na definição dos referenciais geodésicos;
- A alteração do nível médio do mar relativamente à plataforma continental é de extrema importância, já que constitui um dos referenciais mais importantes – o datum altimétrico;
- A constante alteração do movimento do pólo, da variação da rotação da Terra, do movimento de placas, da localização do centro de massa, origina uma constante redefinição dos sistemas de referência (datum flutuante);

DEFORMAÇÕES DA TERRA

2.5 Conclusões

- É fundamental que o Geodesta conheça bem estes fenómenos, para que:
 - Por um lado, o ajude a definir melhor os seus sistemas de referência, e conseqüentemente, realizar com maior rigor o posicionamento geodésico;
 - Por outro, possa falar a mesma linguagem e compreender os demais geo-cientistas (geólogos, geofísicos e oceanógrafos), e com eles trabalhar em estreita cooperação interdisciplinar para o melhor conhecimento do nosso planeta.