

# 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, terá também 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 estava aquém da magnitude desses fenómenos, não era possível distinguir o ruído das observações e daí medir as pequenas deformações;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

1

# 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 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;

Geodesia Física – Aula 16

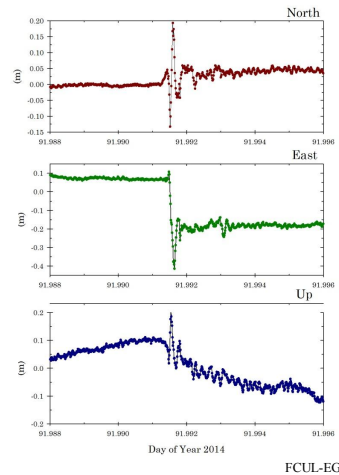
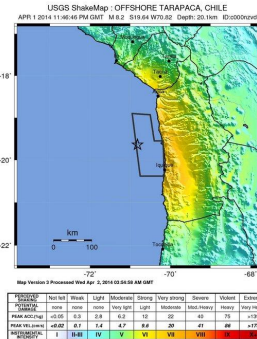
FCUL-EG

2

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 1. Deformações temporais da Terra

- Os dados de GPS de alta frequência permitem determinar deslocamentos co-sísmicos e a detecção das ondas de superfície de grandes sismos.
- Deslocamentos observados a 1 de Abril 2014 no sismo de Iquique (Chile) na estação IGS-IQQE



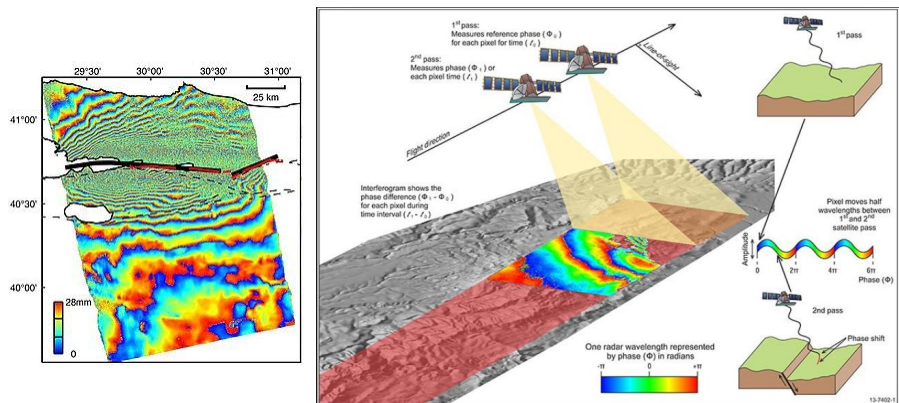
Geodesia Física – Aula 16

3

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 1. Deformações temporais da Terra

- Interferometria RADAR (imagens de SAR)



Geodesia Física – Aula 16

4

# 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 consequentemente, nos sistemas de referência;
- As outras geociências, ao contrário, têm interesse no estudo histórico dos movimentos ocorridos há milhares a milhões 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;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

5

# 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 lentamente a sua forma original;
- O conhecimento de modelos fornecidos pelas outras geociências são fundamentais para que a Geodesia possa definir adequadamente as metodologias dos seus estudos;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

6

# 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.

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

7

# 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:

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

- 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

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

8

# 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:
  - *Variação gravítica de maré*,  $\delta g$ ;
  - *Inclinação de maré*,  $\delta\theta$ ;
  - *Elevação de maré*,  $\delta h$ ;
- A variação gravítica é a responsável pela alteração do valor da gravidade medido à superfície, afectando as observações realizadas pelos gravímetros (máx = 0.28 mGal);
- 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 = 30 cm), e que no mar provoca a onda de maré oceânica ( $\pm 50$  cm no oceano e  $\pm 2$  m na costa);

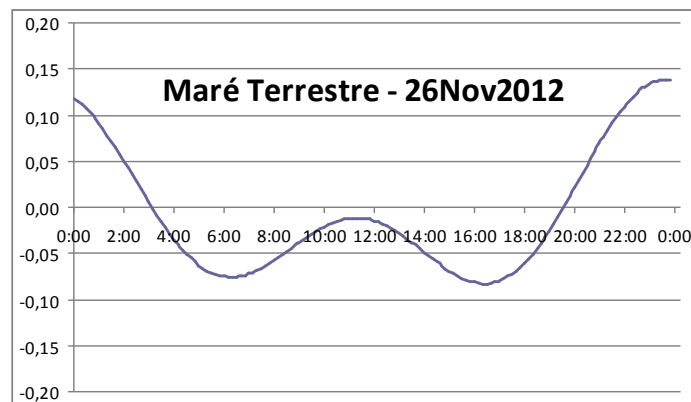
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

9

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

10

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré

Component	Magnitude	Uncertainty
Ocean tide (open ocean)	$\pm 50$ cm	$\pm 10$ cm
Ocean tide (coasts)	$\pm 2$ m	$\pm 10$ cm
Ocean tide (ice shelves)	$\pm 1$ m*	$\pm 40$ cm*
Long period ocean tide	$\pm 1$ m (with long period)	few cm
Pole tide	$< 2$ cm	few mm
Ocean-loading tide	$\pm 10$ cm	$< 0.5$ cm
Solid Earth tide	$\pm 30$ cm	$\pm 0.5$ cm

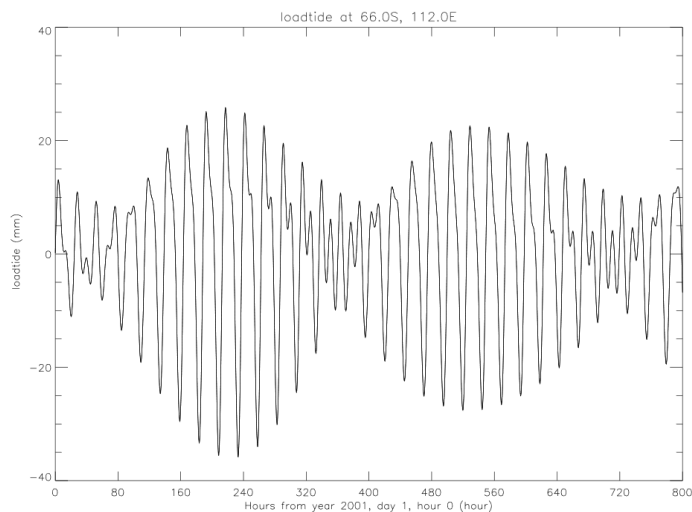
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

11

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



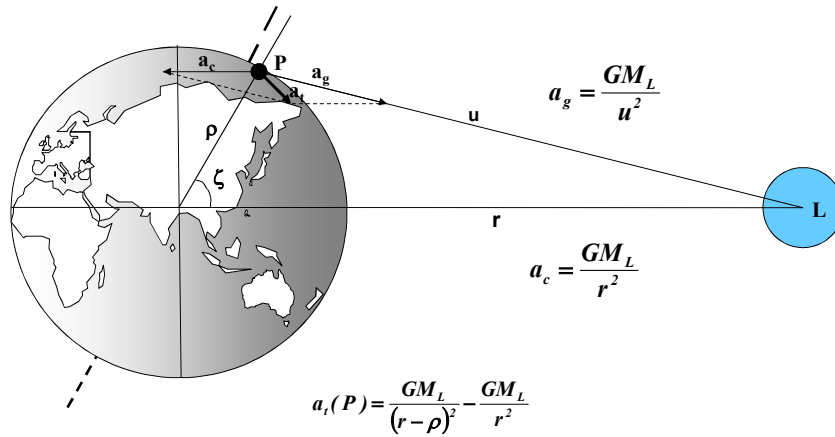
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

12

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



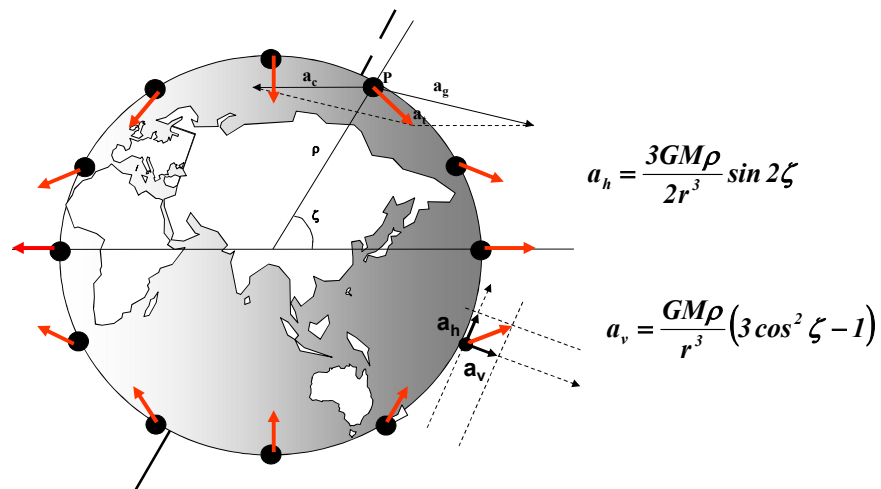
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

13

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



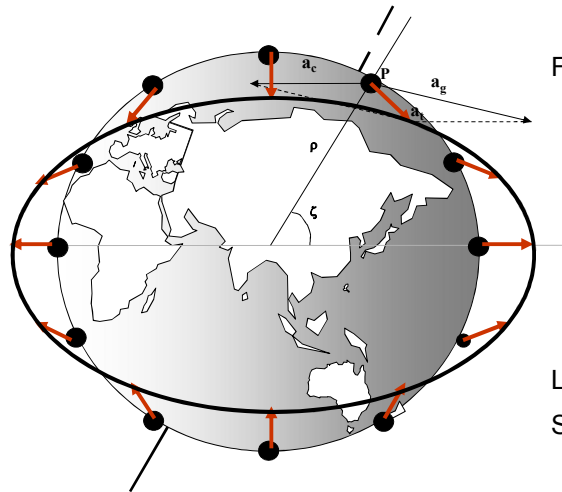
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

14

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



Força geradora de Maré:

$$F = \frac{M_{astro}}{r_{astro}^3}$$

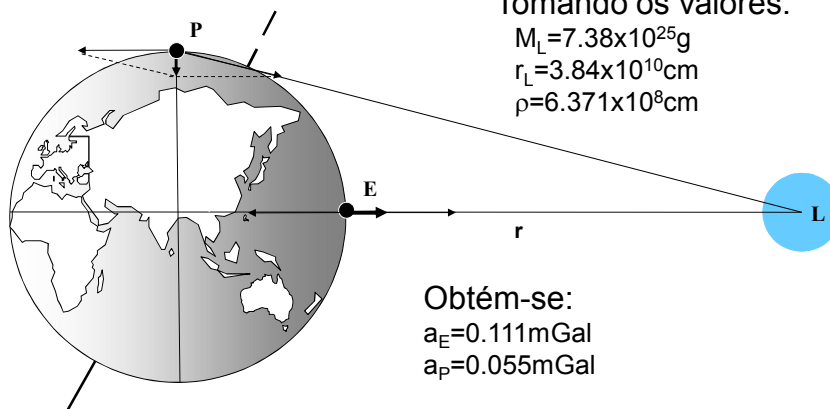
Lua: 1/17 800 000

Sol: 1/38 800 000

15

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.1 Fenómeno de Maré



Tomando os valores:

$$M_L = 7.38 \times 10^{25} \text{g}$$

$$r_L = 3.84 \times 10^{10} \text{cm}$$

$$\rho = 6.371 \times 10^8 \text{cm}$$

Obtém-se:

$$a_E = 0.111 \text{mGal}$$

$$a_P = 0.055 \text{mGal}$$

16



# 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 semi-diurnas, uma é devida à posição do astro, a outra devida à rotação da Terra;
- A contribuição predominante do potencial de maré é o lunar semi-diurno, o M2, com um período  $\frac{1}{2}$  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 28 cm/séc nos pólos e uma elevação de 14 cm/séc no equador, correspondente a um decréscimo de 0.006 em 1/f;

Geodesia Física – Aula 16

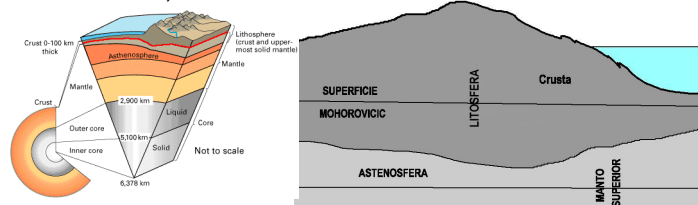
FCUL-EG

17

# 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  $\sigma=2.67$  g/cm<sup>3</sup>;
- A crosta flutua sobre o manto superior, um material mais denso ( $\sigma=3.27$  g/cm<sup>3</sup>) 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;



Geodesia Física – Aula 16

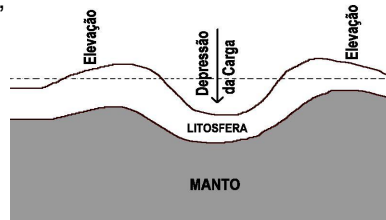
FCUL-EG

18

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais

- A crosta é sujeita a cargas provenientes de diferentes fenómenos 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 diminui gradualmente com a distância;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

19

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais

- As várias fontes existentes que provocam a carga superficial:
  - Carga do gelo glacial;
  - Carga da água do degelo;
  - 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;

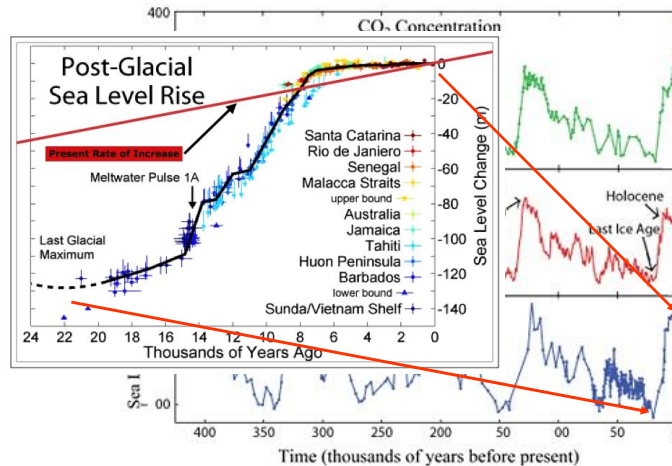
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

20

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais



Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

21

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais

- Na Antártida estima-se uma *massa de gelo* de  $2.7 \times 10^7$  Gton ( $2.7 \times 10^7$  mil milhões de toneladas) e na Gronelândia de  $3 \times 10^6$  Gton;
- 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 (LGM), terminada à cerca de 22 mil anos, estima-se que a *depressão vertical tenha atingido os 500 m*, com uma camada de gelo de alguns quilómetros;
- A *água proveniente do degelo glacial* contem o mesmo peso, é uma massa que se distribui por uma área muito maior, por isso, provoca menor carga superficial;
- 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;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

22

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais

- Após o desaparecimento da carga a *crusta 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 rapidamente e a parte não elástica eleva-se lentamente até atingir um novo equilíbrio isostático (comportamento visco-elástico) – elevação pós-glacial isostática (Modelo GIA);

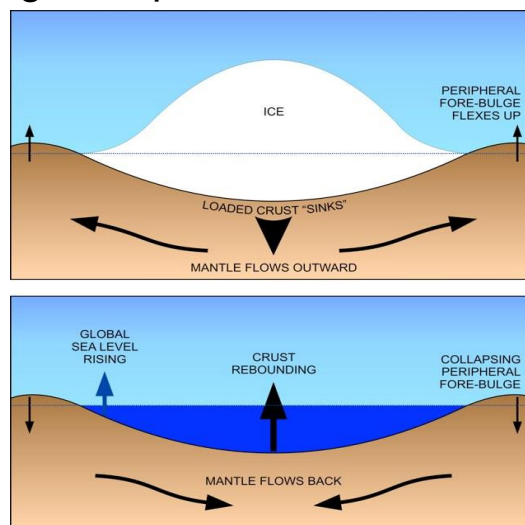
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

23

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais



Geodesia Física – Aula 16

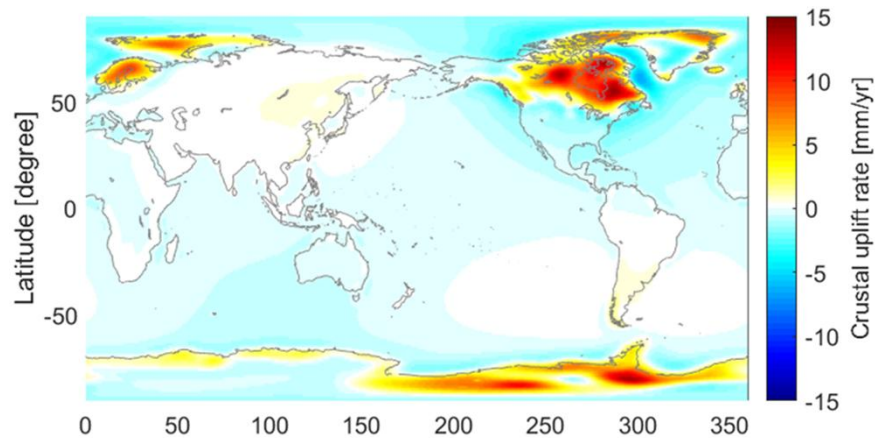
FCUL-EG

24

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais

- Modelo ICE-6G (*Peltier et al., 2015*)



Geodesia Física – Aula 16

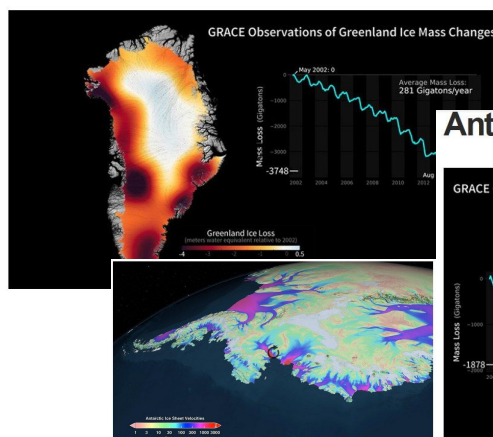
FCUL-EG

25

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

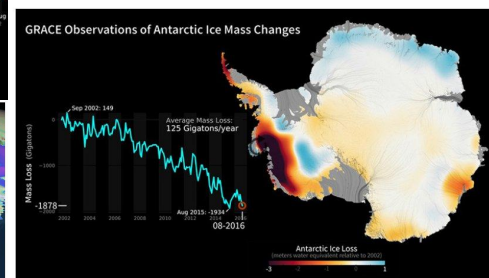
## 2.2 Cargas Superficiais

### Greenland Ice Loss 2002-2016



Geodesia Física – Aula 16

### Antarctic Ice Loss 2002-2016

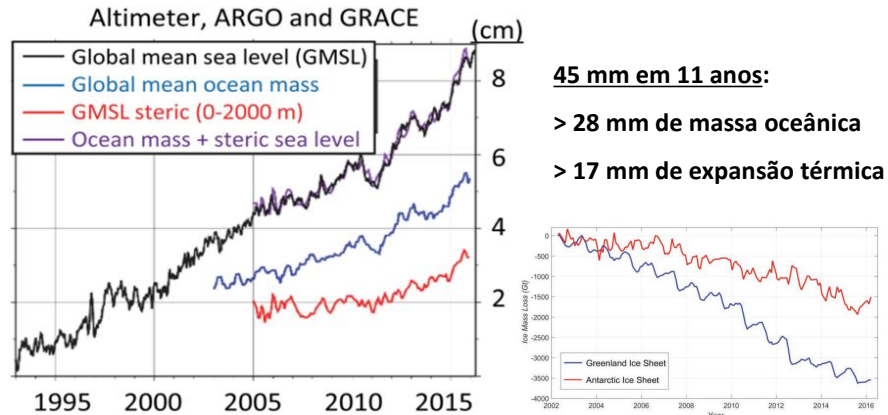


FCUL-EG

26

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais



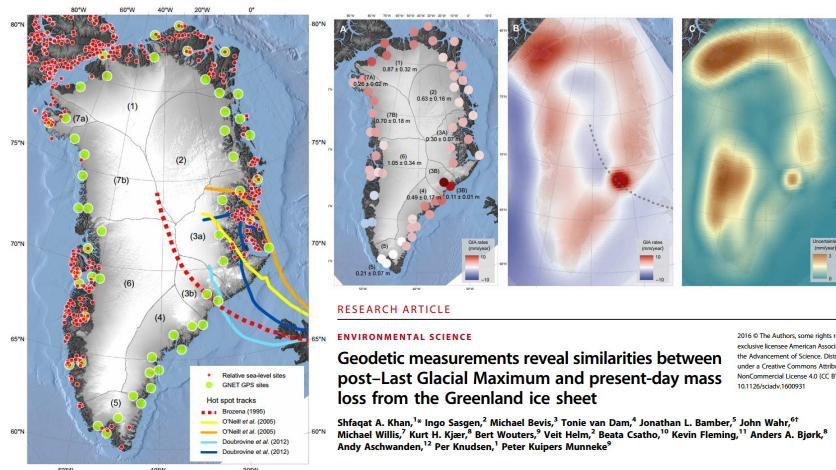
Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

27

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.2 Cargas Superficiais



Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

28

# 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 200 Mton/ano de inertes, e em tempo de cheias aumenta para os 800 Mton/ano;
- Nos últimos anos foi relatada uma subsidência da ordem dos 10 cm 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, os grandes reservatórios artificiais de água exercem uma carga periódica sazonal provocando uma deformação elástica de período igual;

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

29

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

- Embora a ideia de as placas litosféricas se estarem a mover sobre a parte superior do manto tenha sido 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 medir 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;

Geodesia Física – Aula 16

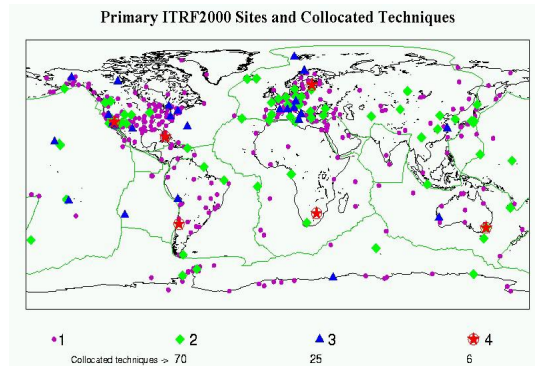
FCUL-EG

30

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

- Para a determinação do movimento das placas tectónicas, e respectivas velocidades, a Geodesia recorre às técnicas de posicionamento espaciais, GNSS, SLR, DORIS e VLBI em estações permanentes



Geodesia Física – Aula 16

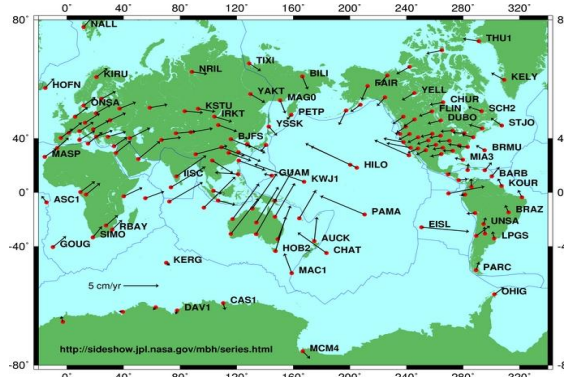
FCUL-EG

31

# 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



Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

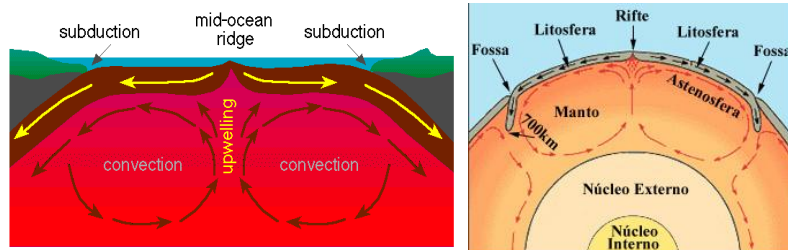
32



# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

- A compreensão actual das forças que geram tais movimentos ainda é inadequada (bottom-up vs top-down);
- 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

Geodesia Física – Aula 16

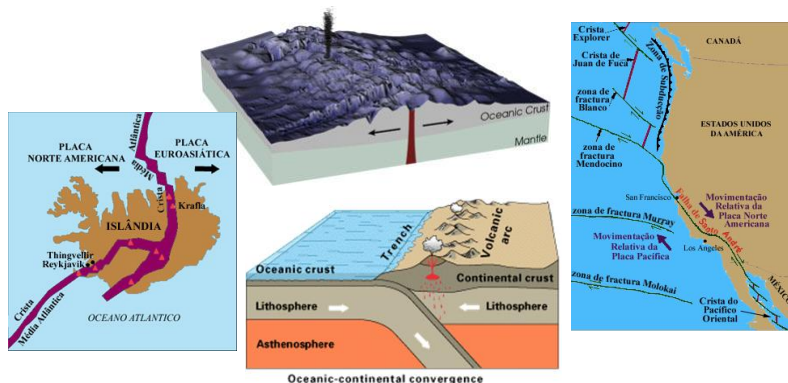
FCUL-EG

33

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

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



Geodesia Física – Aula 16

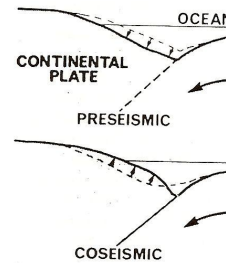
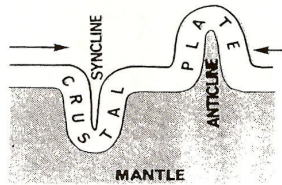
FCUL-EG

34

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

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



Geodesia Física – Aula 16

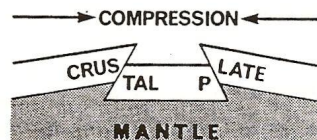
FCUL-EG

35

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.3 Deformações tectónicas

- 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;



Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

36

# 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;

Geodesia Física – Aula 16

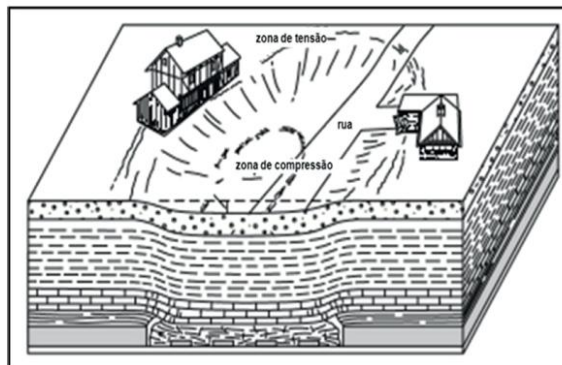
FCUL-EG

37

# DEFORMAÇÕES DA TERRA

## 2.4 Outras deformações

Figura 4: Bloco diagrama mostrando como se processa o fenómeno de subsidência do tipo sag a partir do desabamento das camadas acima da camada minerada de carvão e a repercussão de seus impactos em superfície



Fonte: Adaptado de Bauer; Trent; Dumontelle (1993)

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

38

# 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 consequentemente, 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*);

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

39

# 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 consequentemente, 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.

Geodesia Física – Aula 16

FCUL-EG

40