

## **Objetivos da disciplina –**

**Fornecer aos alunos os conhecimentos essenciais sobre a origem evolução e inversão de bacias sedimentares.**

**Apresentar e discutir os principais modelos geodinâmicos relacionados à tectônica global e à evolução de bacias sedimentares.**

## **Importância das bacias sedimentares:**

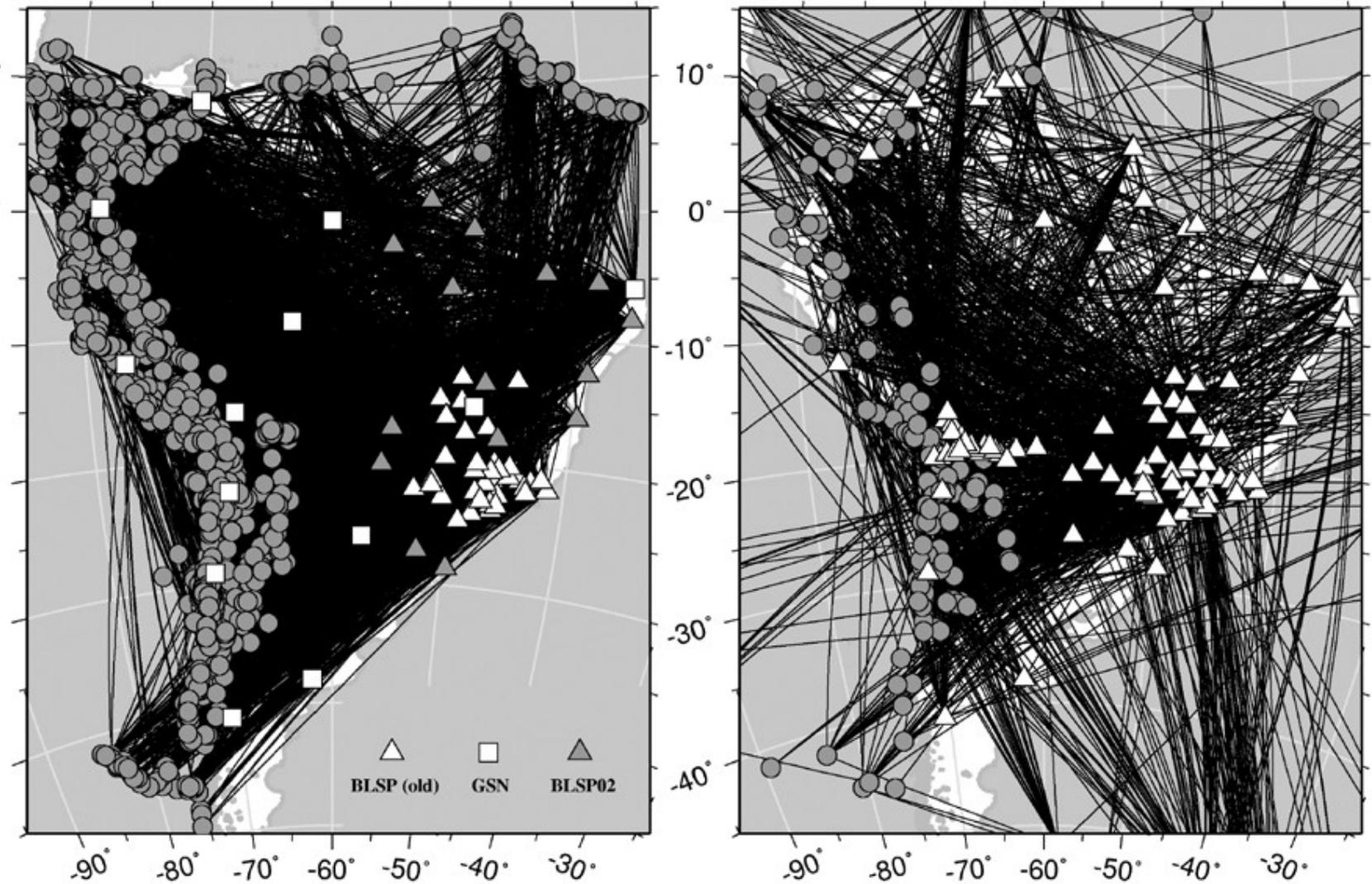
- Registro do passado geológico do planeta
- Aspecto econômico – geologia do petróleo

## Métodos Geofísicos de Investigação Litosférica

### Métodos de Investigação

- **Sismologia**
- **Sísmica de reflexão e refração profundas**
- **Fluxo térmico**
- **Gravimetria**
- **Magneto-Telúrico**

# Tomografia Sísmica



Feng et al., 2007

Métodos de  
Investigação

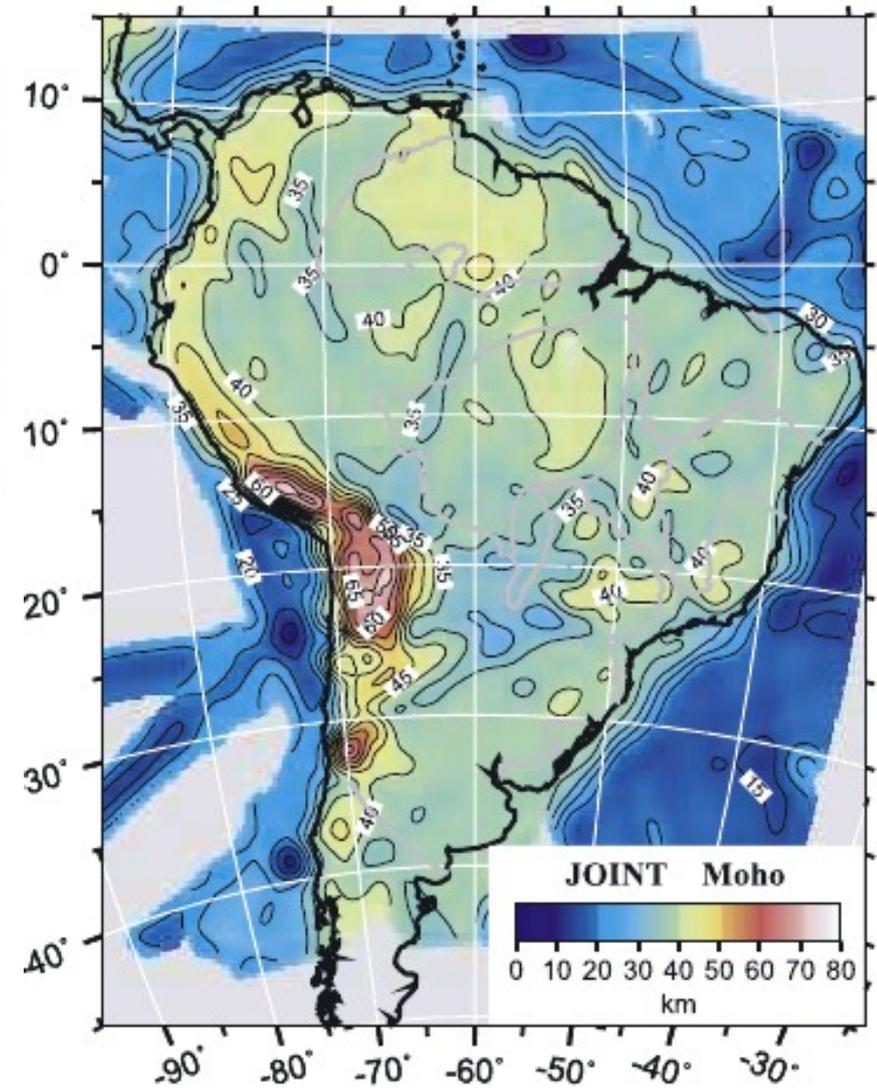
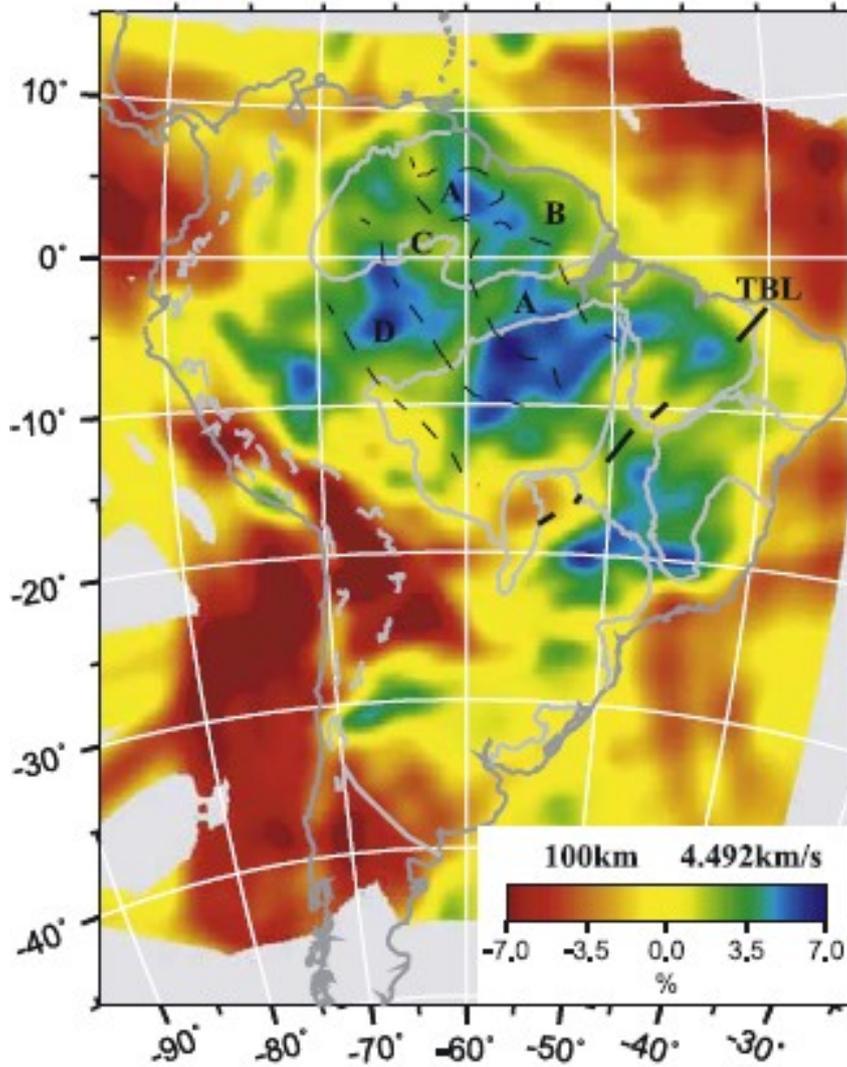
Estrutura  
Interna

Tectônica  
de Placas

Esforços e  
deformação

Vs a 100 km – profundidade da Litosfera

Profundidade da Crosta



(a)

Feng et al., 2007

Métodos de Investigação

Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

# Função do Receptor ondas P e S.

Métodos de Investigação

## Zona de convergência Himalaias

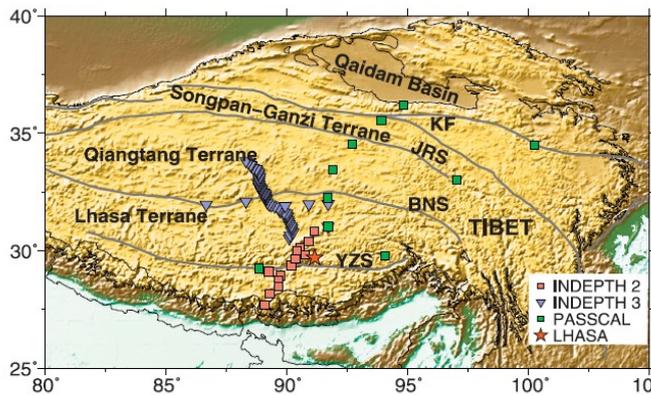
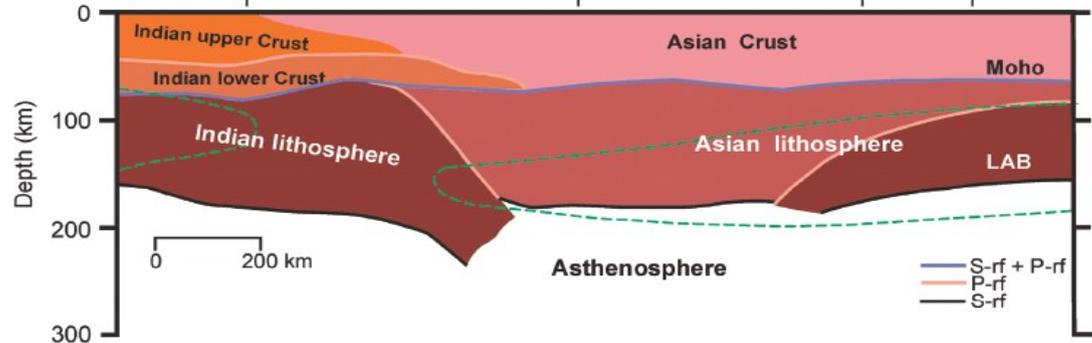
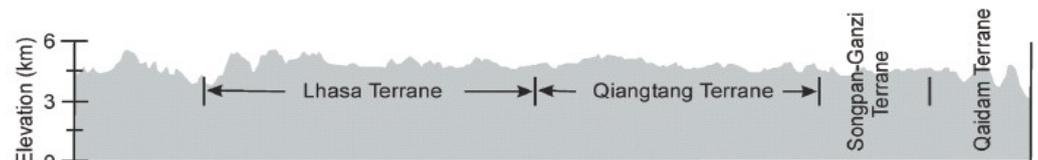
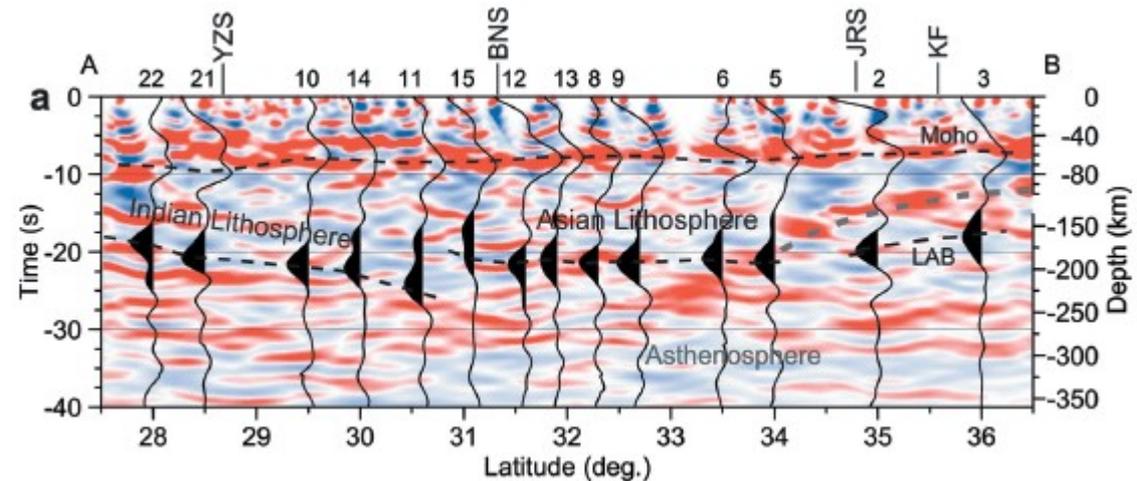


Figure 1. Topographic map of Tibet with locations of seismic stations. Seismic stations of different experiments are marked by different symbols. The main tectonic boundaries dividing Tibet into different terranes are marked: YZS, Yarlung-Zangbo suture; BNS, Bangong-Nujiang suture; JRS, Jinsha Riv suture; and KF, Kunlun fault.

Kumar et al., 2006



Estrutura Interna

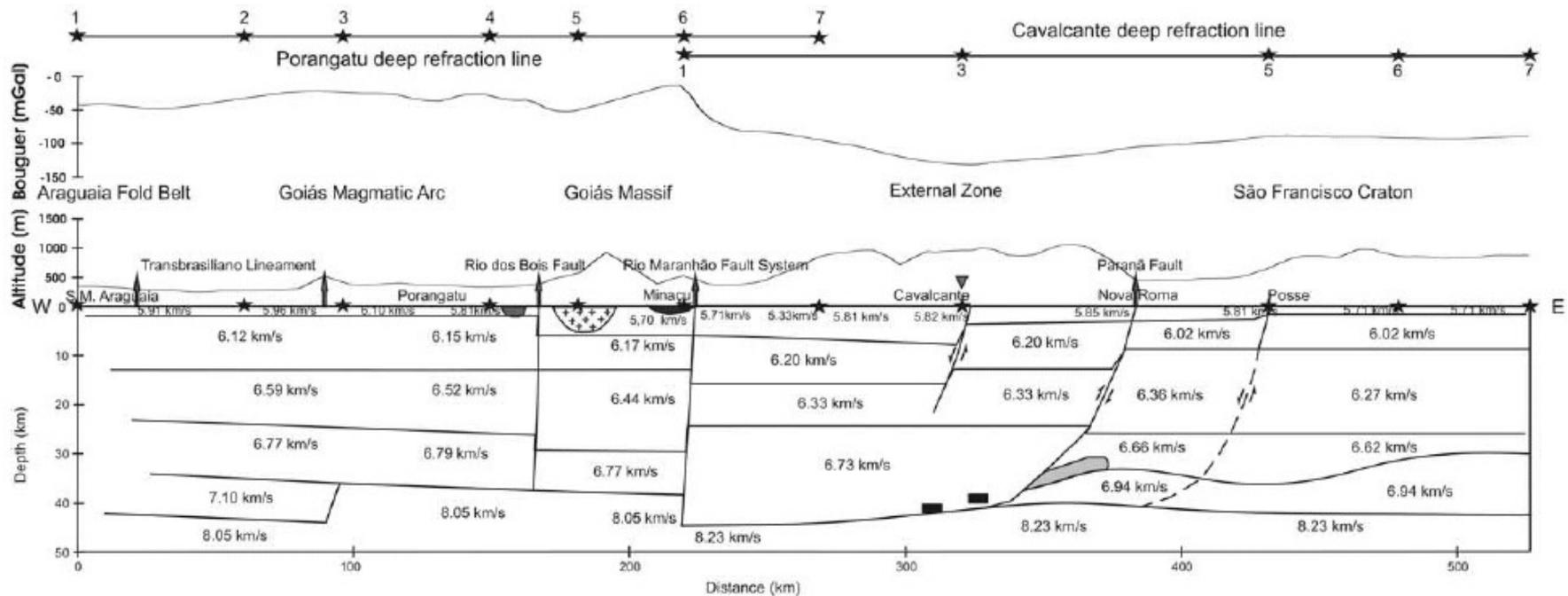
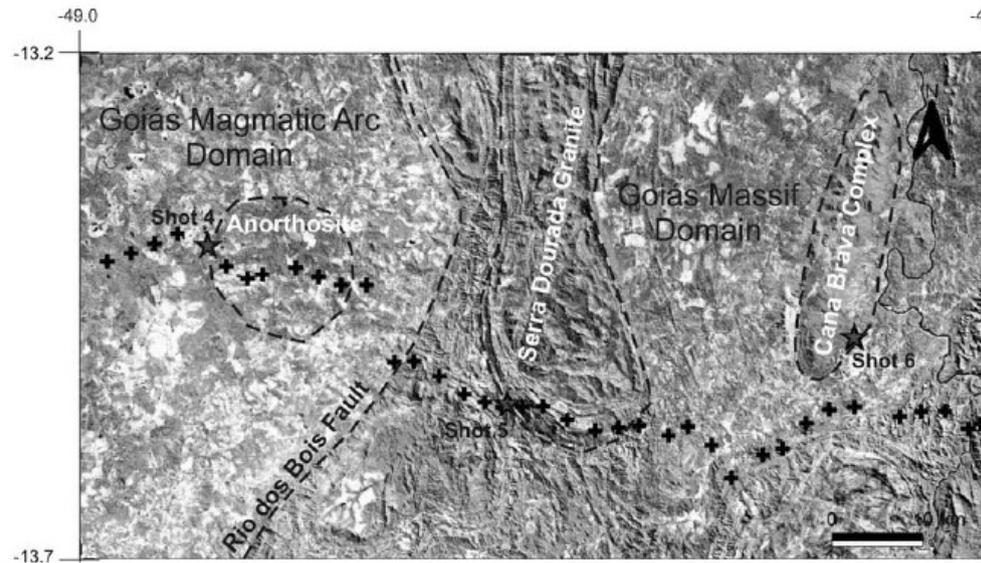
Tectônica de Placas

Esforços e deformação

LAB = Lithosphere Asthenospheric Boundary

# Sísmica de Refração Profunda

Soares et al.,  
(2006)



Métodos de  
Investigação

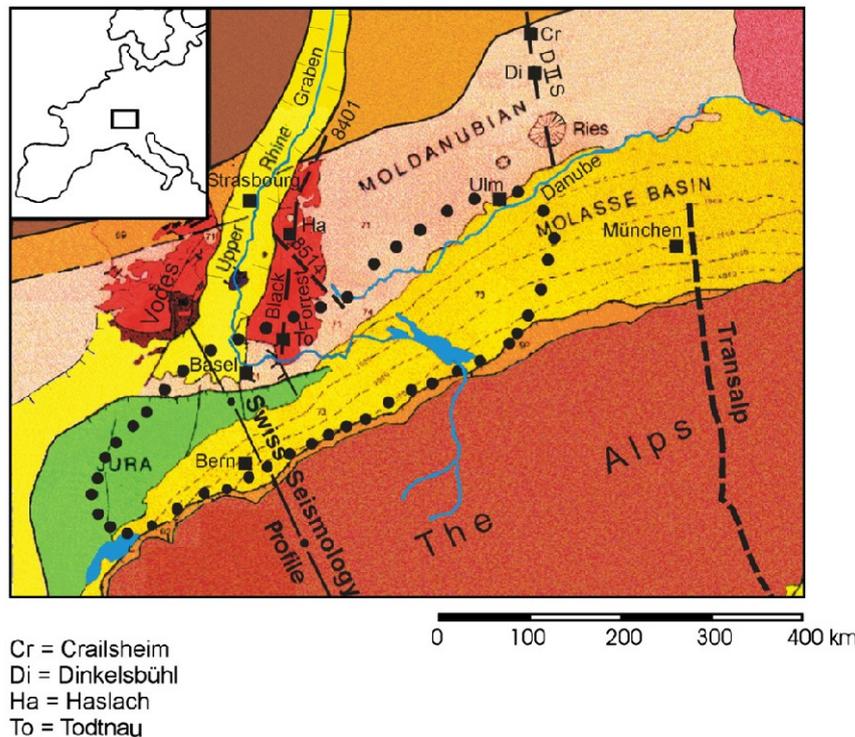
Estrutura  
Interna

Tectônica  
de Placas

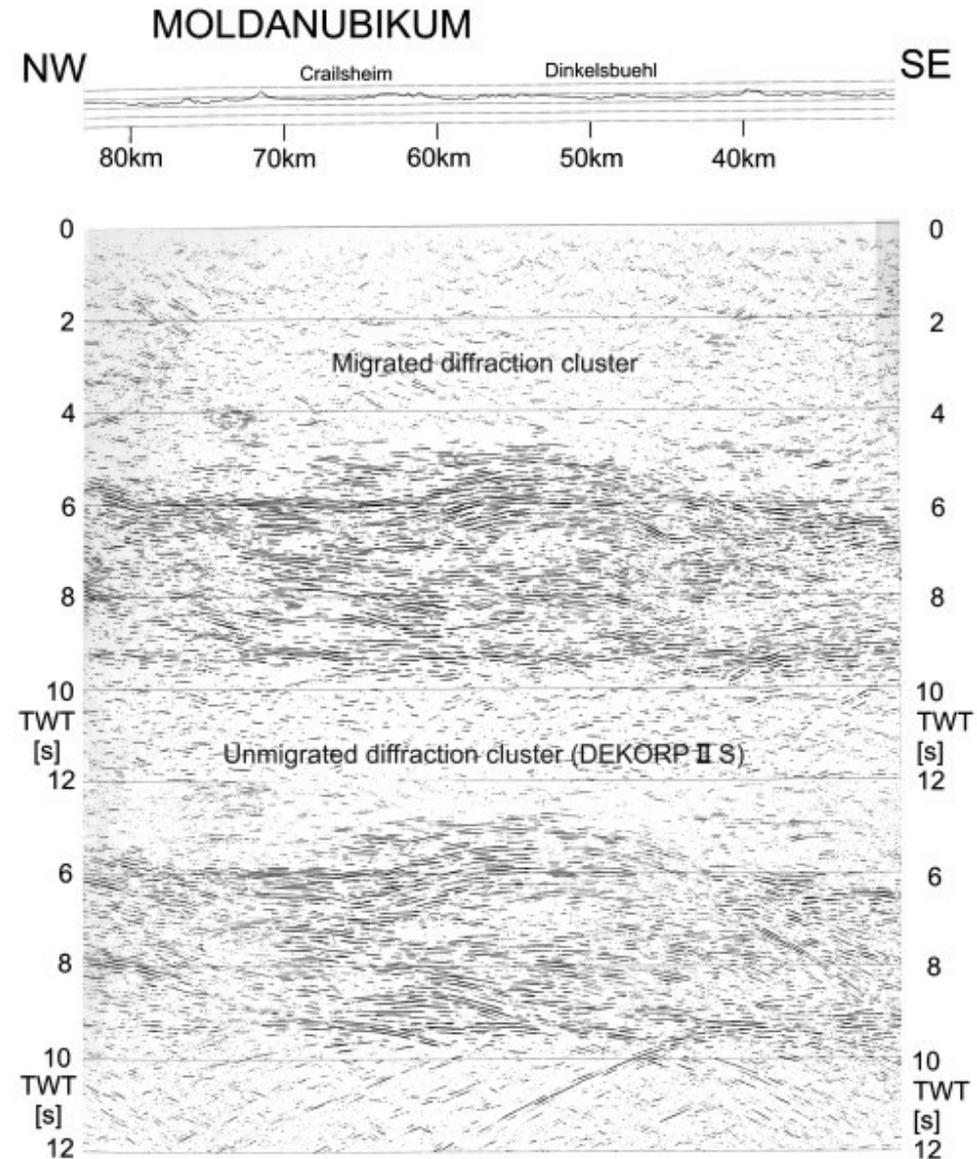
Esforços e  
deformação

# Sísmica de Reflexão Profunda

Métodos de Investigação



Meisner & Kern, 2008



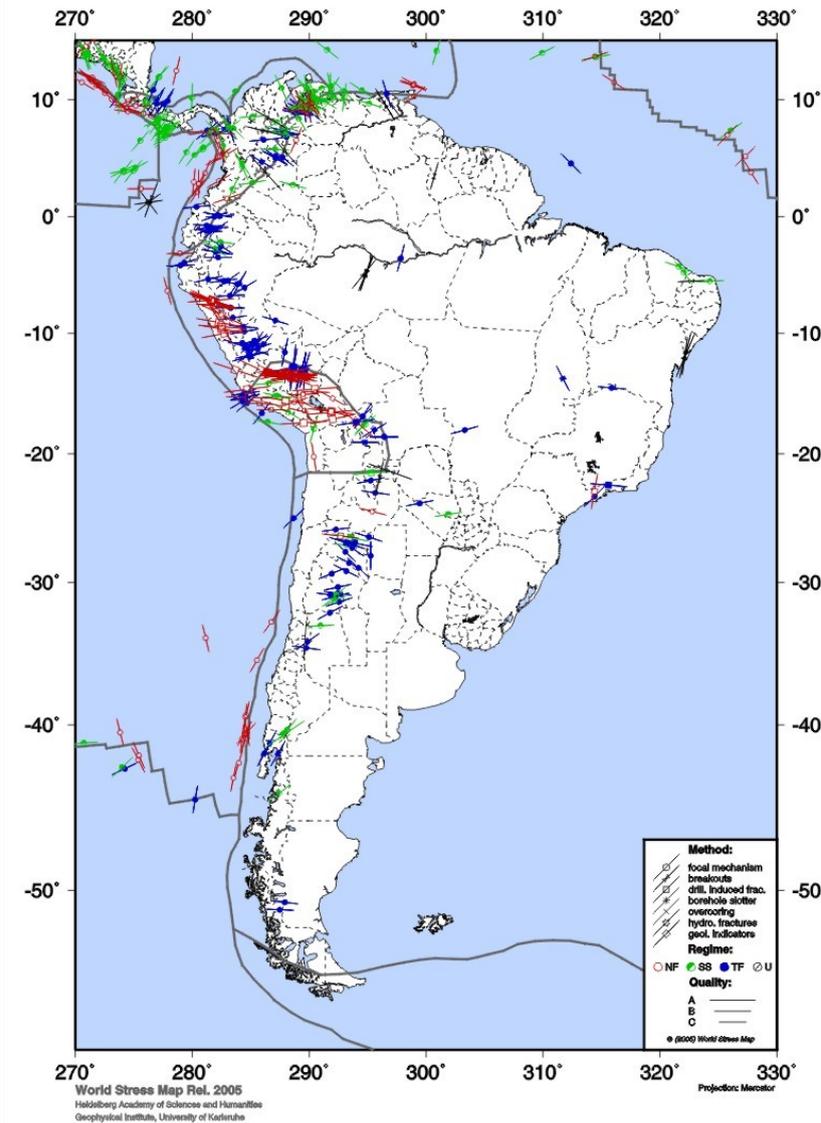
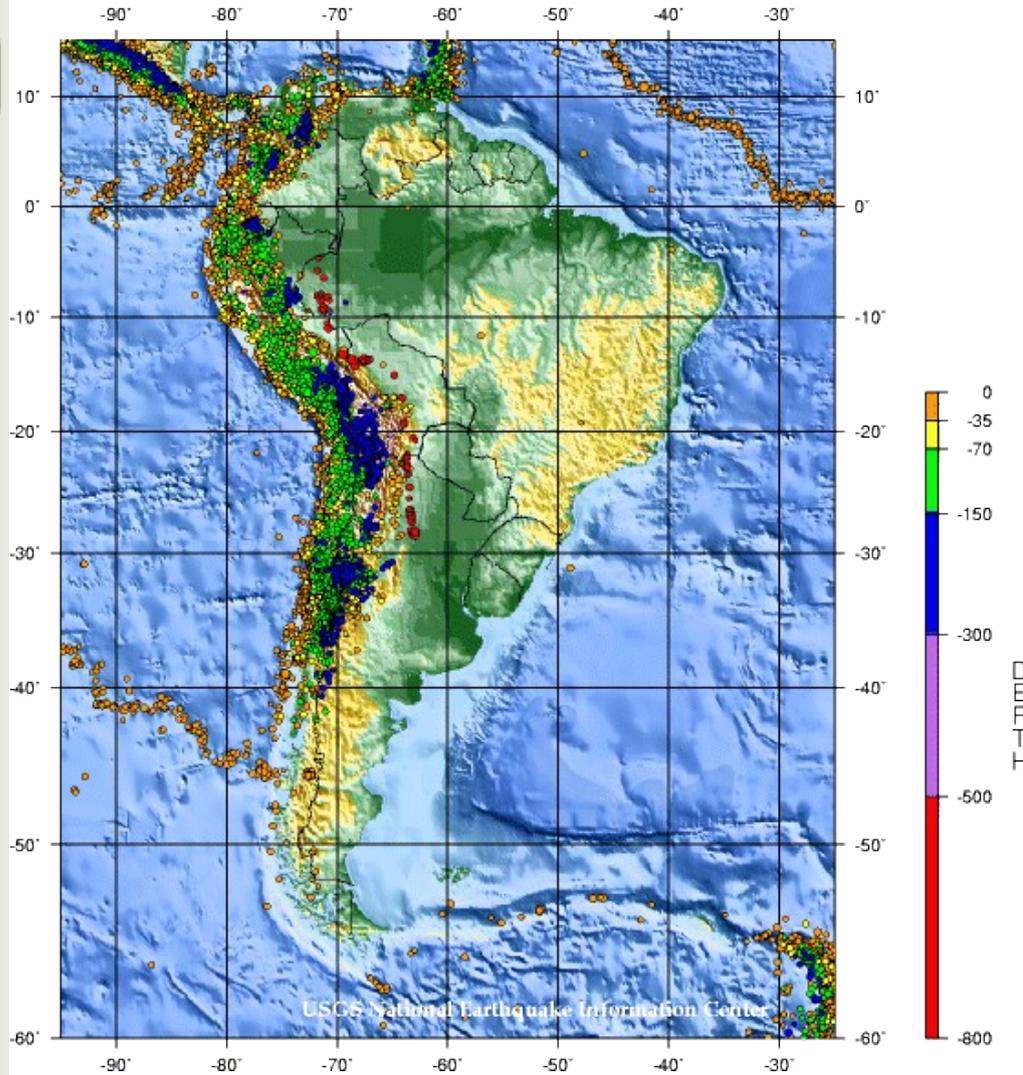
Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

# Sismicidade e Esforços

Seismicity of South America: 1990 - 2000



Métodos de Investigação

Estrutura Interna

Tectônica de Placas

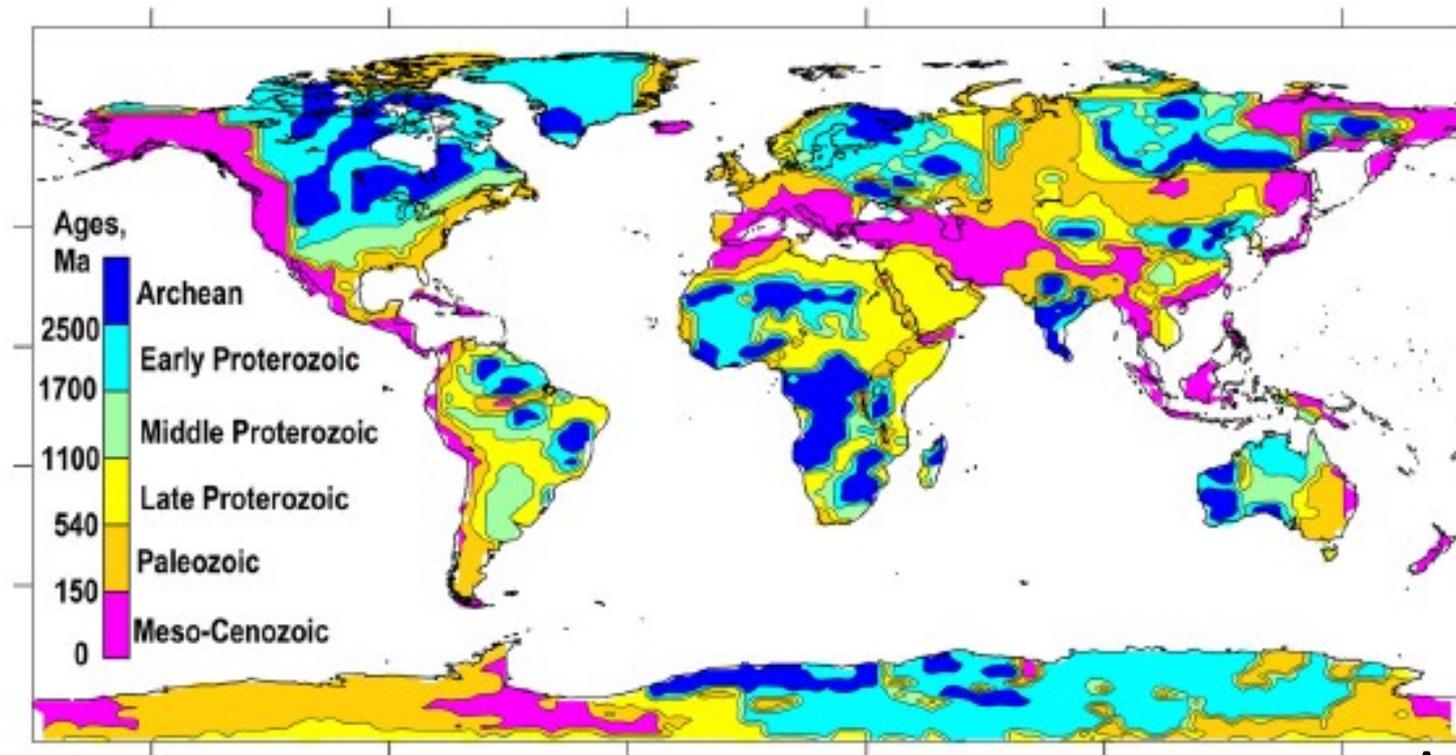
Esforços e deformação

## Fluxo Térmico e Gradientes de Temperatura

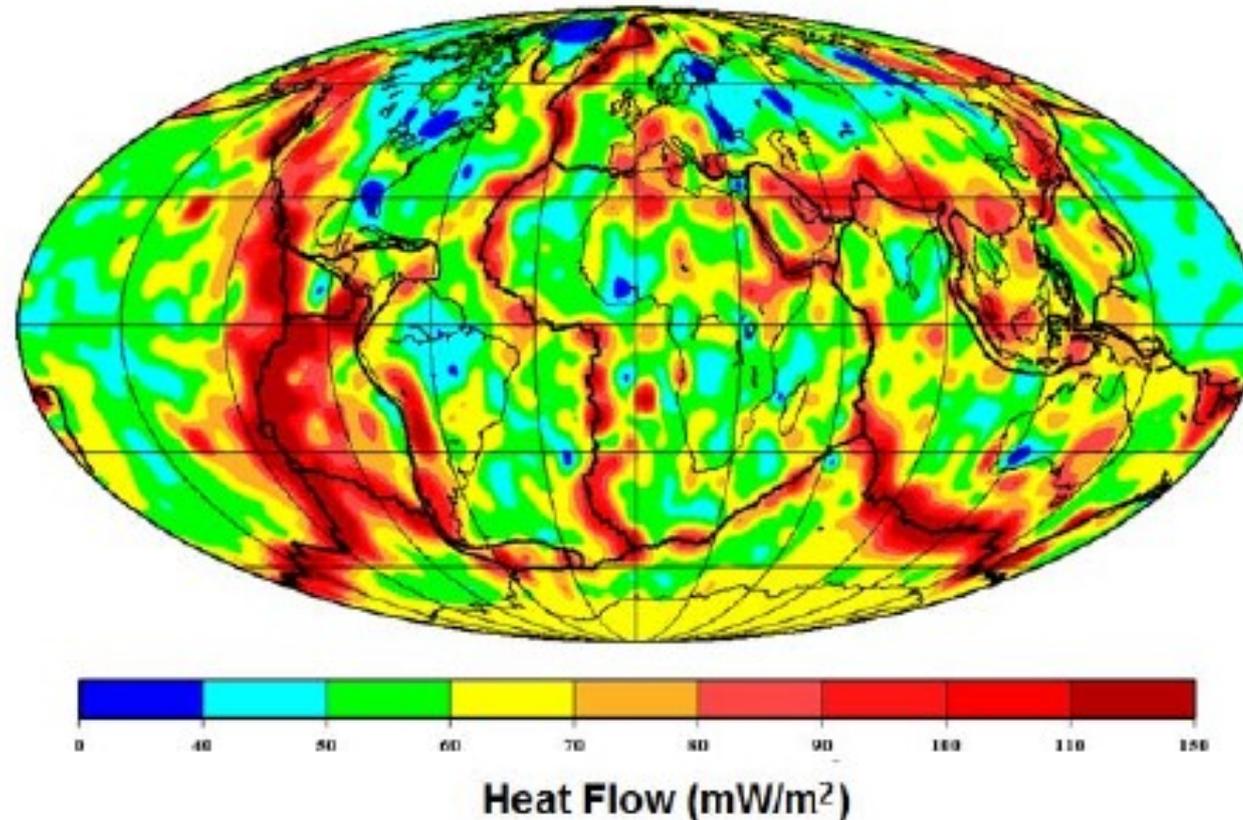
Gradiente geotérmico =  $dT/dz$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )

Fluxo térmico (vários componentes)

$Q = Q_m + Q_r$ ,  $Q_m = k \, dT/dz$ , onde  $k$ =cond. térmica,  
 $Q_r$  = calor radiogênico (unidade  $\text{mW}/\text{m}^2$ )



# Fluxo Térmico e Gradientes de Temperatura



**Fig. 2.** Global heat flow map derived from observational data (Vieira and Hamza, 2010) and estimated values based on heat flow-age relation (Hamza, 1967; Polyak and Smirnov, 1968; Hamza and Verma, 1969).

Hamsa & Viera  
Solid Earth, 3, 199–212, 2012

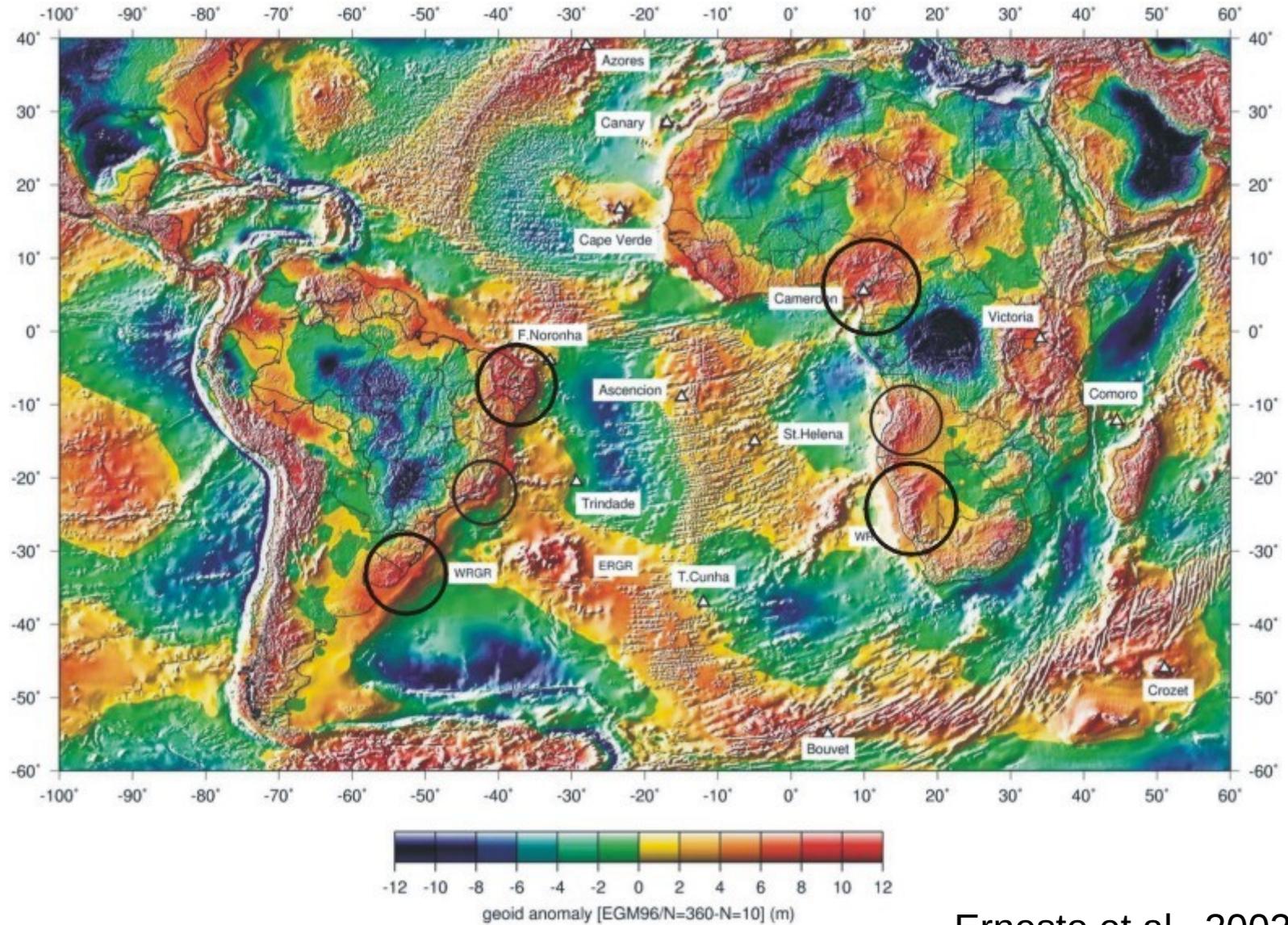
# Anomalias do Geóide

Métodos de Investigação

Estrutura Interna

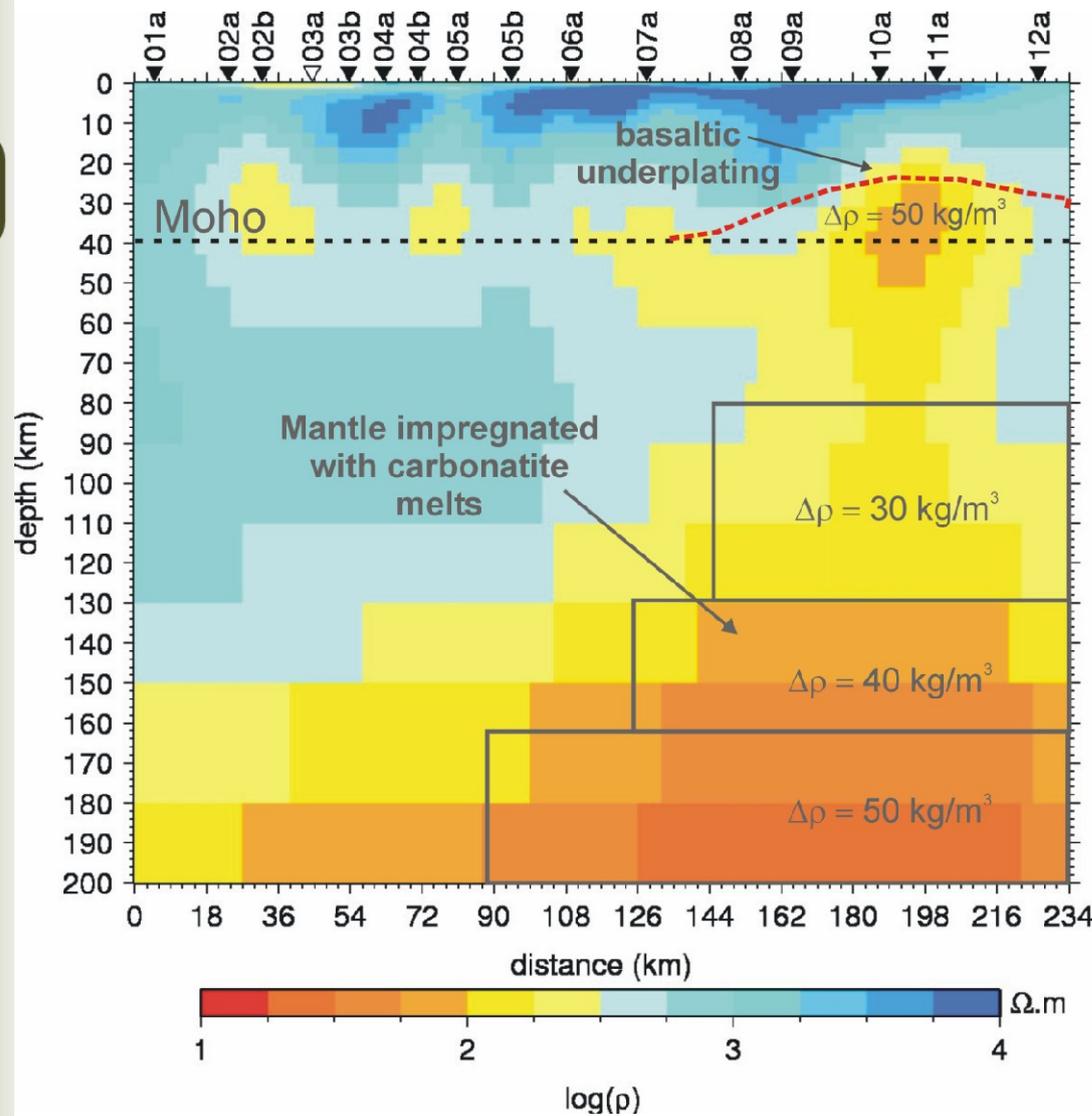
Tectônica de Placas

Esforços e deformação



Ernesto et al., 2002

# Resistividade elétrica & densidade - Magneto-Telúrico



Pinto et al., submetido

## Perfil PIU

Seção mostra que a litosfera cratônica do sul do craton São Francisco sofreu rejuvenescimento com entrada de carbonatitos e Fe. Carbonatitos explicam a diminuição resistividade elétrica (Gaillard et al., 2008)

Idade do início do metassomatismo estimada em 600-500 Ma. Underplating crustal e intrusão diques do Cretáceo Inferior mais jovem, associados à abertura do Atlântico Sul, contem percentual (3%) de carbonatitos em sua composição.

Métodos de Investigação

Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

## Conclusões e Perspectivas

### Métodos de Investigação

1. Grande avanço em estudos geofísicos, tanto em resolução como em cobertura global.
2. Integração de diferentes tipos de dados, fornece uma visão menos ambígua das propriedades físicas, petrológicas e reológicas da litosfera e interior mais profundo. Pode-se inferir a Participação do núcleo externo líquido na dinâmica do interior da Terra.
3. Experimentos de laboratórios, relação entre propriedade física sob diversas condições de  $P$  e  $T$ , avanços no conhecimento de física mineral para interpretar dados sísmicos.

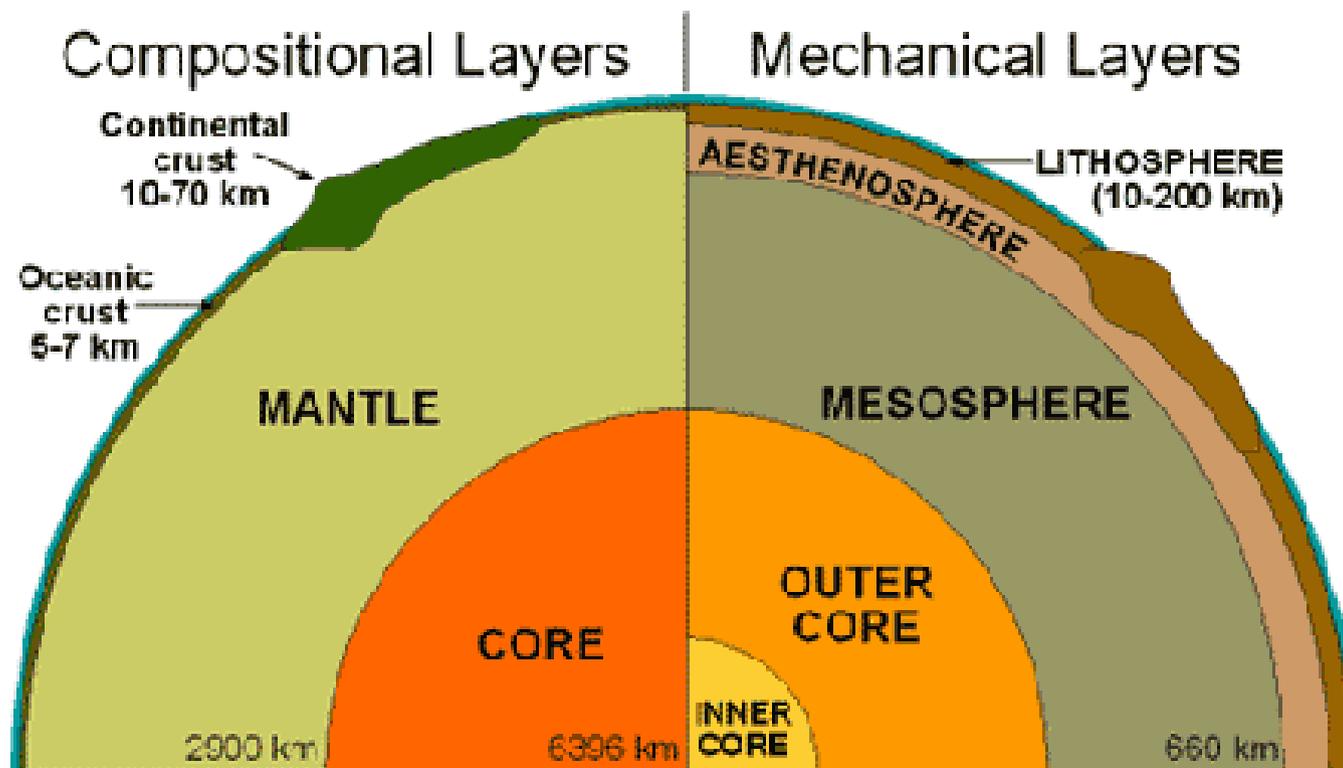
### Estrutura Interna

### Tectônica de Placas

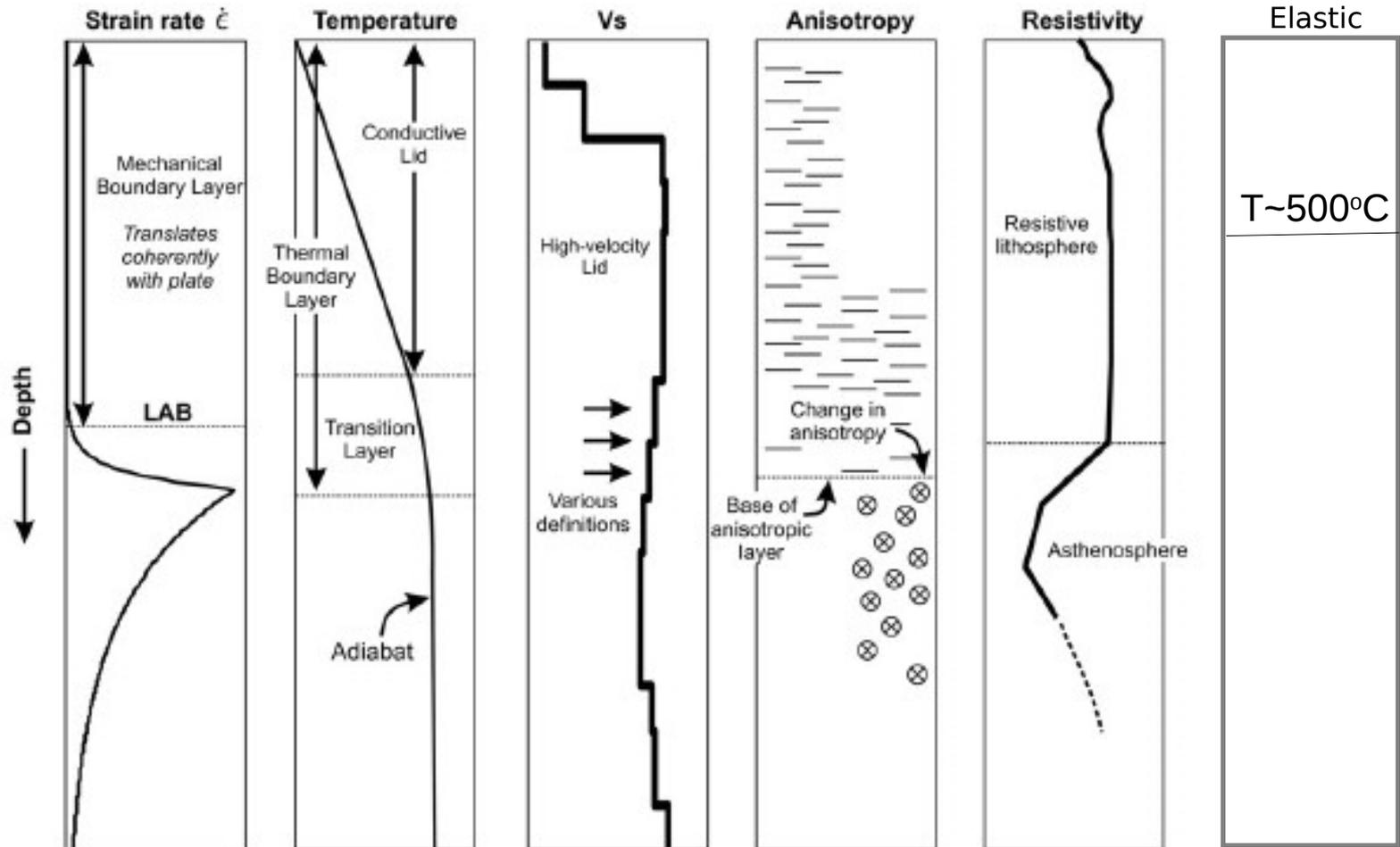
### Esforços e deformação

## Estrutura e Dinâmica interna da Terra

Para entendermos os processos relacionados à dinâmica interna da Terra, vamos rever sua estrutura interna. Há duas formas principais de se descrever a estrutura interna do planeta: com base na variação, em profundidade, da composição ou do comportamento mecânico.



## Definições de Litosfera: Depende do Método Utilizado



Eaton et al., 2008

## Dinâmica Global

A dinâmica interna da Terra é resultado dos processos de perda do calor interno, gerado principalmente por decaimento radioativo de elementos instáveis (principalmente U, Th e K).

A litosfera comporta-se como isolante térmico, e correntes de convecção na astenosfera aplicam forças e provocam gradientes térmicos na litosfera, induzindo movimento.

## Tectônica Global

### *Teoria geossinclinal*

-1857 - James Hall (1811-1898) - Cadeias de montanhas coincidem com antigas bacias profundas. Subsidência por sobrecarga e soerguimento por pressão lateral do embasamento.

- 1873 - James Dwight Dana (1813-1895) – Introdução do termo geossinclinal. Contração da Terra por resfriamento explica o soerguimento e deformação.

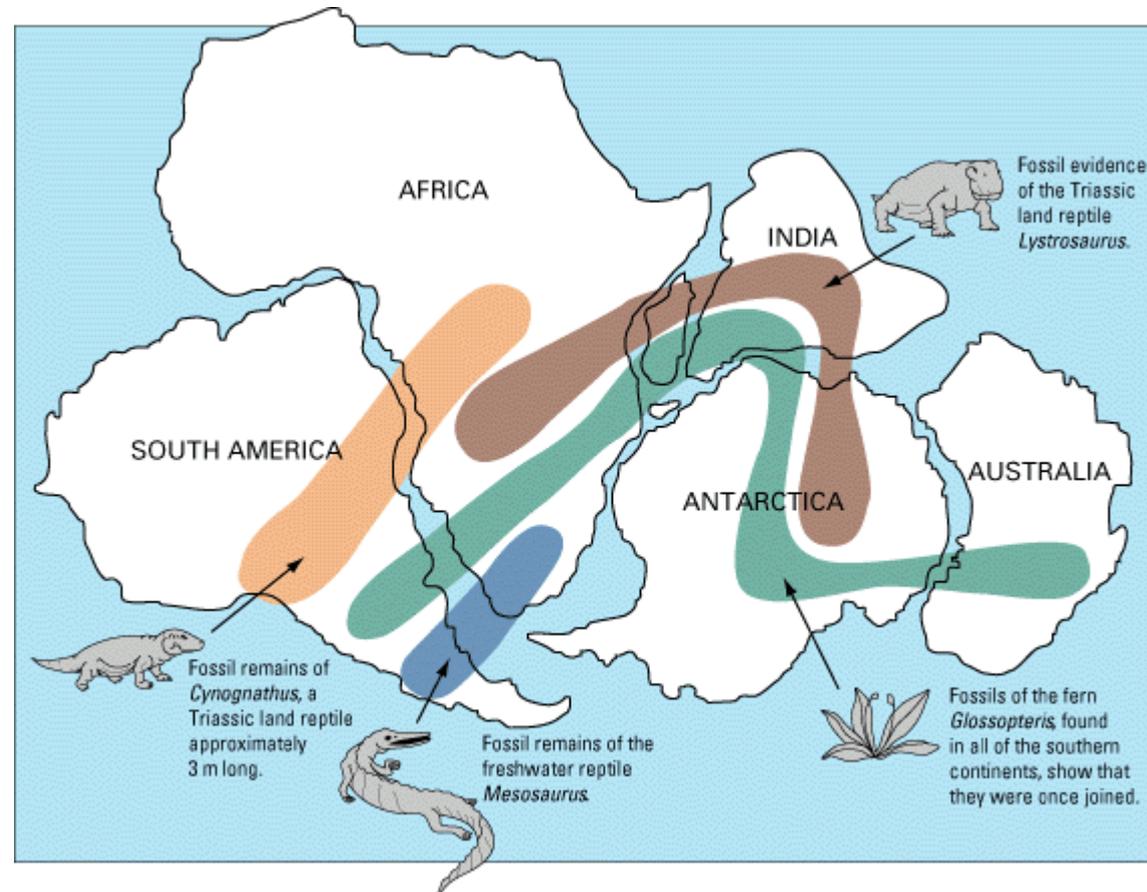
- 1889 - Clarence Edward Dutton (1841-1912) – Anomalias gravimétricas do fundo oceânico. Isostasia e compressão lateral da crosta oceânica densa para explicar o soerguimento e deformação.

- 1940 – Hans Stille – Eugeossinclínio e Miogeossinclínio.

**Importância da teoria** – ênfase na descrição e relação direta com a estratigrafia e análise de bacias – “orógenos são bacias deformadas”.

## A deriva dos continentes de Wegner

- 1912 - Alfred Wegner – Deriva dos continentes para explicar coincidência de forma das costas atlânticas. Evidências paleontológicas e distribuição de depósitos glaciais. Supercontinente *Pangea*.



## Evidências da Tectônica de Placas

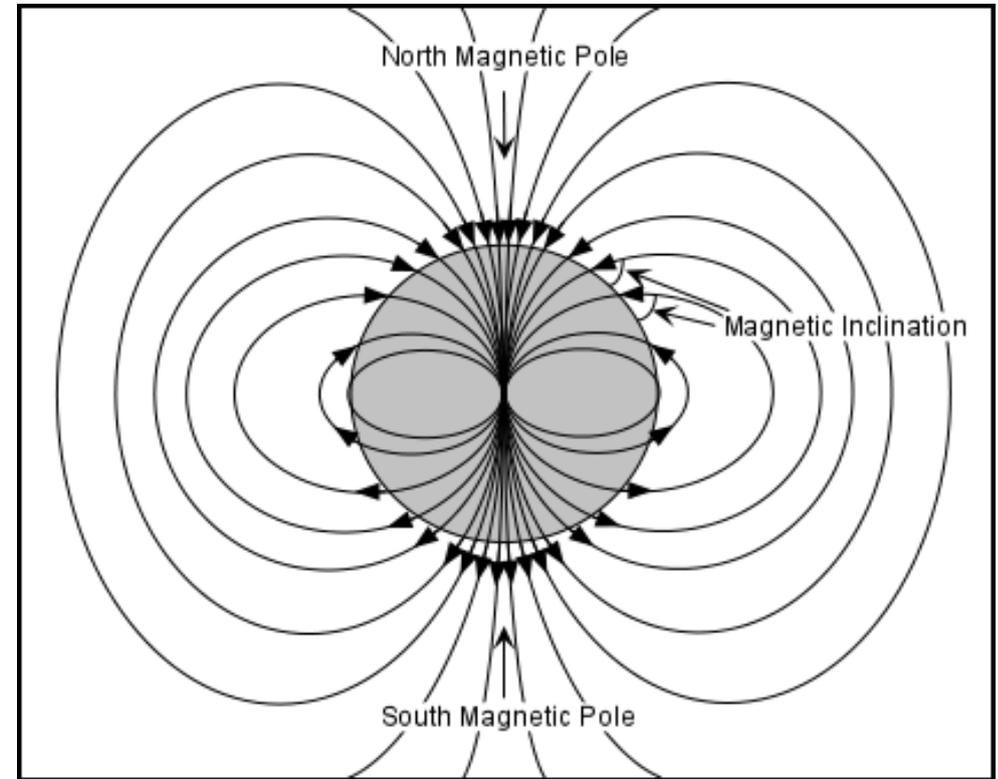
- O renascimento da deriva continental – paleomagnetismo de rochas

- O espalhamento do fundo oceânico

- Cinturões de vulcanismo e sismicidade

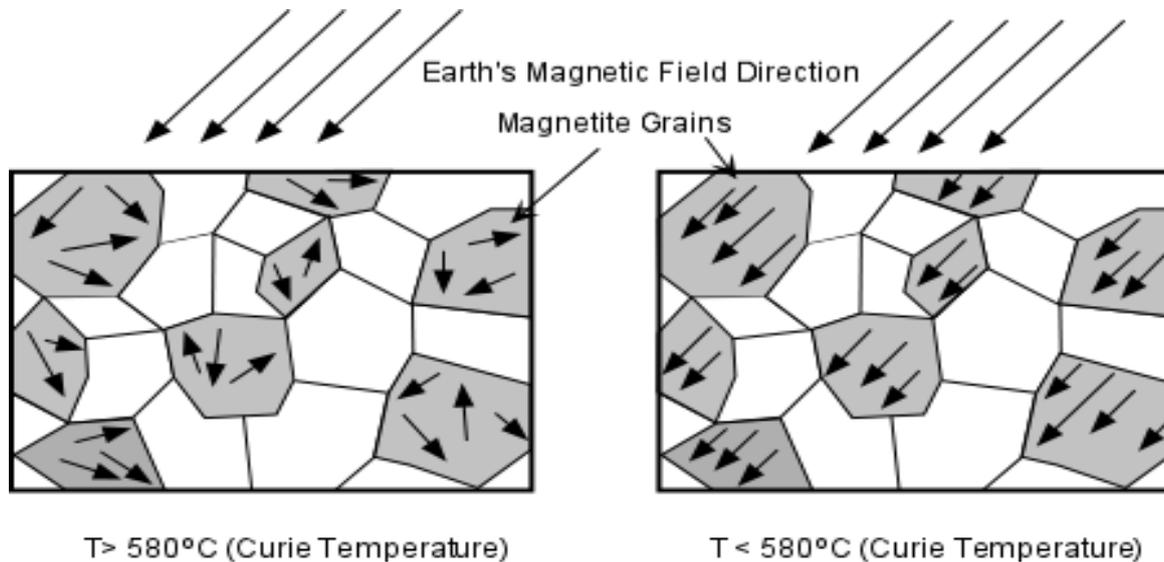
Introdução

O campo magnético da Terra – dipolo centrado coincidente com o eixo de rotação.



Métodos de Investigação

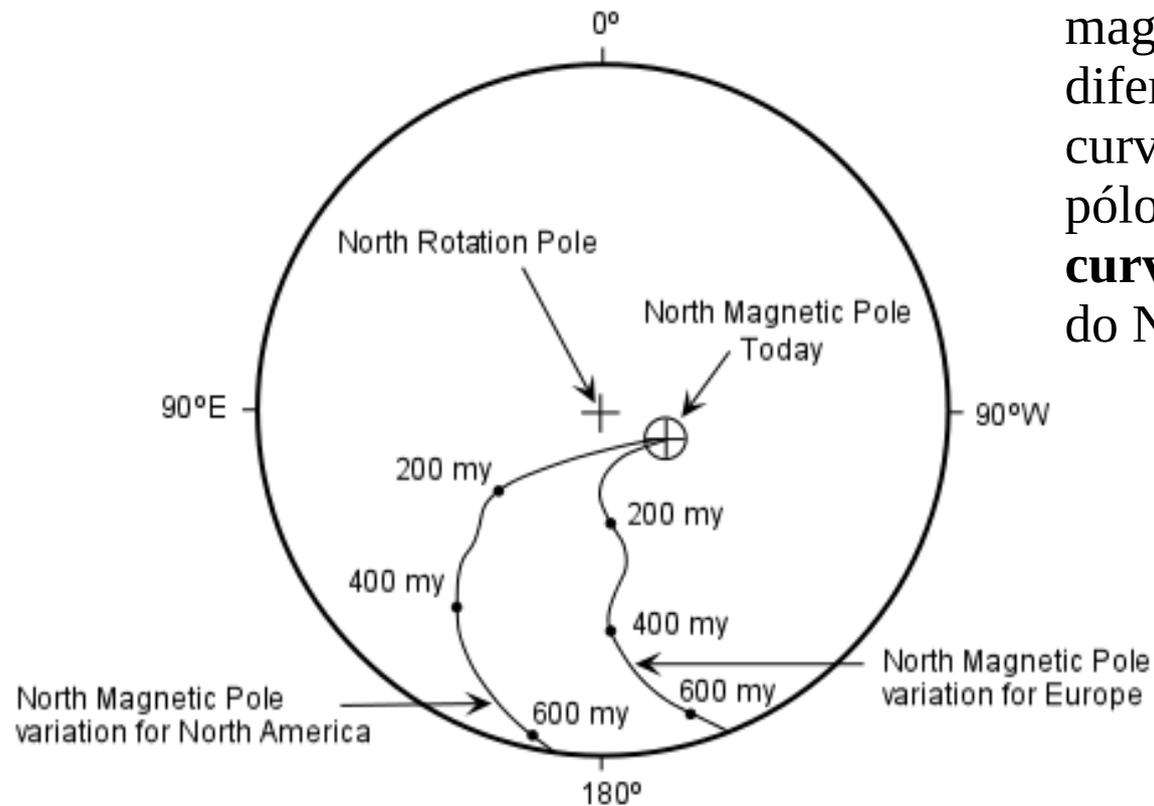
Estrutura Interna



Tectônica de Placas

Esforços e deformação

Minerais magnéticos formados ou aquecidos a temperaturas acima da de Currie registram antigas direções a inclinações das linhas de força.

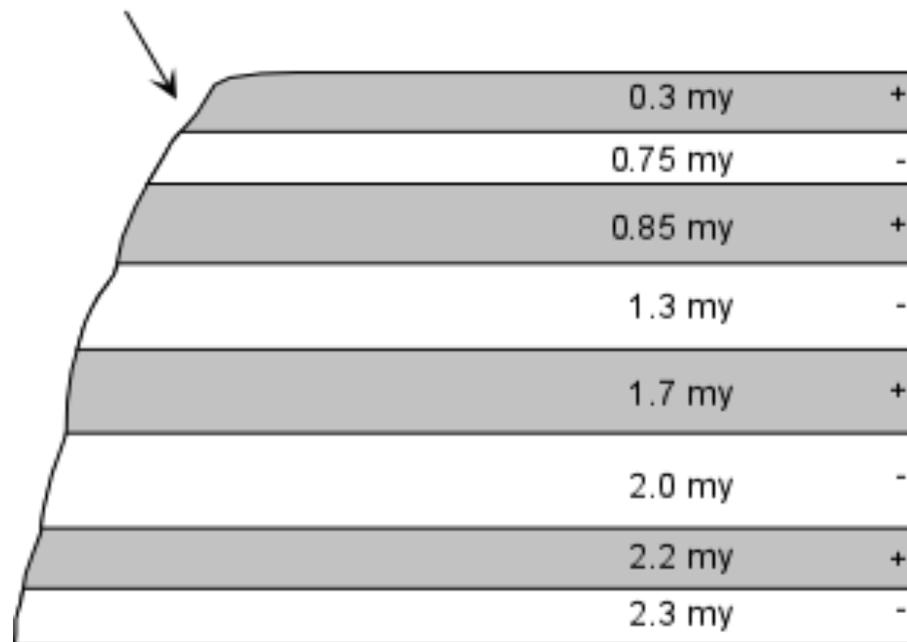


A variação das direções e inclinações do campo magnético local em rochas de diferentes idades mostrou uma curva de variação aparente do pólo para a Europa e **uma curva diferente** para a América do Norte.

Importante evidência para a movimentação relativa dos continentes. A teoria de Wegner volta a ser discutida.

## Reversões de polaridade em sucessões vulcânicas e a escala magnética do tempo

Pile of lava flows with dates determined by radiometric techniques



+ = normal magnetic polarity

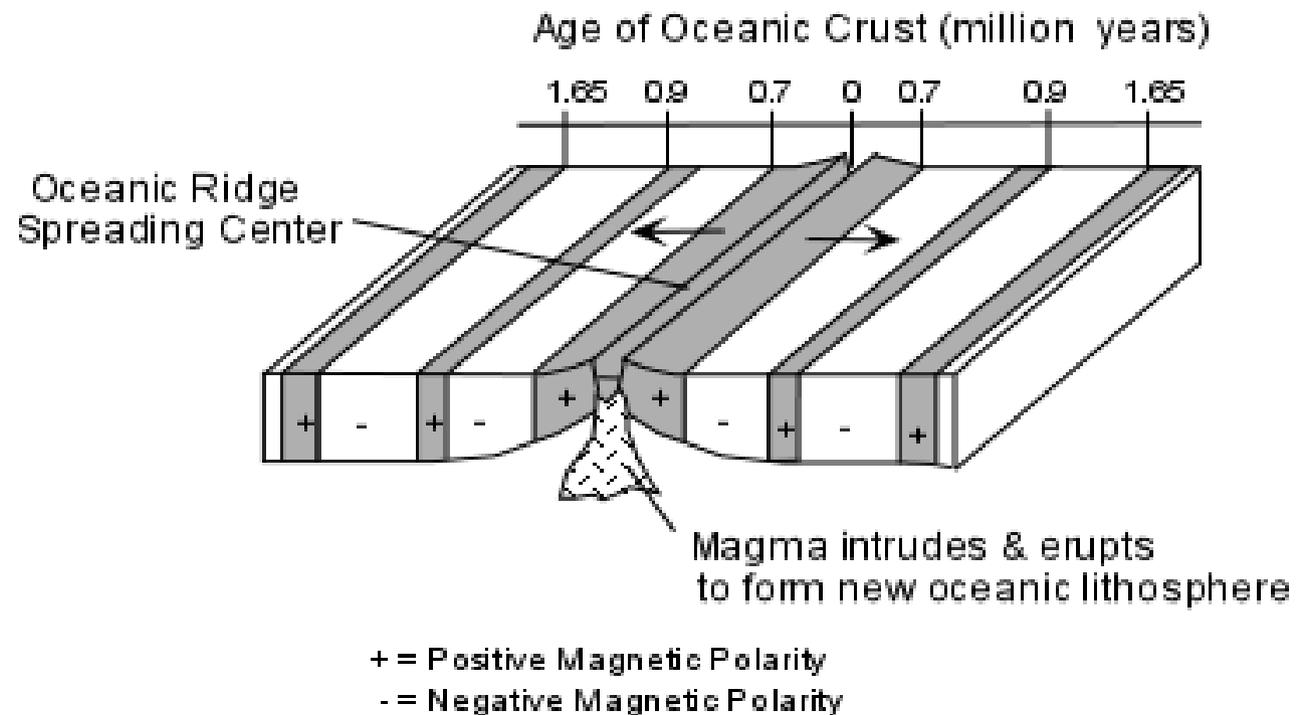
- = reverse magnetic polarity

Estudos militares do fundo oceânico:

Trincheiras e cadeias meso-oceânicas.

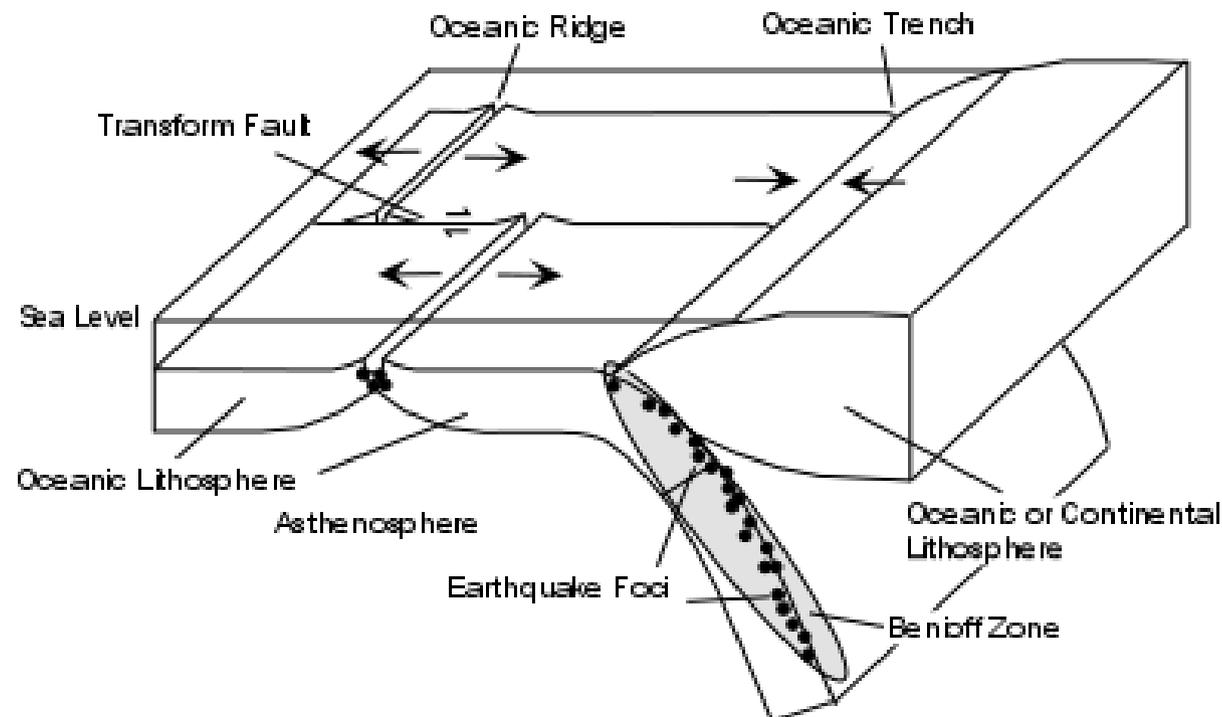
Pares de faixas de anomalia magnética paralelos às meso-oceânicas.

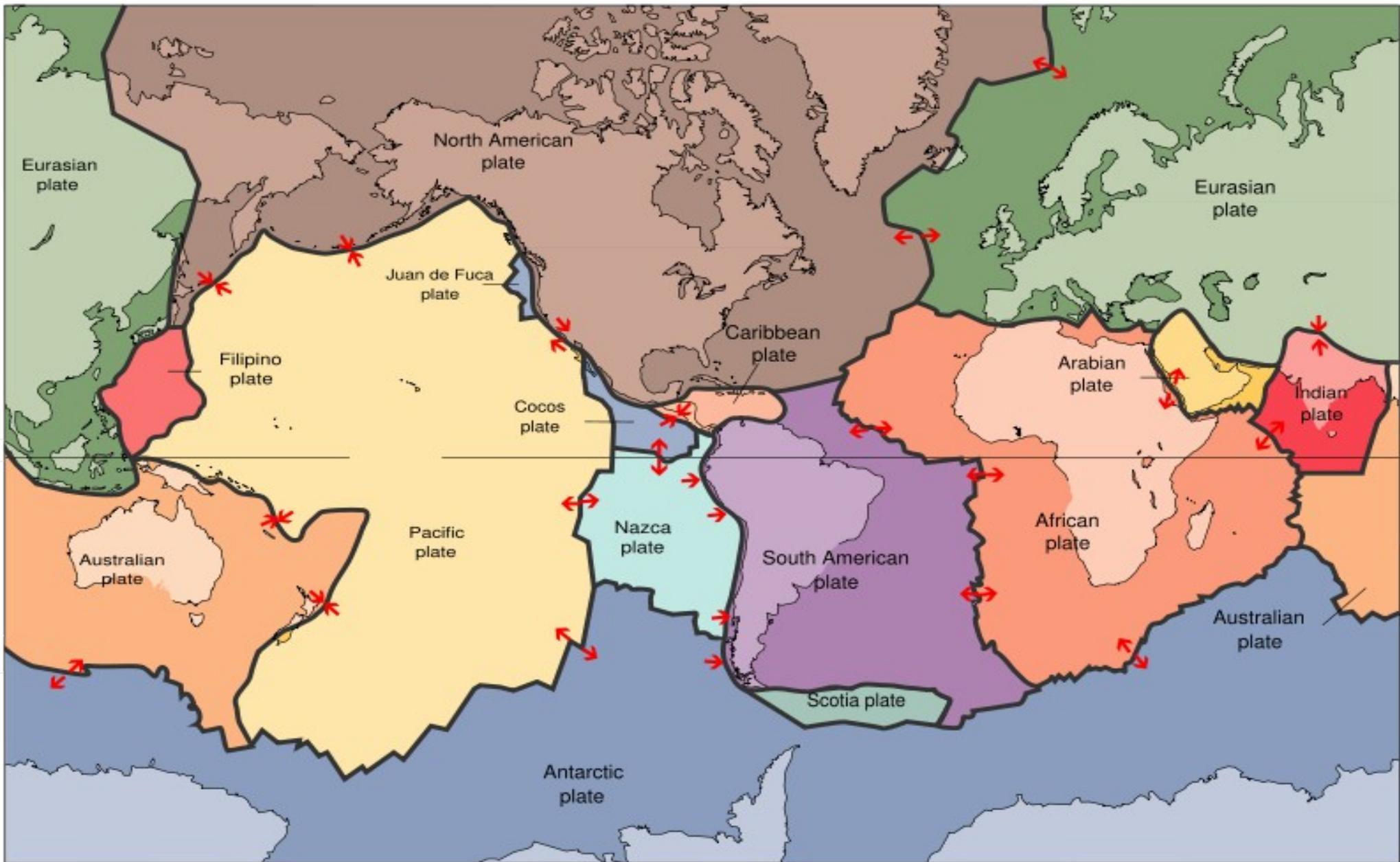
Juntando as evidências: a teoria de Vine, Matthews, and Morely.



Se os oceanos se espalham, com criação de nova litosfera, tem de haver consumo de litosfera em algum lugar – **zonas de Benioff e trincheiras oceânicas**.

Combinando as evidências de formação nas meso-oceânicas, deriva dos continentes e consumo de litosfera nas zonas de subducção, surge a teoria da **Tectônica de Placas**.





## Limites entre placas:

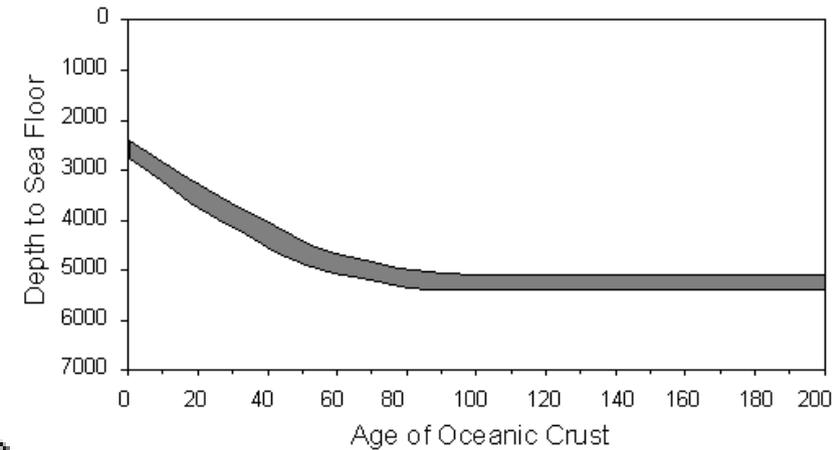
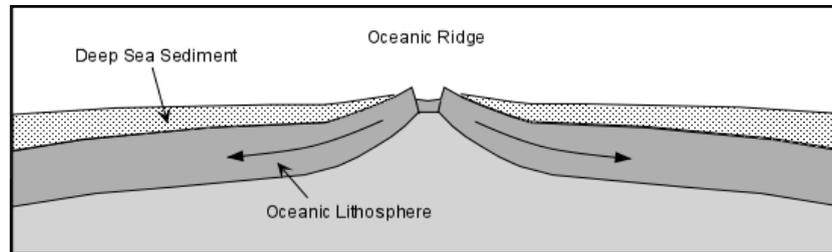
- Divergentes
- Convergentes
- Transformes

Formação de bacias é um processo importante nos três tipos de limites, além dos contextos intraplaca, gerando bacias com características particulares que serão discutidas ao longo do curso.

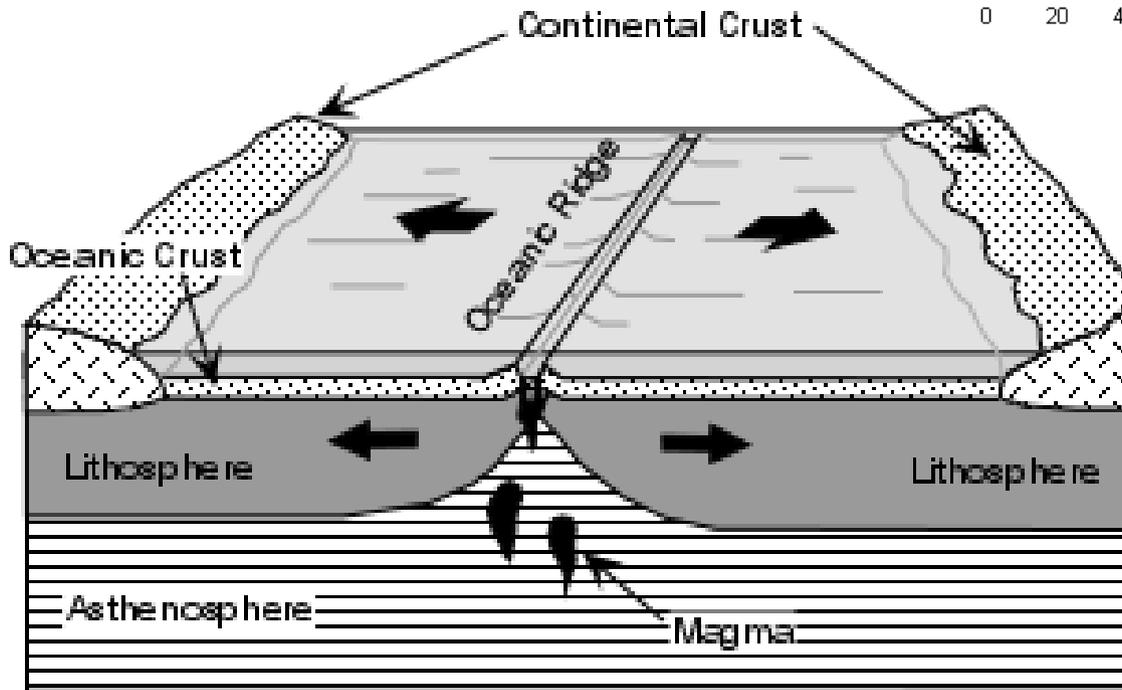
## **Interação Divergente de Placas**

- Rifts – depressões sobre zonas de afinamento litosférico.
- Oceanos – litosfera jovem, formada por magmas de fusão astenosférica em regiões de afastamento de placas.

Introdução



Métodos de Investigação



Diverging Plate Boundary  
Oceanic Ridge - Spreading Center

Limite divergente com meso-oceânica e relação entre idade e profundidade do fundo oceânico

Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

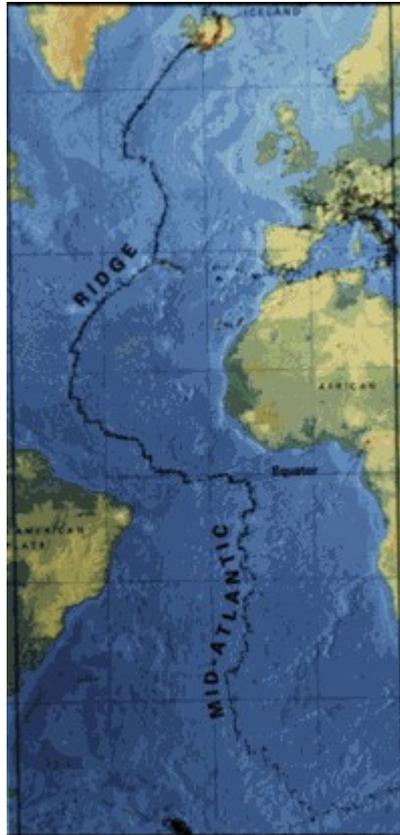
Introdução

Métodos de Investigação

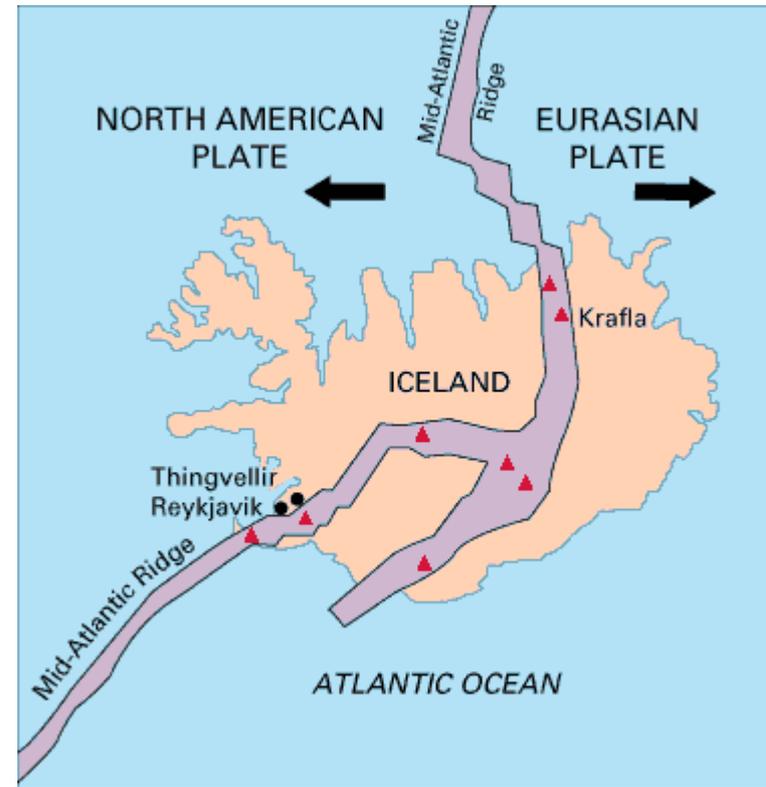
Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação



Dorsal Meso-Atlântica



Exposição da dorsal acima do nível do mar

Introdução

## **Produtos Geológicos da interação divergente de placas:**

- Bacias distensionais
- Vulcanismo básico e ácido
- Nova crosta oceânica

Métodos de  
Investigação

Estrutura  
Interna

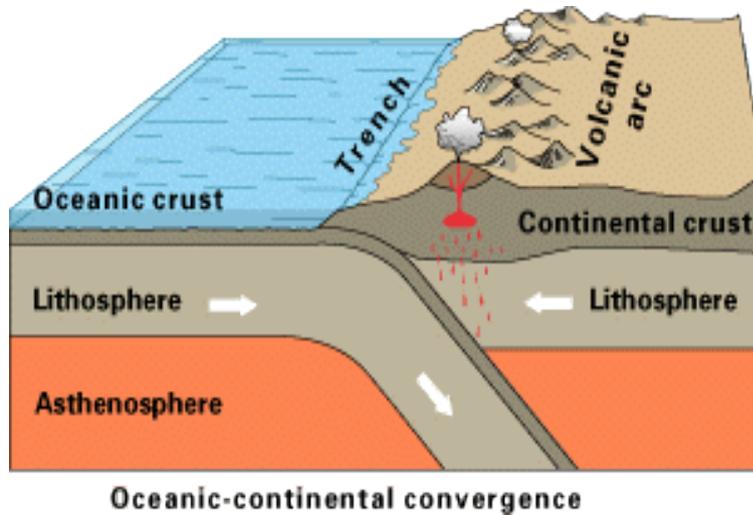
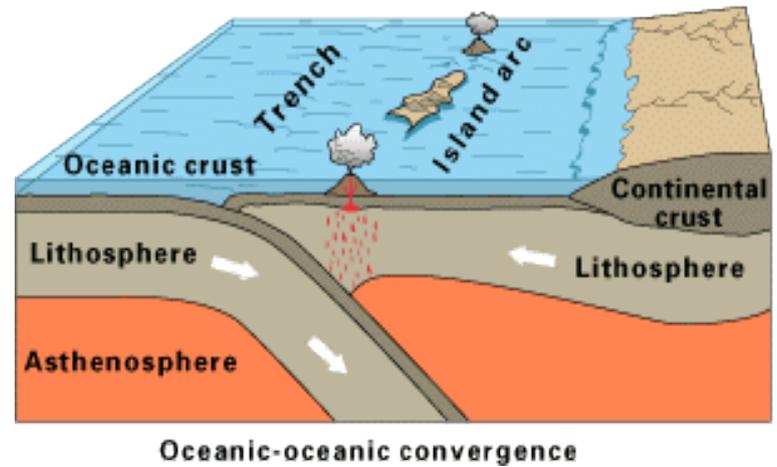
**Tectônica  
de Placas**

Esforços e  
deformação

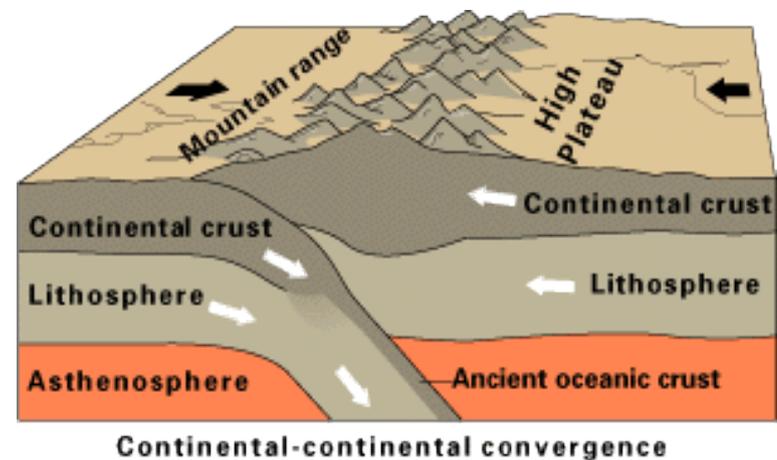
## Interação Convergente de Placas - Orogênese

- Orogênese – formação de cadeias de montanhas (não todas): interação convergente de placas.
- Orógenos: produtos da interação convergente de placas – Subducção – Colisão.
- Tipos de interação:
  1. Subducção de litosfera oceânica sob oceânica
  2. Subducção de litosfera oceânica sob continental
  3. Colisão continental

Limite convergente oceano-oceano: Arco de Ilhas

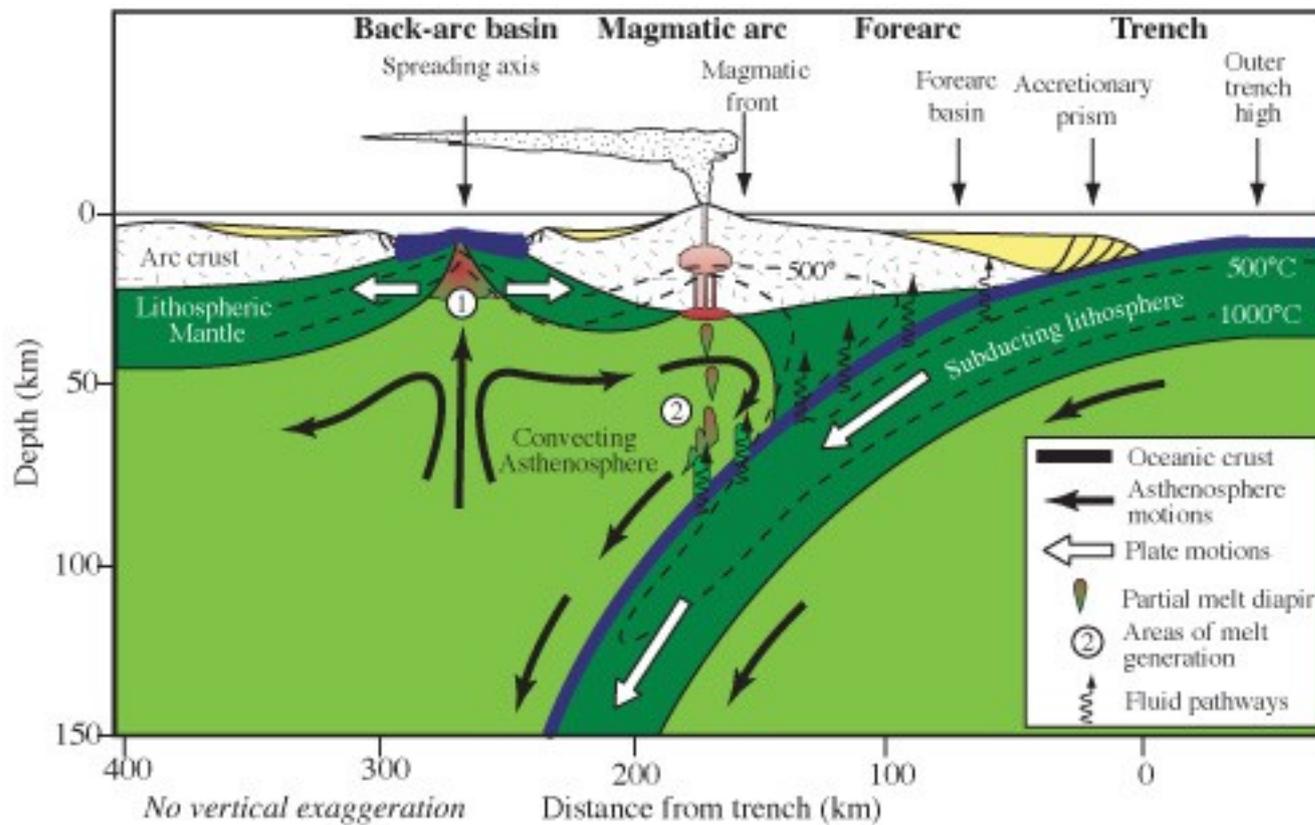
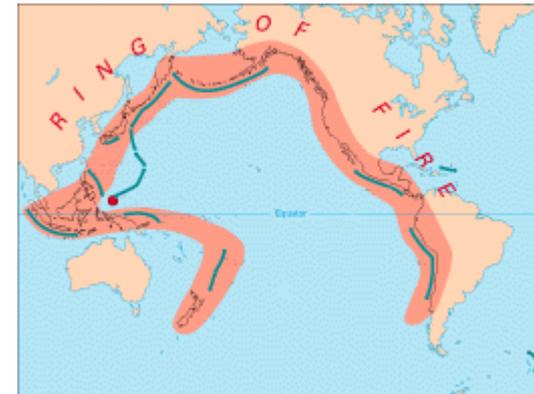


Limite convergente oceano-contidente: Arco Magmático



Limite convergente continente-contidente: Orógeno Colisional

Cinturão circunpácífico formado por arcos de ilha e magmáticos.



Introdução

## **Produtos Geológicos da interação convergente de placas 1 Orógenos de Subducção:**

- Complexos de subducção (prismas acrescionários)
- Magmatismo intenso (plutônicas e vulcânicas)
- Bacias sedimentares de ante e back arco.

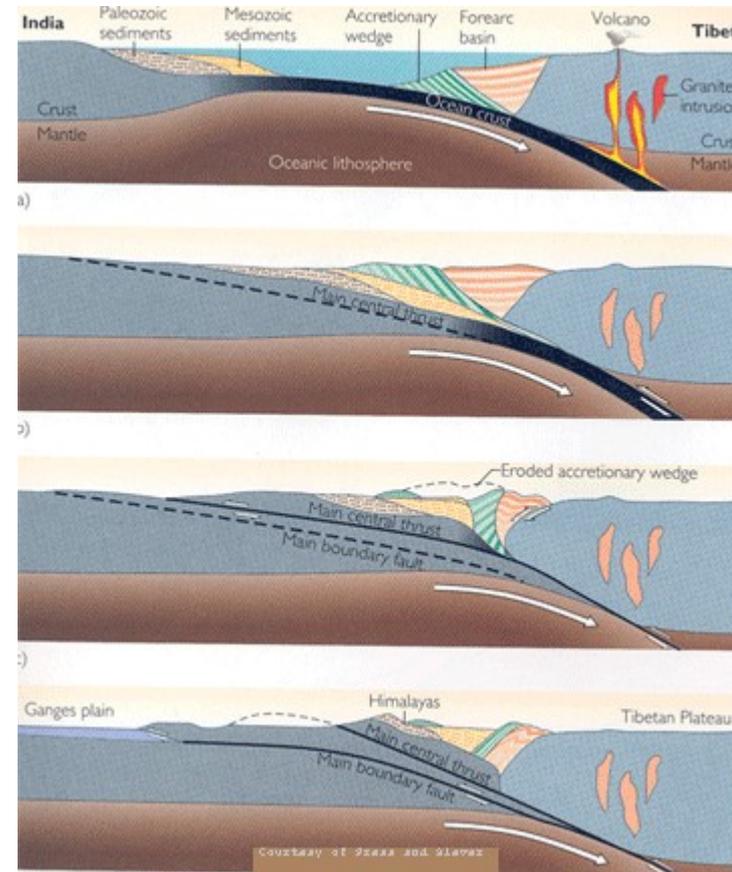
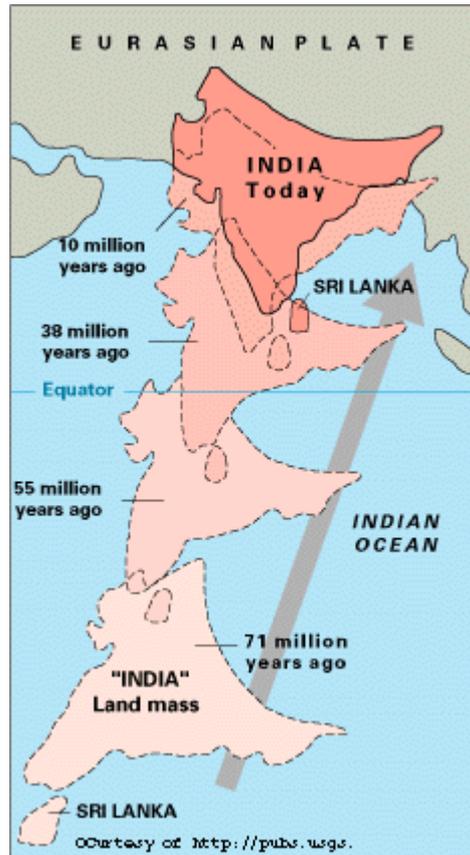
Métodos de  
Investigação

Estrutura  
Interna

**Tectônica  
de Placas**

Esforços e  
deformação

## Orógenos Colisionais



Movimento da placa da Índia em direção à Ásia (apenas porção continental representada)

Evolução do orógeno colisional Himalaiano.

Introdução

## **Produtos Geológicos da interação convergente de placas 2 Orógenos de Colisionais:**

- Deformação compressiva
- Metamorfismo regional
- Plutonismo
- Bacias sedimentares de antepaís

Métodos de  
Investigação

Estrutura  
Interna

**Tectônica  
de Placas**

Esforços e  
deformação

Introdução

## **Interação Transforme de Placas**

- Falhas transformes oceânicas
- Falhas transformes continentais

Métodos de  
Investigação

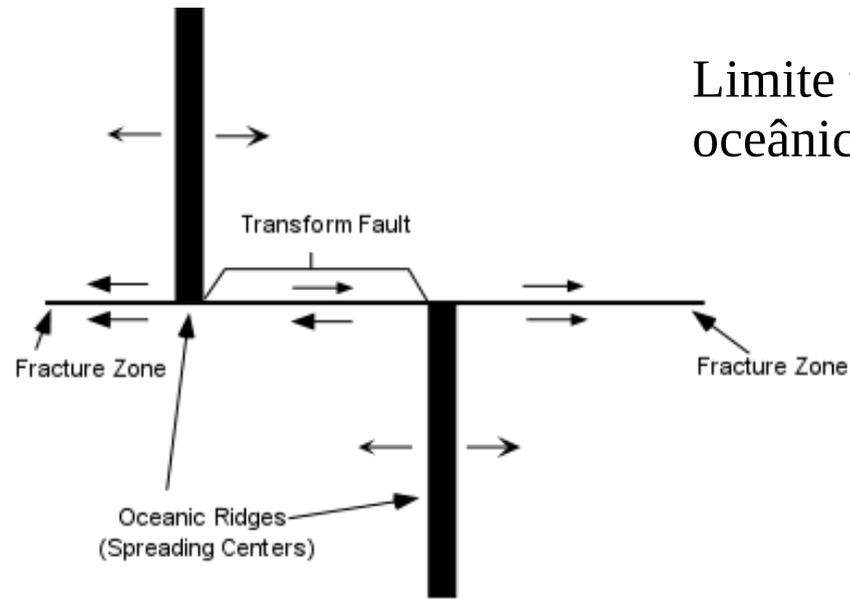
Estrutura  
Interna

**Tectônica  
de Placas**

Esforços e  
deformação

Introdução

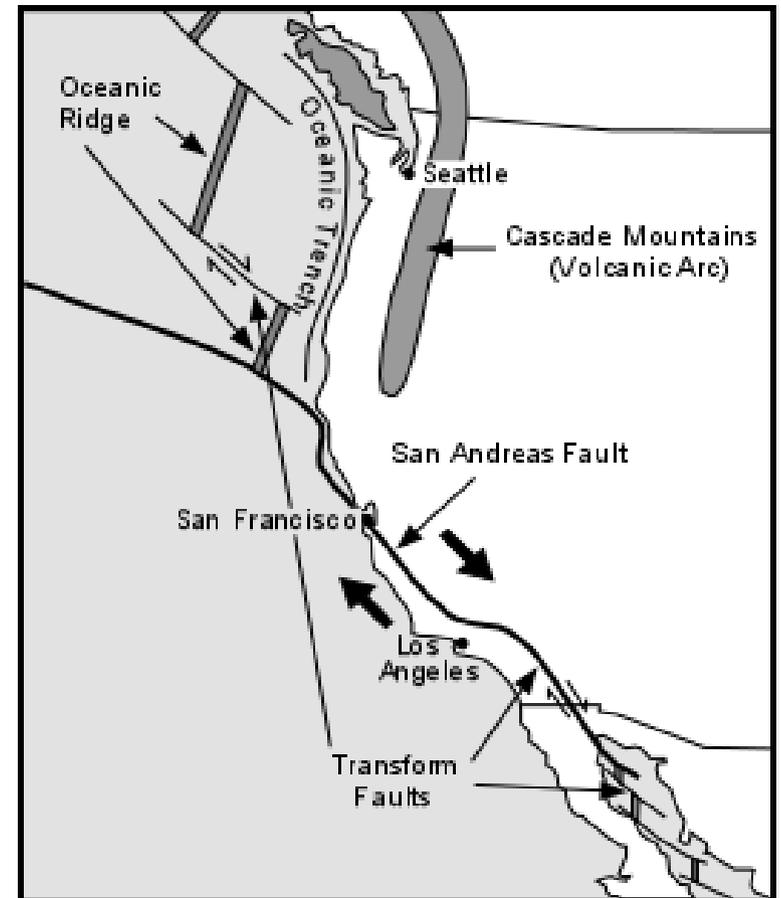
Limite transforme entre meso-oceânicas



Métodos de Investigação

Estrutura Interna

Limite transforme em crosta continental



Tectônica de Placas

Esforços e deformação

Introdução

## **Produtos Geológicos da interação transforme de placas**

- Deformação transcorrente

- Bacias sedimentares

Métodos de  
Investigação

Estrutura  
Interna

**Tectônica  
de Placas**

Esforços e  
deformação

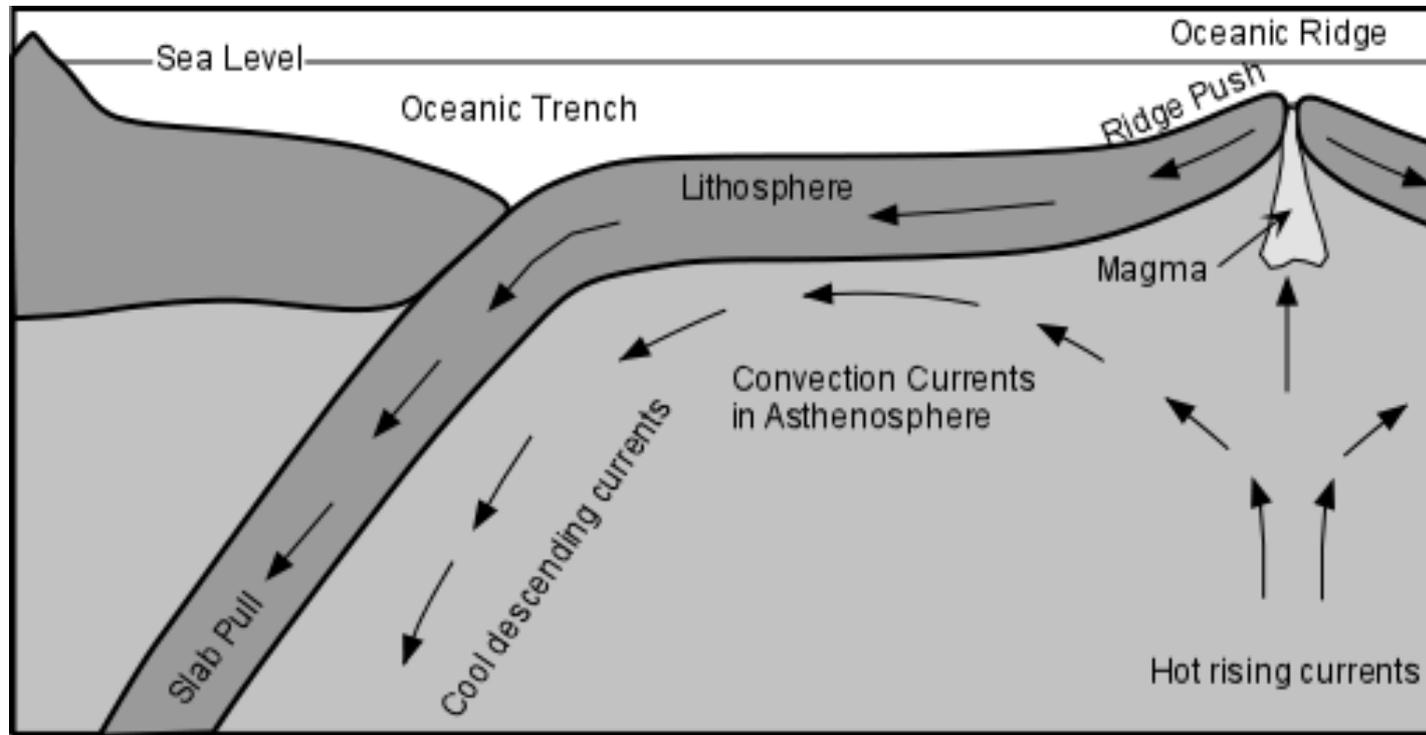
Introdução

Métodos de Investigação

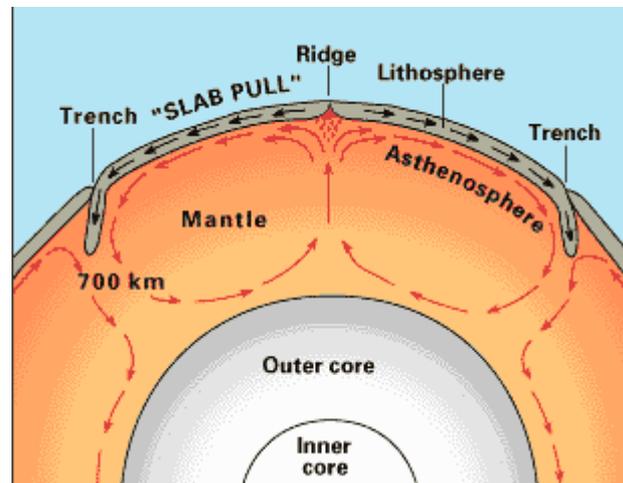
Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

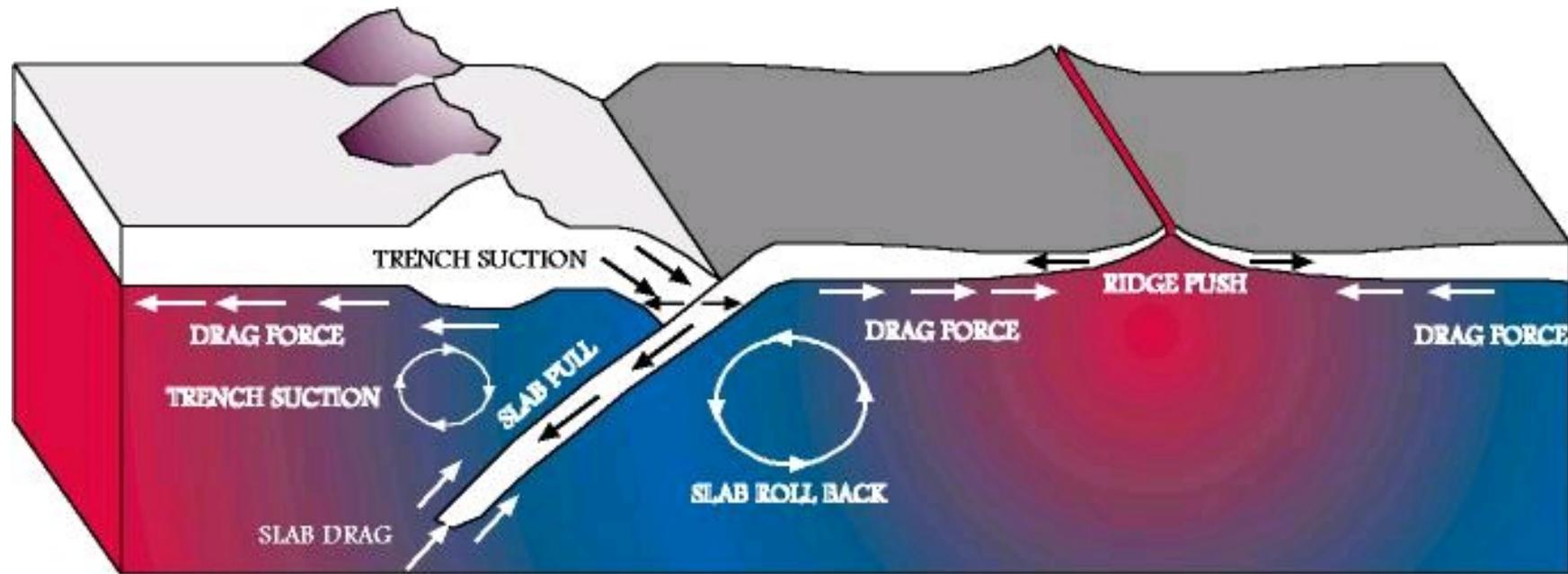


Mecanismo causador da Tectônica de Placas: correntes de convecção na astenosfera e na litosfera (*ridge push* e *slab pull*).



## Fontes de Forças Tectônicas

### Renováveis



Não-Renováveis: Erosão, Flexura, Variação lateral densidade

## Fontes de Forças Tectônicas

- A hipótese atual para a origem do movimento das placas é diferente da hipótese original de arrasto por convexão mantélica.
- Essa diferença tem implicação na nossa compreensão dos processos tectônicos. Ex: O esforço não cessa com a “colisão” continental.

Não-Renováveis: Erosão, Flexura, Variação lateral densidade

# Tectônica de Placas

## Resulta de forças gravitacionais internas que atuam na litosfera

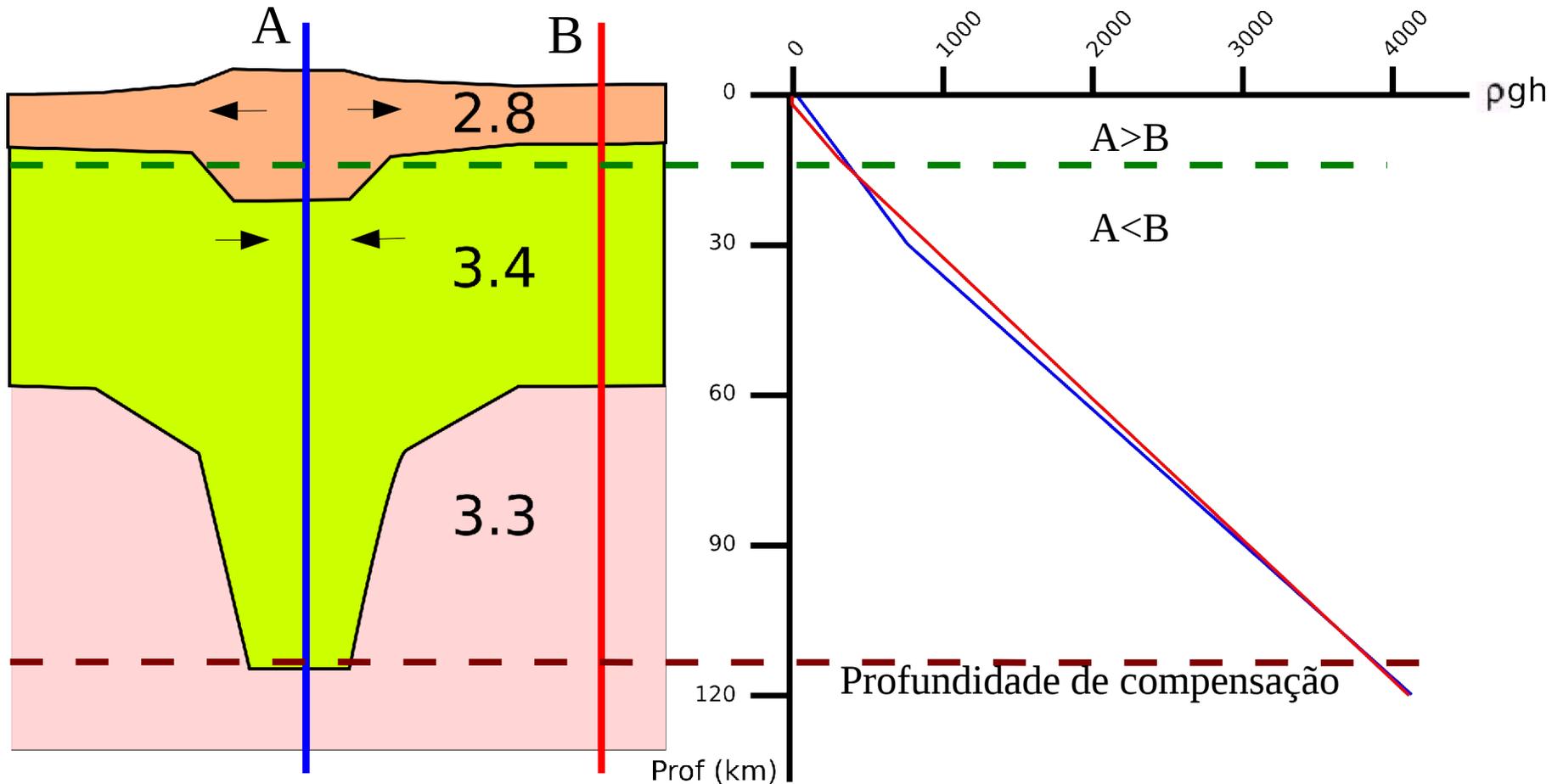
**As forças aumentam com a profundidade, portanto o equilíbrio estático não é possível  $\Rightarrow$  variação lateral de densidade (devido variação de temperatura ou composição)  $\Rightarrow$  variação lateral de forças gravitacionais  $\Rightarrow$  variação lateral de esforços que impulsionam as placas**

**$\therefore$  ESFORÇOS  $\Rightarrow$  DEFORMAÇÃO  $\Downarrow$**

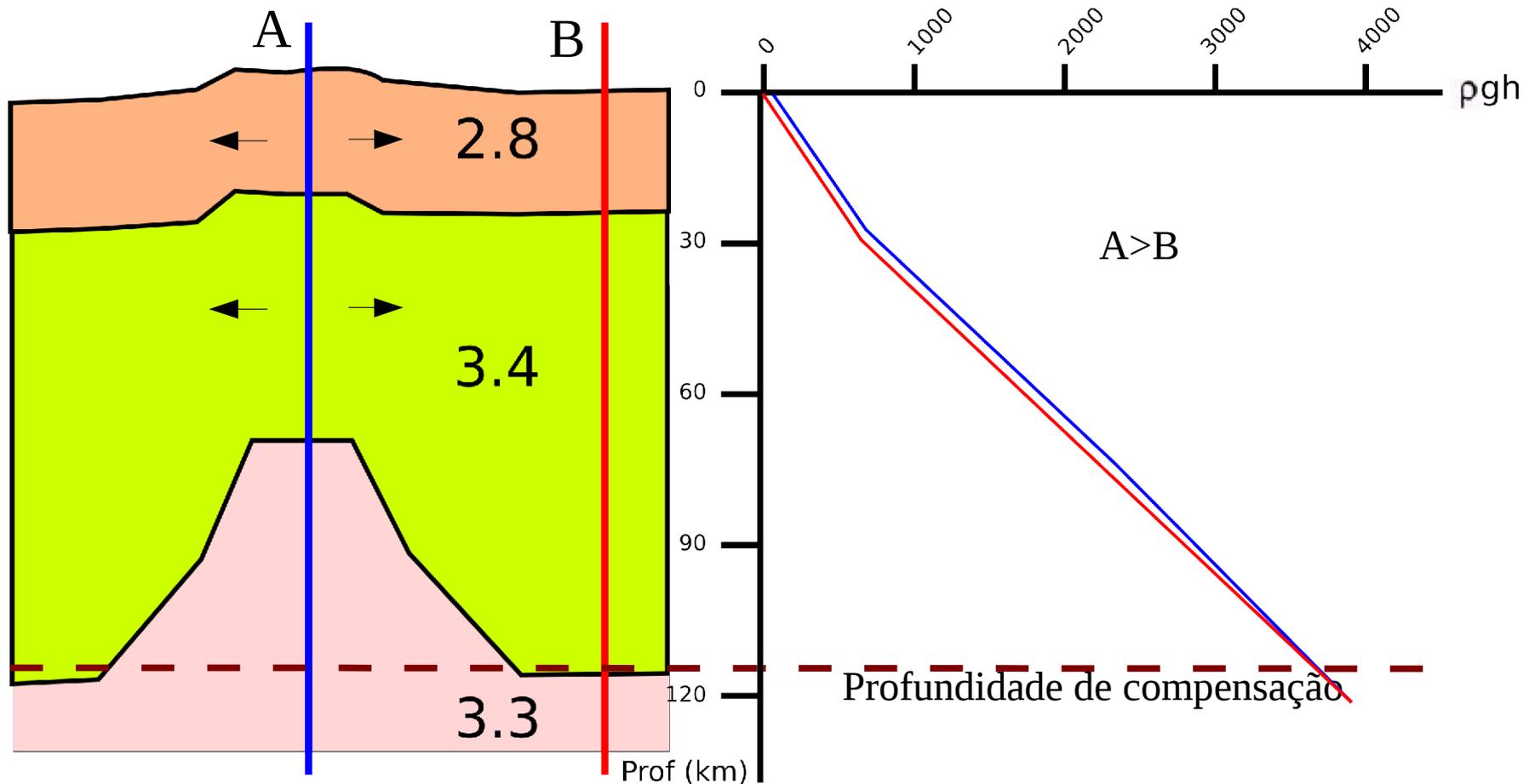
**(vetor: magnitude e direção)**

**Mecânica do meio-contínuo  $\Rightarrow$  1a. aproximação (meio homogêneo e isotrópico) ver Turcotte & Schubert, 2002**

## Variação da pressão litostática em profundidade - Crosta e Litosfera espessadas

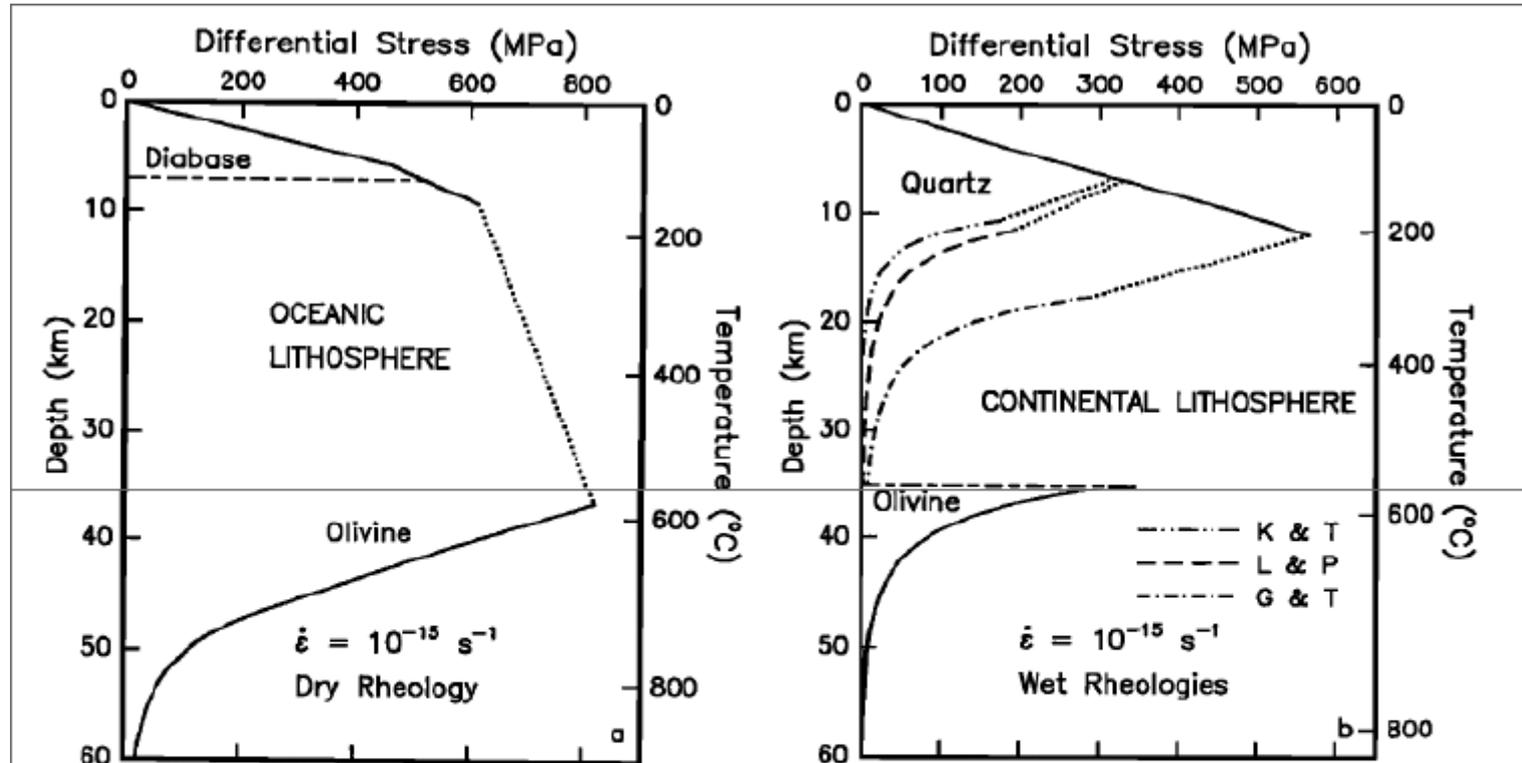


## Variação da pressão litostática em profundidade - Litosfera Estirada – Crosta Soerguida



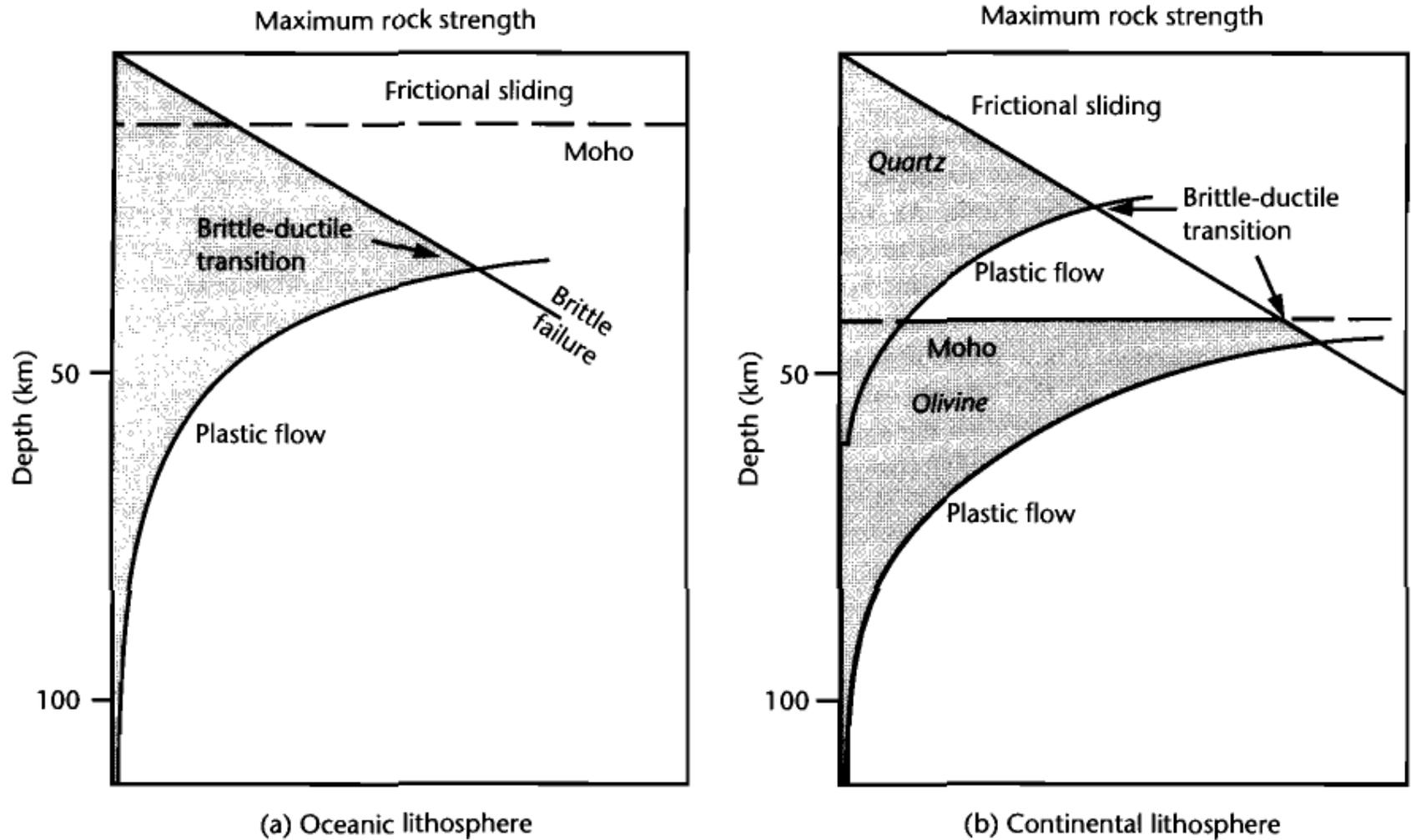
A própria ascensão de astenosfera causa distensão litosférica e o processo se retro-alimenta

## Envelopes de deformação para litosfera Continental e Oceânica



**Figure 9.** Strength envelopes for oceanic and continental lithosphere. (a) For the oceanic lithosphere, a geotherm for 60-m.y.-old lithosphere was used [e.g., *Turcotte and Schubert, 1982* pp. 163-167]. A rheology for dry olivine [*Chopra and Paterson, 1984*] was used because water strongly partitions into the melt during partial melting. (b) For the continental lithosphere, a geotherm for a surface heat flow of  $60 \text{ mW m}^{-1}$  was employed [*Chapman, 1986*]. The rheologies for wet quartzite are those used in Figure 5; the olivine rheology is for wet Anita Bay dunite from *Chopra and Paterson [1984]*. Wet rheologies were used, consistent with high fluid pressures in fault zones. Plastic flow strength was corrected for water fugacity using a water fugacity exponent of unity and assuming lithostatic pore pressure. The BDT and BPT, determined as described in the text, have been connected by a dotted line.

Kohlstedt et al., 1995



**Fig. 1.3** Strength profiles for the oceanic (a) and continental (b) lithosphere, based on Molnar (1988) and Sammonds (1999). The yield strength of the continental and oceanic lithosphere is plotted as a function of depth. The olivine rheology of the oceanic lithosphere provides a strong elastic core extending to depths of over 50 km. The quartz or quartz-felspar rheology of the continental lithosphere causes a weak, ductile layer at equivalent depths. A second brittle-ductile transition occurs in the mantle lithosphere because of the compositional change to an olivine rheology. The elastic lithosphere is the upper portion that is able to store elastic stresses over long time periods. The base of the thermal lithosphere is a mechanical boundary separating the relatively strong outer shell of the lithosphere from the very weak asthenosphere.

## Esforços e movimento de Placas

- A somatório do envelope de resistência dá a resistência total da litosfera.
- Esforços inferiores e esse valor são transmitidos pela Placa, não causando deformação permanente.

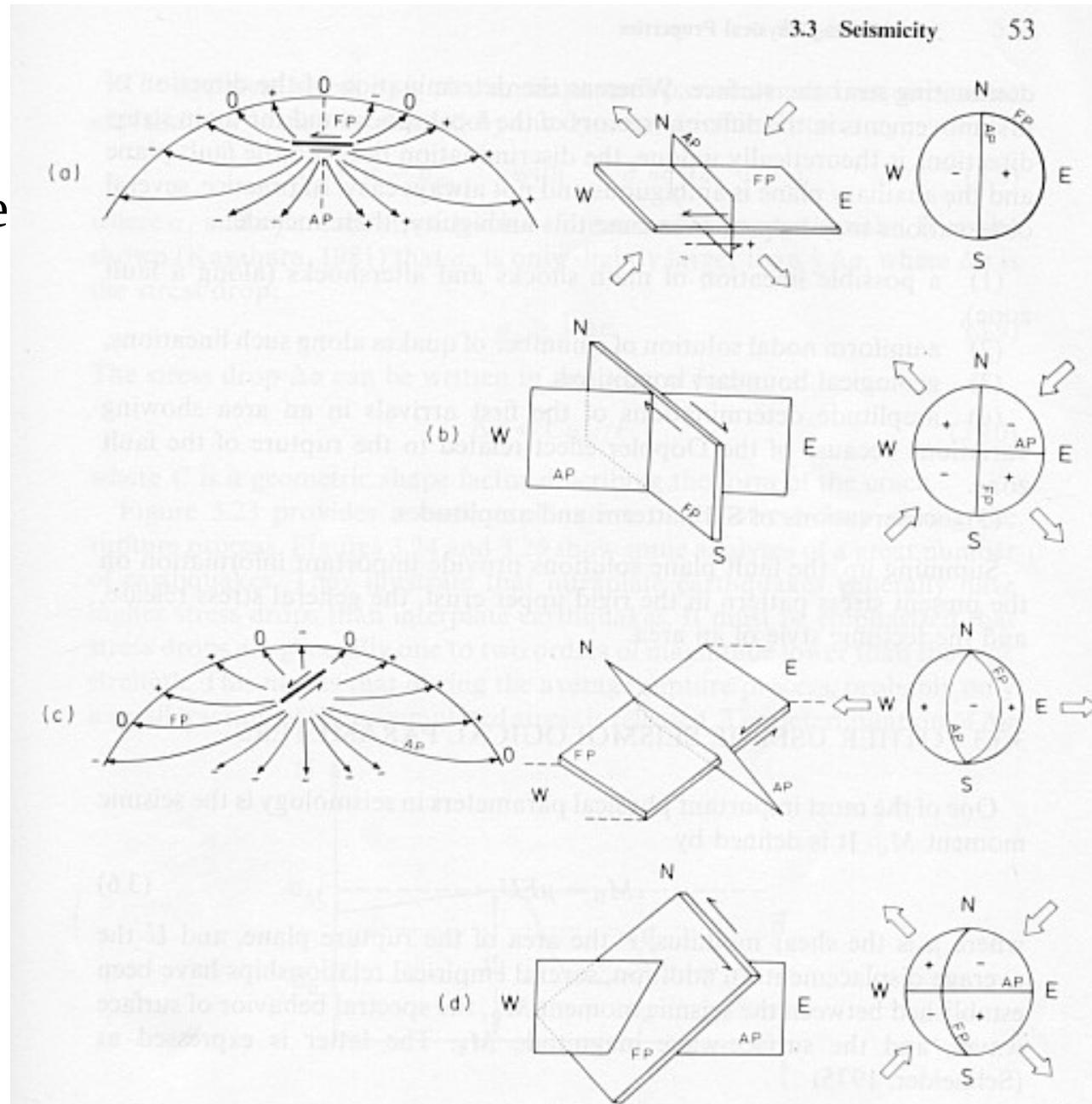
## **Estado real de tensão e movimento das placas: Fontes de Dados**

- Mecanismo Focal de Terremotos
- Break-outs em furos profundos
- Dados geológicos (falhas e dados sobre neotectônica)

Direção e natureza do esforço

# Mecanismo focal de terremotos

Meissner, 1986



## Mecanismo focal de terremotos

Meissner, 1986

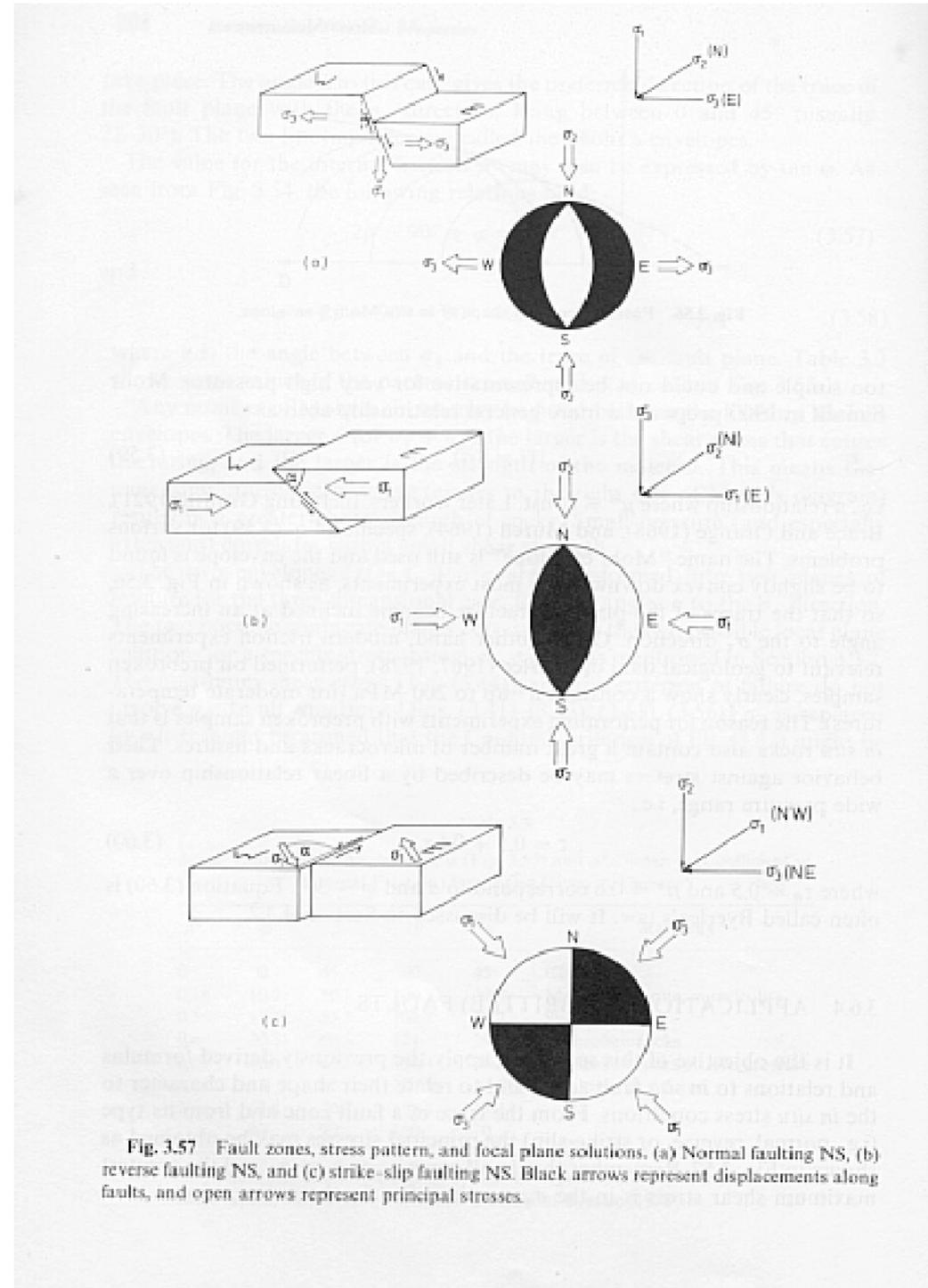
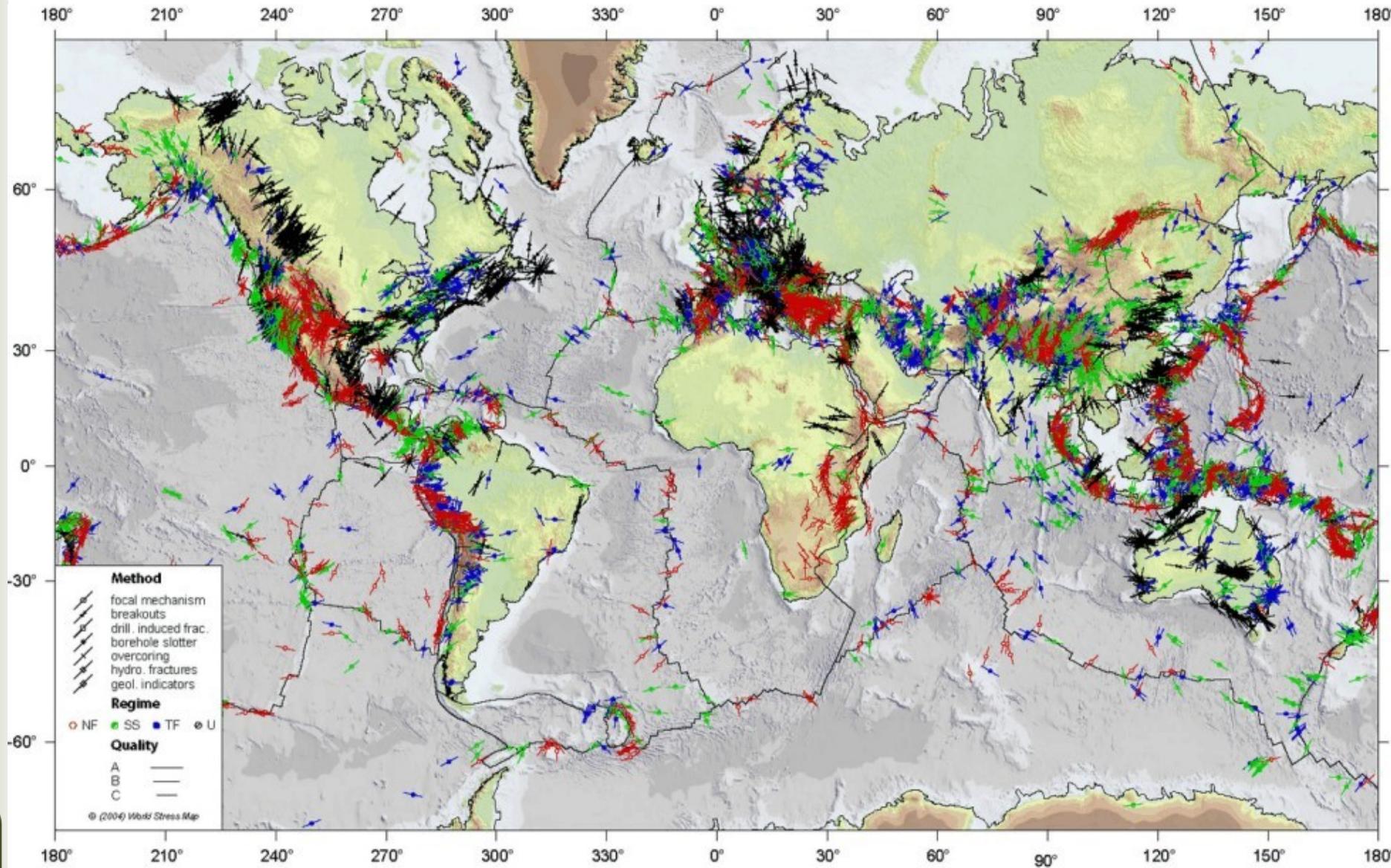


Fig. 3.57 Fault zones, stress pattern, and focal plane solutions. (a) Normal faulting NS, (b) reverse faulting NS, and (c) strike-slip faulting NS. Black arrows represent displacements along faults, and open arrows represent principal stresses.

Introdução

# Mapa Mundial de Esforços



Métodos de Investigação

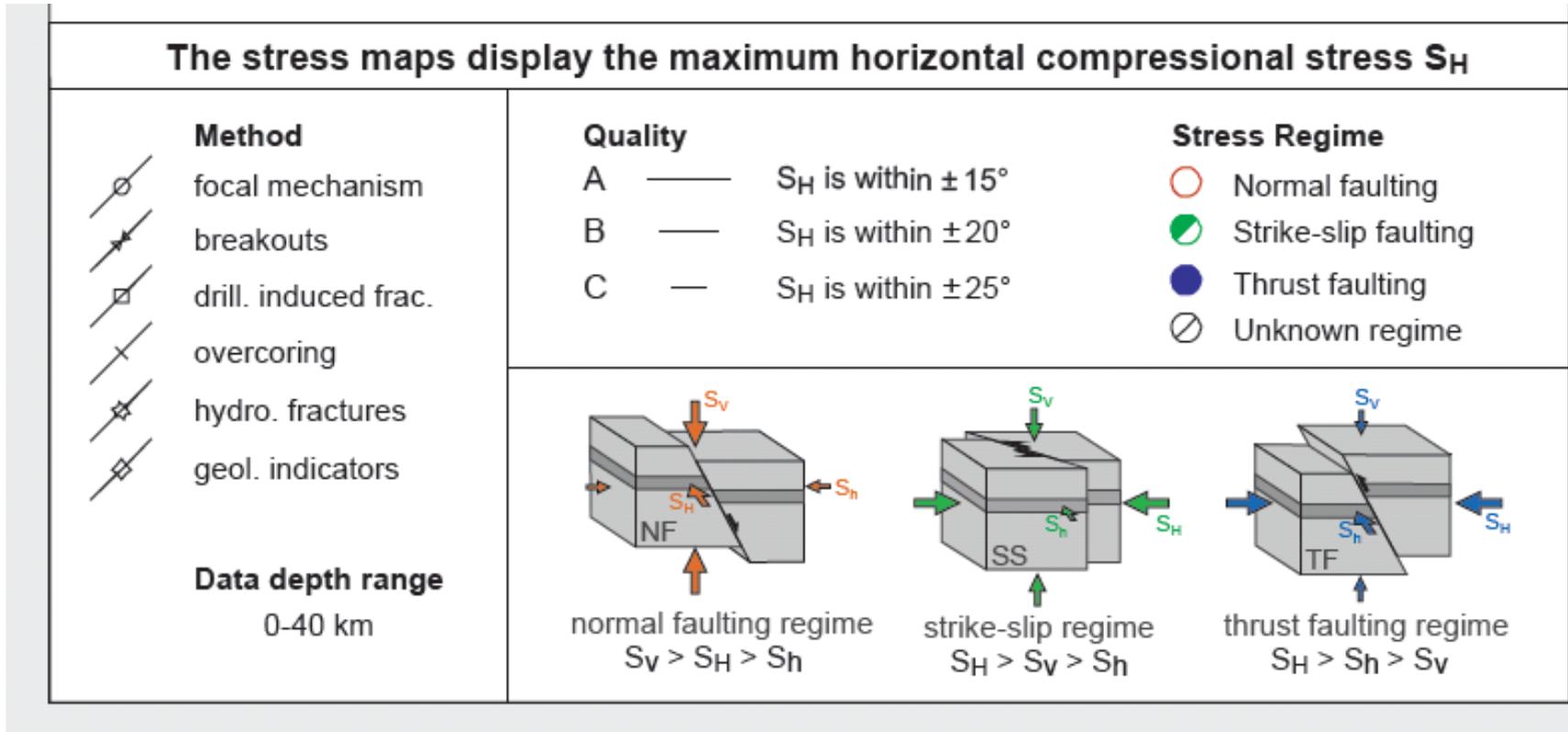
Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação

Reinecker, J., Heidbach, O., Tingay, M., Sperner, B., & Müller, B. (2005): The release 2005 of the World Stress Map (available online at [www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)).

# Legenda da Edição 2008



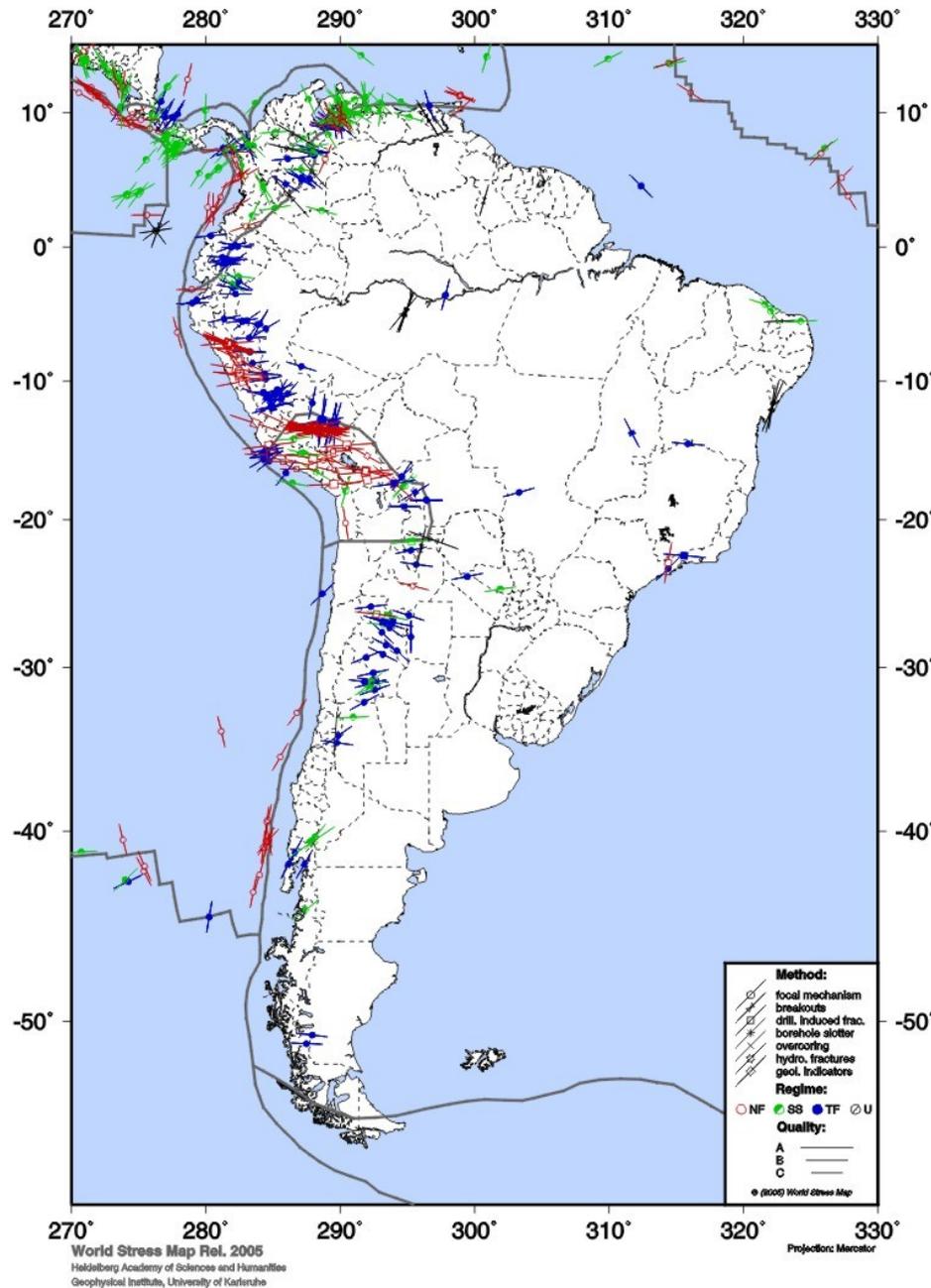
Introdução

Métodos de Investigação

Estrutura Interna

Tectônica de Placas

Esforços e deformação



## Esforços na América do Sul

**Reinecker, J., Heidbach, O., Tingay, M., Sperner, B., & Müller, B. (2005): The release 2005 of the World Stress Map (available online at [www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)).**

## Cálculo teórico do campo de esforços na litosfera

O que é um material elástico?

Tensão  $\sigma$   $\leftrightarrow$  Deformação  $\varepsilon$

Praticamente todas as rochas comportam-se elasticamente para baixos valores de T, P,  $\sigma$ .

Simplificação: materiais isotrópicos.

## Limitações

Para  $T \downarrow$ ,  $P \downarrow$ ,  $\sigma \uparrow$ : comportamento rúptil.

Para  $T \uparrow$ ,  $P \uparrow$ ,  $\sigma \uparrow$ : comportamento plástico. (Se a força aplicada é removida, parte da deformação permanece).

Qual porção da crosta e do manto superior comporta-se elasticamente na escala de tempo geológico?

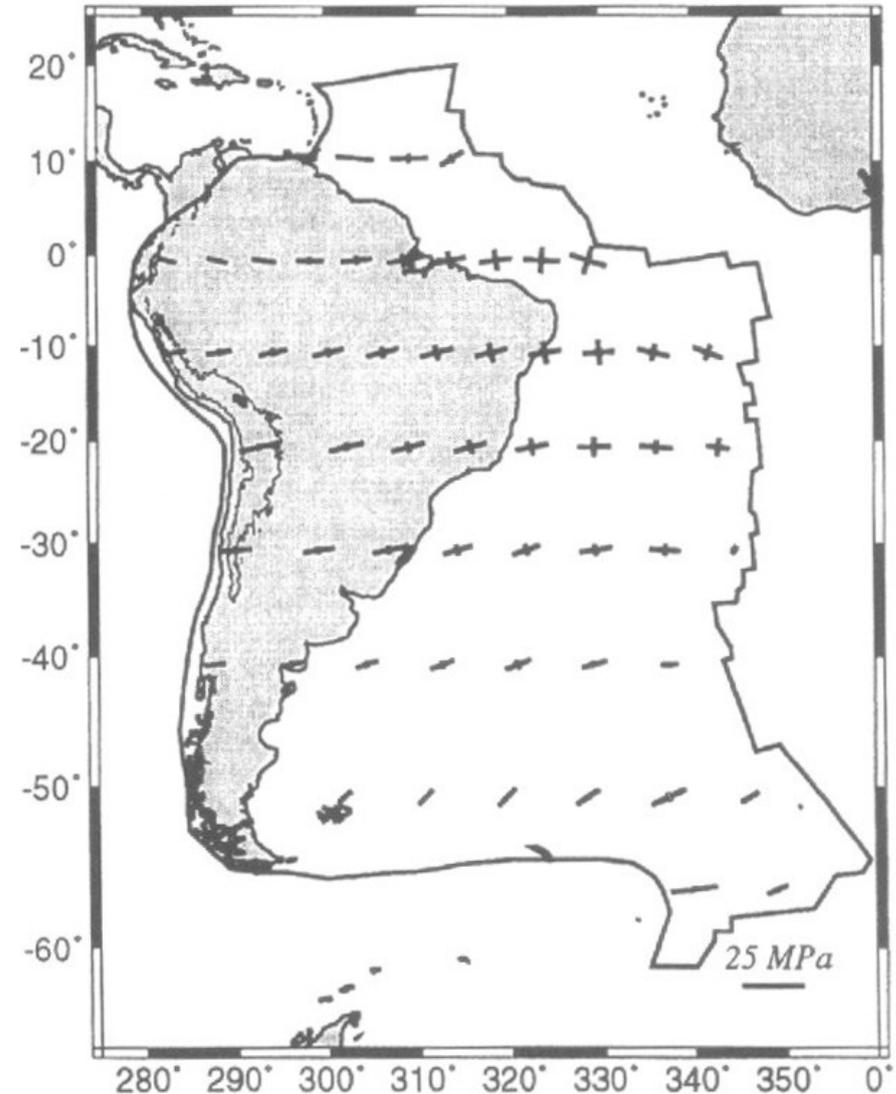
# Modelo 1

Coblentz & Richardson  
[1996]

Bordas de colisão fixas.

Apenas *ridge push*.

Magnitude esforços parte central da placa ~20 MPa. Traços pretos indicam compressão, vazados, extensão. Predomina esforço compressional.



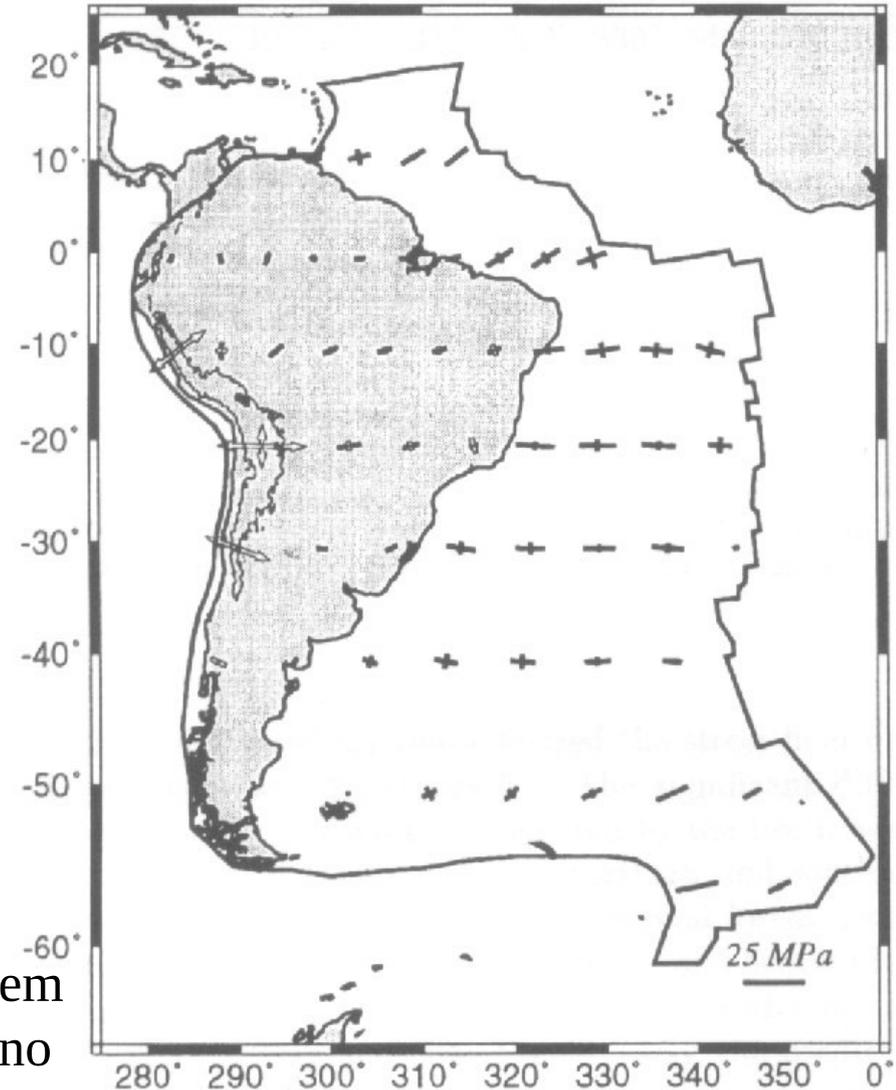
## Modelo 2

Coblentz & Richardson  
[1996]

Bordas de colisão fixas.

*ridge push* +  
cargas topográficas.

Magnitude esforços parte central da placa ~20 MPa. Traços pretos indicam compressão, vazados, extensão. Forças topográficas contribuem para reduzir a magnitude dos esforços no Escudo Brasileiro.



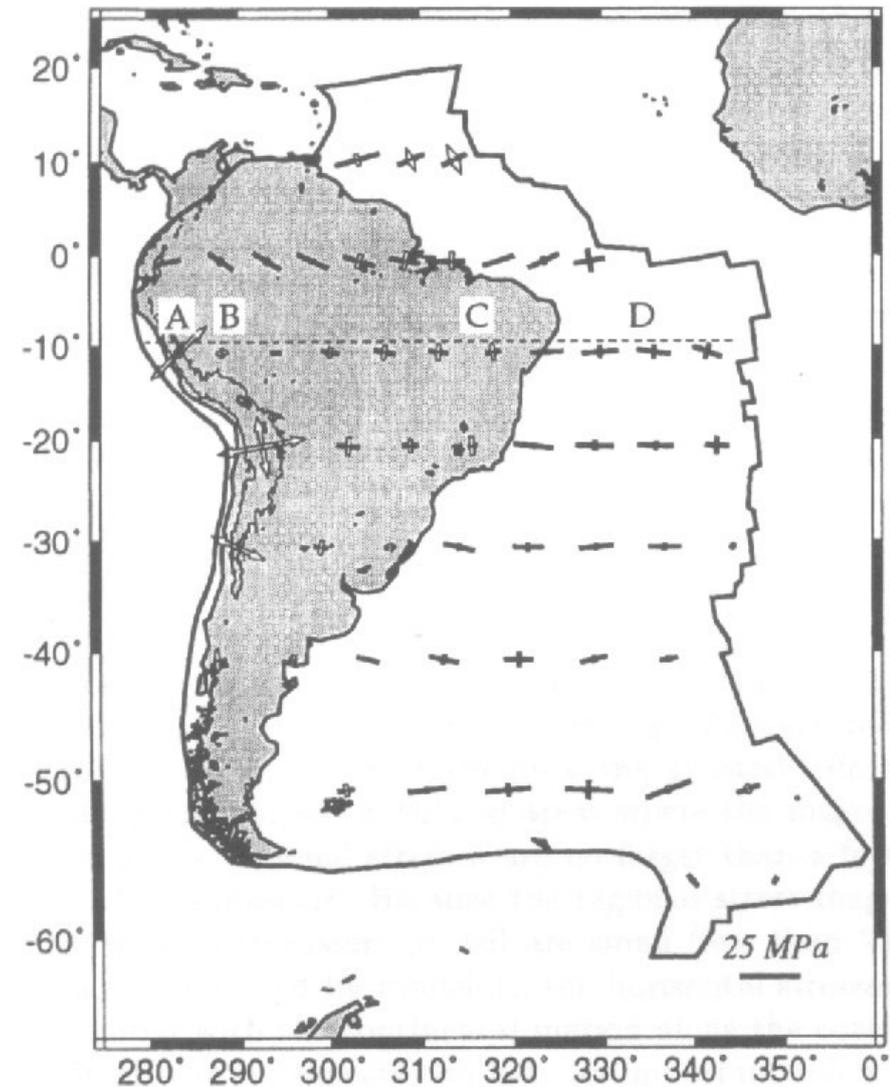
# Modelo 3

Coblentz & Richardson  
[1996]

Bordas livres

*ridge push* +

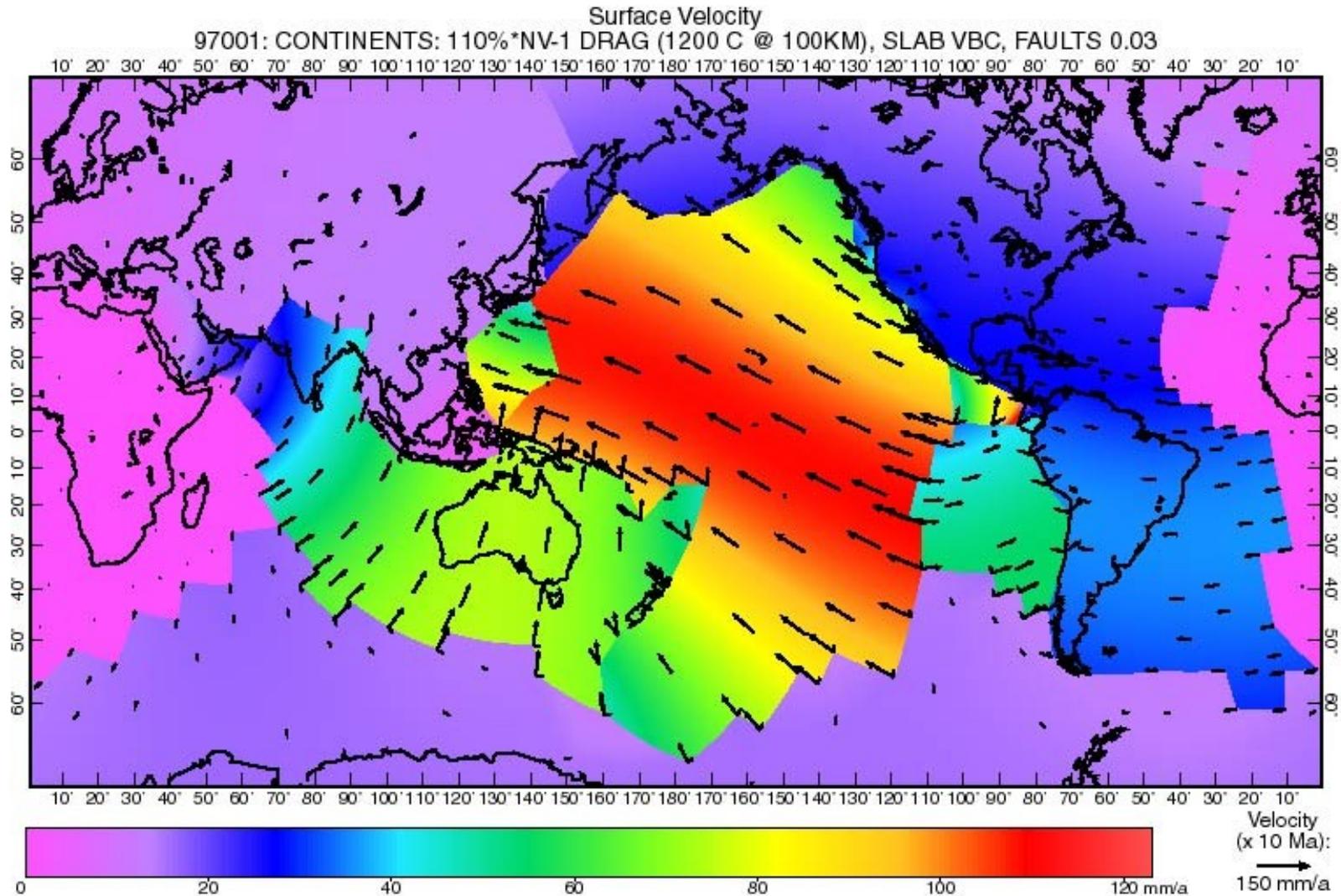
forças topográficas Andes  
e da  
Margem  
continental NE e E do  
Brasil



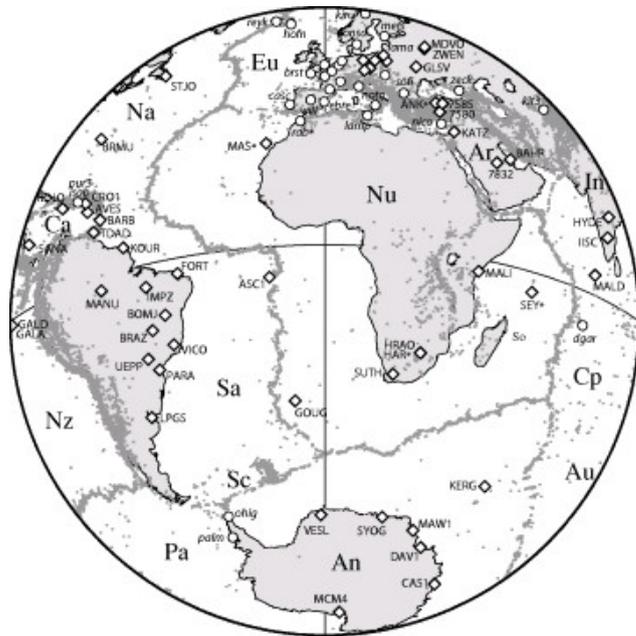
Magnitude esforços parte central  
da placa ~20 MPa. Traços pretos  
Indicam compressão, vazados, extensão.

Influencia da margem sobre o campo de esforços regionais devido a  
forças de borda de placa

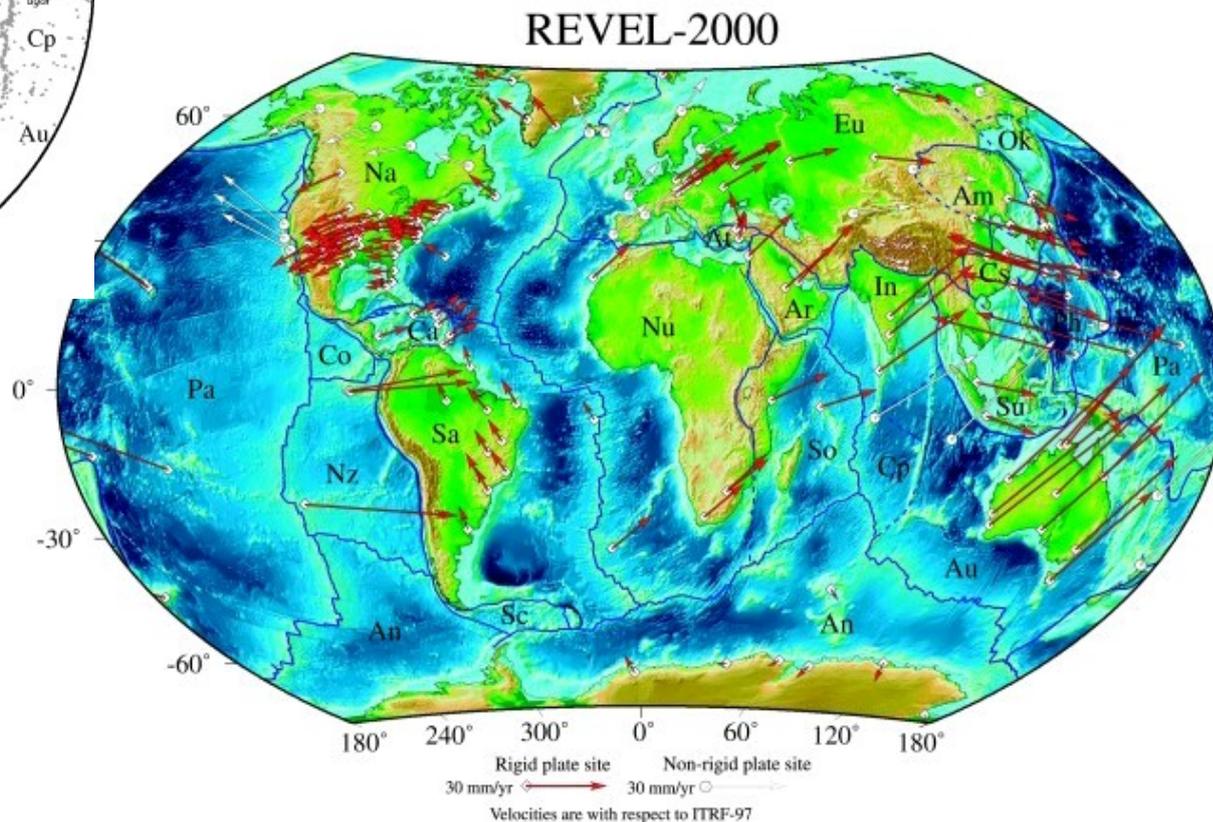
# Resultados: Campo de Velocidades



# Monitoramento GPS – Geodésia Espacial



Sella *et al.*, 2002

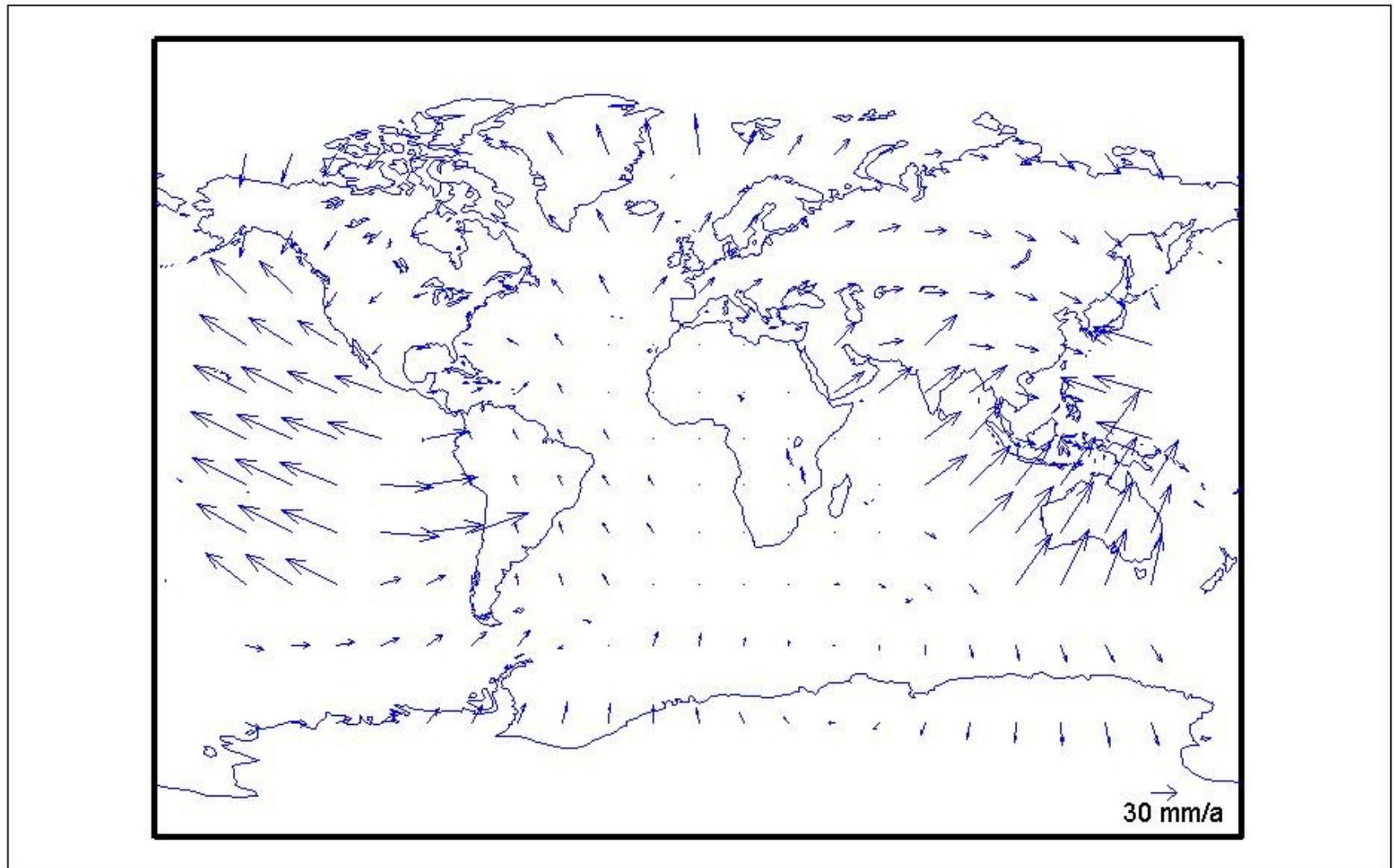


Introdução

Métodos de  
Investigação

Estrutura  
Interna

Tectônica  
de Placas



Sella *et al.*, 2002

Esforços e  
deformação

## Monitoramento GPS – Geodésia Espacial

- Divergência com o mapa mundial de esforços e com  
predições teóricas:

- Componente elástica da deformação.

- Amostragem pequena e escala temporal  
inadequada.

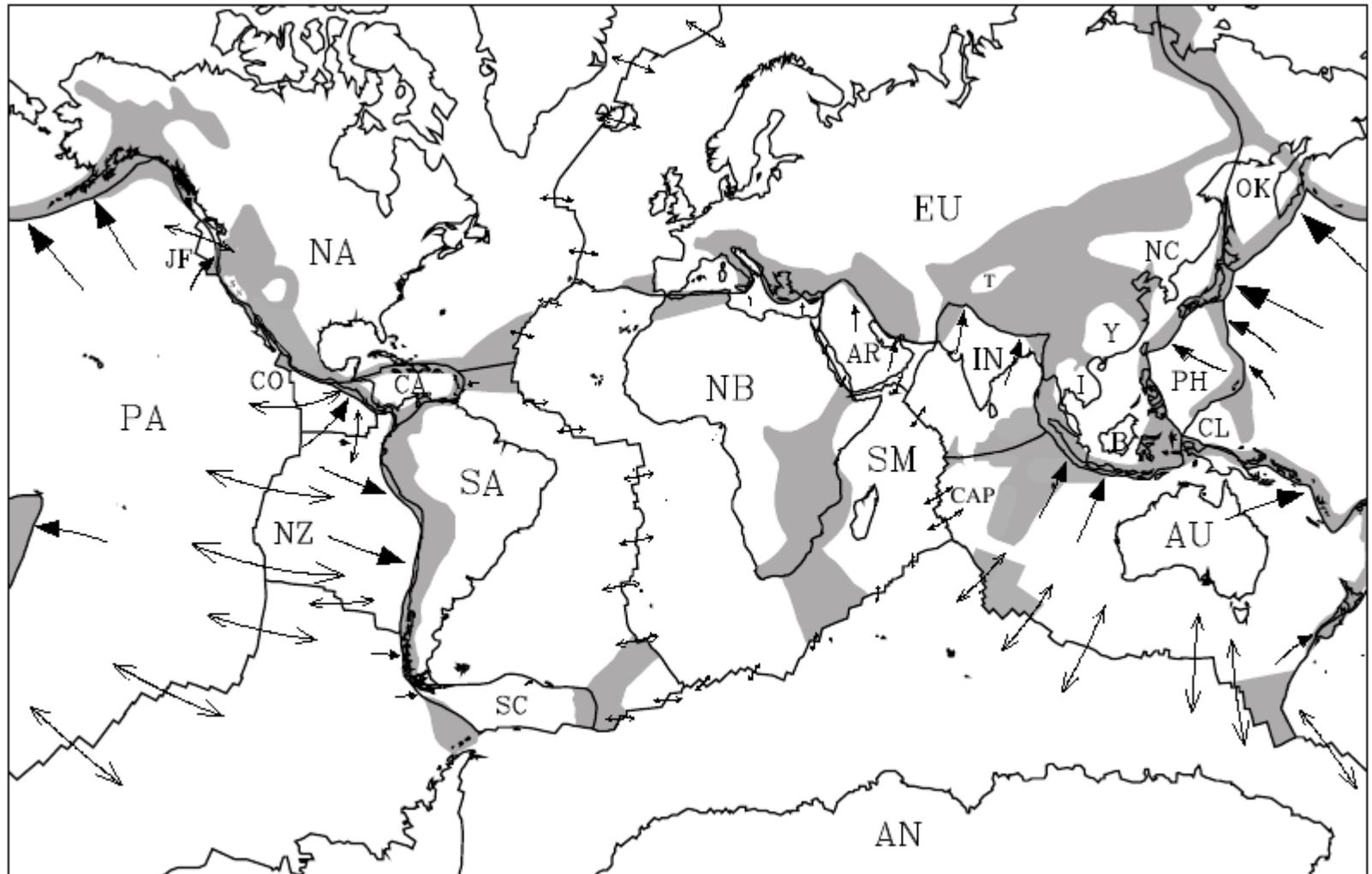
## Paradoxo do esforço tectônico

Esforços reais não seriam suficientes para promover a deformação da litosfera, porém isso acontece nas bordas das placas.

- Cálculo do envelope de deformação não é preciso e é muito sensível ao modelo de litosfera e seu estado térmico.

De fato, não apenas nas bordas ...

## Limites difusos de Placas ou deformação Intraplaca



A aproximação de placas rígidas está longe da realidade.

Gordon, 1998