

# GEOLOGIA ESTRUTURAL

## Aula 1

### INTRODUÇÃO À GEOLOGIA ESTRUTURAL

### DEFORMAÇÃO NA CROSTA

Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

# INTRODUÇÃO

---

## Da Geotectônica à Geologia Estrutural

- Geotectônica estuda os movimentos da crosta terrestre por meio da determinação de suas causas e mecanismos, bem como as leis que os regem.
- Na crosta há um dinamismo motivado por esforços resultantes de forças endógenas (movimentos tectônicos) que deslocam maciços. As espessuras em regiões continentais são de cerca de 30 Km e podem variar de 5 Km, nas regiões oceânicas a 70 Km nas cadeias orogênicas – ver perfil do planeta)
- Os movimentos tectônicos produzem nas rochas as modificações de posição, atitude, forma e volume. Isto é que define a deformação, cujos resultados são as estruturas tectônicas ou secundárias.
- O termo Geologia Estrutural foi cunhado por CHARLES LYELL (1873, no livro "Princípios de Geologia"), para se referir ao estudo das estruturas maiores. Com a evolução da ciência geológica os estudos se estenderam às estruturas menores, visíveis em afloramentos ou amostras de rochas e até em lâminas delgadas (microtectônica).

# OBJETIVOS E IMPORTÂNCIA

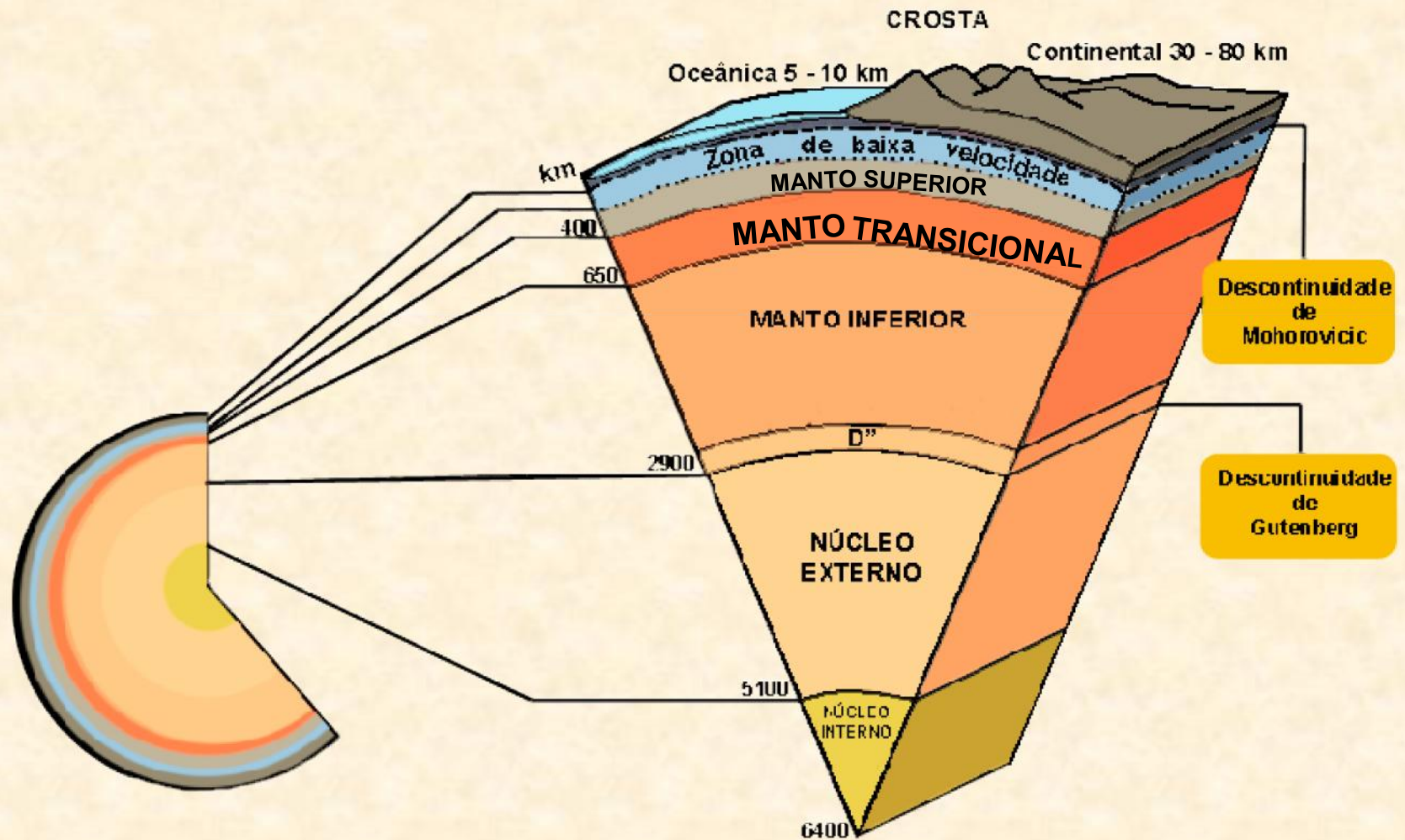
---

## Âmbito dos Estudos

- A GEOLOGIA ESTRUTURAL estuda as deformações da crosta terrestre, (porção envoltória do manto, acima da Descontinuidade de Mohovicic-MOHO). Ocupa-se com as **estruturas** e a **morfologia** de sua formação. São também objetos de seus estudos os **mecanismos**, os **processos de deformação** e os **produtos gerados**.
- Os estudos estruturais focam os corpos rochosos de forma global: suas estruturas (**geometria e/ou morfologia**), sua movimentação (**cinemática**) e a origem desta movimentação (**dinâmica**).
- A Primeira Lei de Newton (“todo o corpo persiste em seu estado de repouso ou de movimento uniforme, a menos que seja compelido a mudar seu estado por uma força aplicada a ele” ) é bem representada por esse escopo da ciência geológica, pois a grande presença de falhas e dobras na crosta sugere que as rochas foram submetidas a forças que modificaram seu estado original.

# Perfil geral da Terra

Limite físico da crosta: descontinuidade de Moho



# TIPOS DE ANÁLISES

---

- ANÁLISE GEOMÉTRICA

Parte descritiva ou qualitativa da geologia estrutural e implica no estudo do tamanho, da forma e orientação das estruturas.

Esse tipo de análise envolve interpretação de imagens aéreas, modelos digitais de relevo, interpretação de perfis geofísicos e estratigráficos, observações e obtenção de atitudes estruturais de campo, análise da deformação em laboratório, estudos petrográficos. Necessita-se levar em conta a escala de trabalho.

Em grande parte do trabalho em laboratório (ou escritório) utiliza-se o Estereograma Estrutural (stereonet), que se trata de ferramenta qualitativa de fácil uso para a inserção de pontos e vetores em um sistema de projeção de coordenadas tridimensionais.

---

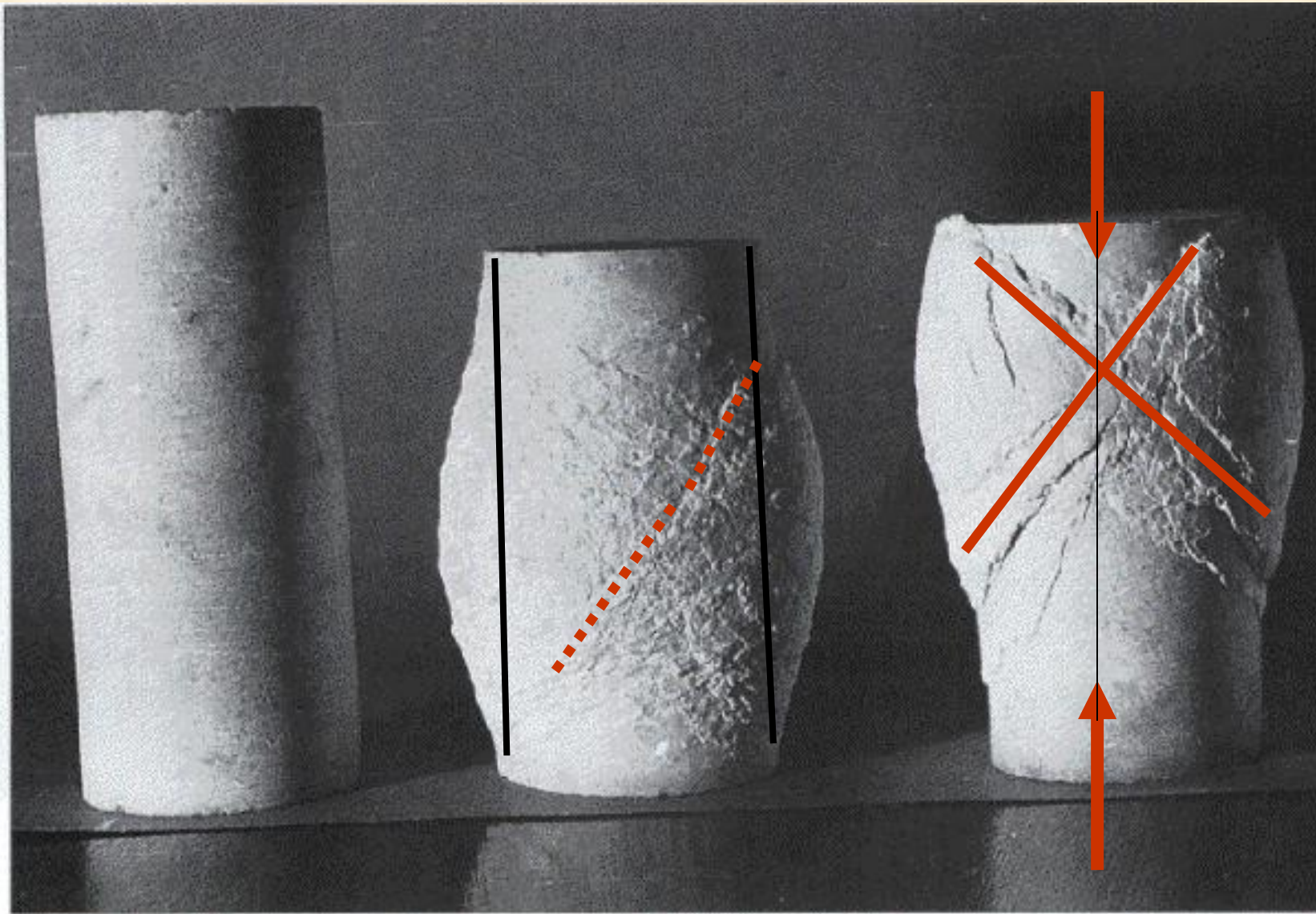
O estudo dos movimentos que geram as diversas estruturas rochosas é chamado de **cinemática** e o estudo das forças que causam o movimento é chamado de **dinâmica**. A física e a matemática que envolve a Geologia Estrutural são equacionadas para estudar a cinemática e a dinâmica

- **ANÁLISE CINEMÁTICA**: requer tratamento matemático. É a descrição quantitativa do “caminho” que as rochas percorrem durante sua deformação. Também descreve a posição relativa de dois pontos durante a deformação rochosa que podem alterar sua posição pela translação conjunta, rotação um ao redor do outro ou pela alteração da distância entre si. Costuma-se chamar esta descrição de “mapeamento da deformação”.
- **ANÁLISE DINÂMICA**: interpreta as tensões (forças e pressões) responsáveis pela formação das estruturas. É a mais interpretativa da análise estrutural. Necessita o entendimento da geometria e da cinemática das estruturas. Revela a magnitude relativa e a orientação absoluta das tensões responsáveis pelas deformações e neste caso, inclui o estudo da reação da rocha ao stress a que está submetida: ao stress (tensão) aplicado há um strain (deformação) gerado.



Foto: Mármore em  
Apiá (E. Salamuni)

Análise geométrica: estuda a deformação por meio das formas resultantes da modificação das formas originais de estratos e/ou de maciços.



Deformação de corpo de prova submetido a uma tensão (seta em vermelho)





Foto: embasamento  
gnáissico-migmatítico -  
PR (E. Salamuni)

Deformação de um maciço submetido a uma tensão

---

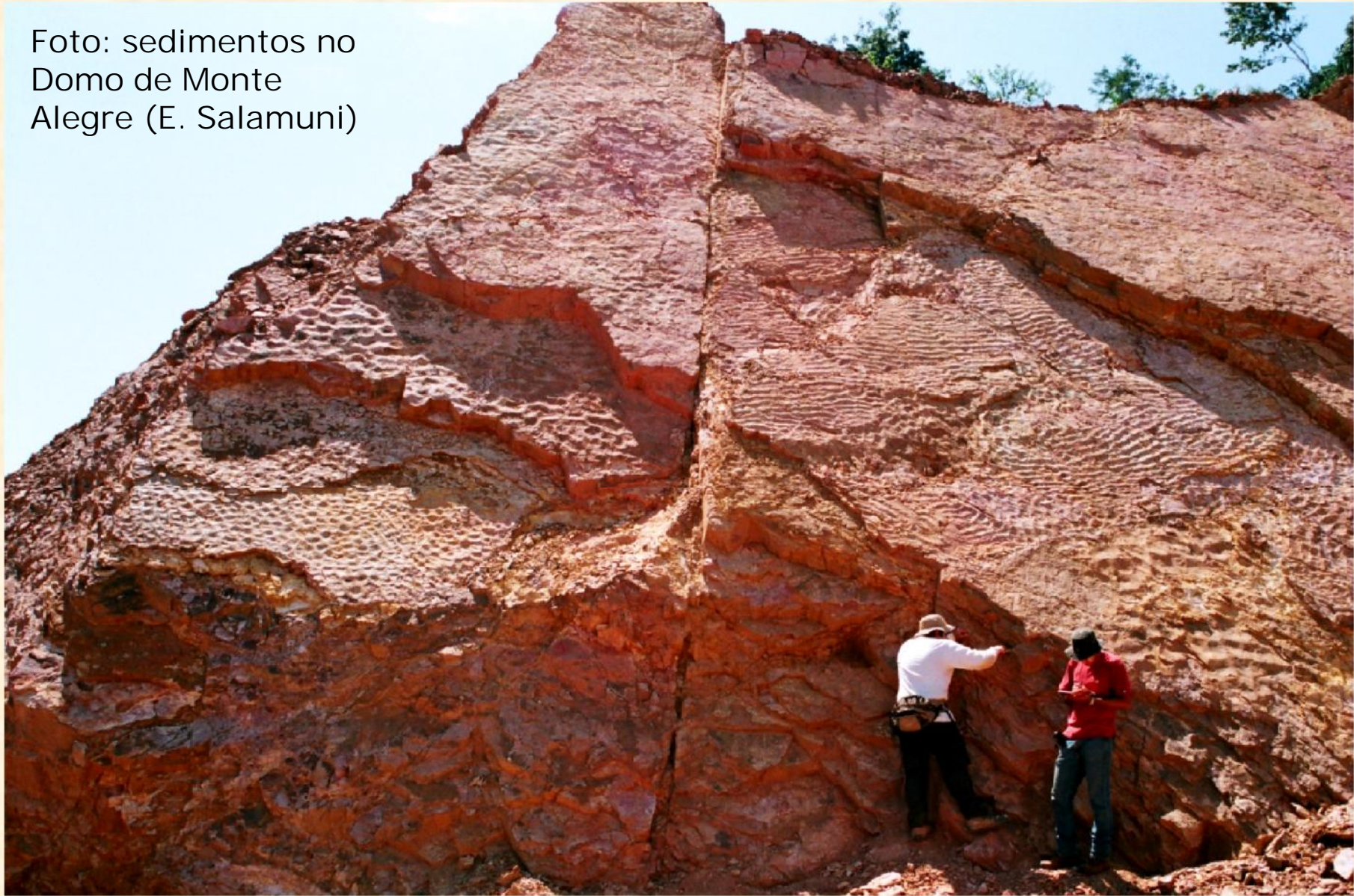
## OBSERVAÇÕES:

- O reconhecimento de uma estrutura é feita por meio de referências geométricas primárias. A forma inicial, anterior à deformação, deve ser reconhecível ou passível de interpretação.

Exemplos de referenciais: (a) estratificação das rochas sedimentares, (b) estruturas sedimentares e/ou ígneas primárias e (c) fósseis.

- Dados a respeito da idade do corpo rochoso deformado são importantes para estabelecer a sequência ou a idade relativa das deformações impostas. A idade relativa pode ser reconhecida pela estratigrafia e/ou pelo conteúdo paleontológico; a idade absoluta pode ser conhecida pela geocronologia.

Foto: sedimentos no  
Domo de Monte  
Alegre (E. Salamuni)



A idade relativa da deformação é mais recente do que a idade dos estratos, que é dada pela relação estratigráfica do maciço rochoso

# CONCEITOS E DEFINIÇÕES

---

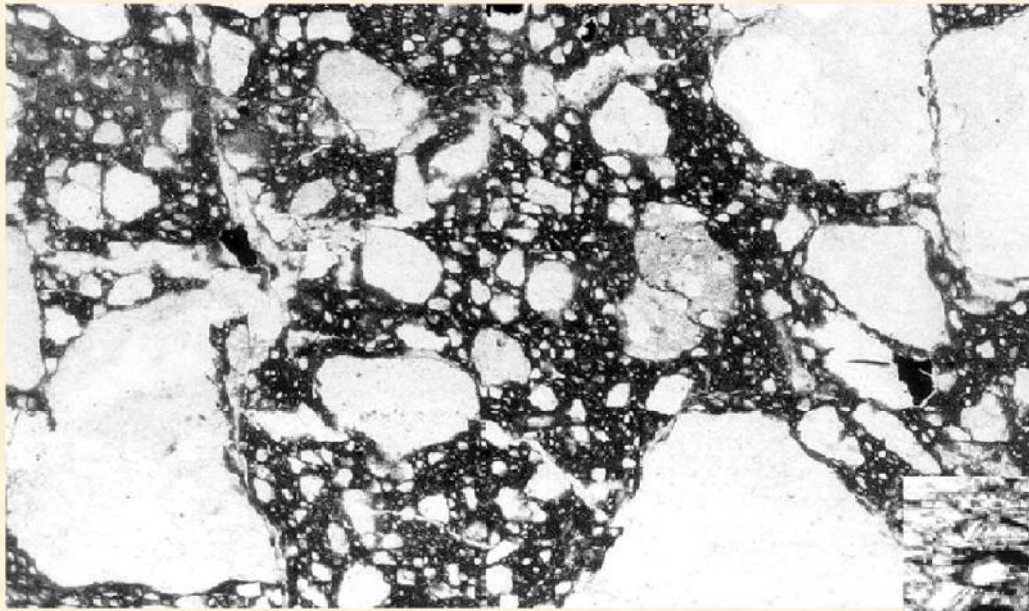
Textura refere-se aos grãos componentes da rocha quanto à forma, tamanho, o arranjo entre as unidades granulares (ou cristais) e suas relações de contato.

Estrutura designa tanto os arranjos espaciais micro e macroscópico dos cristais nas rochas quanto aos arranjos espaciais das unidades rochosas.

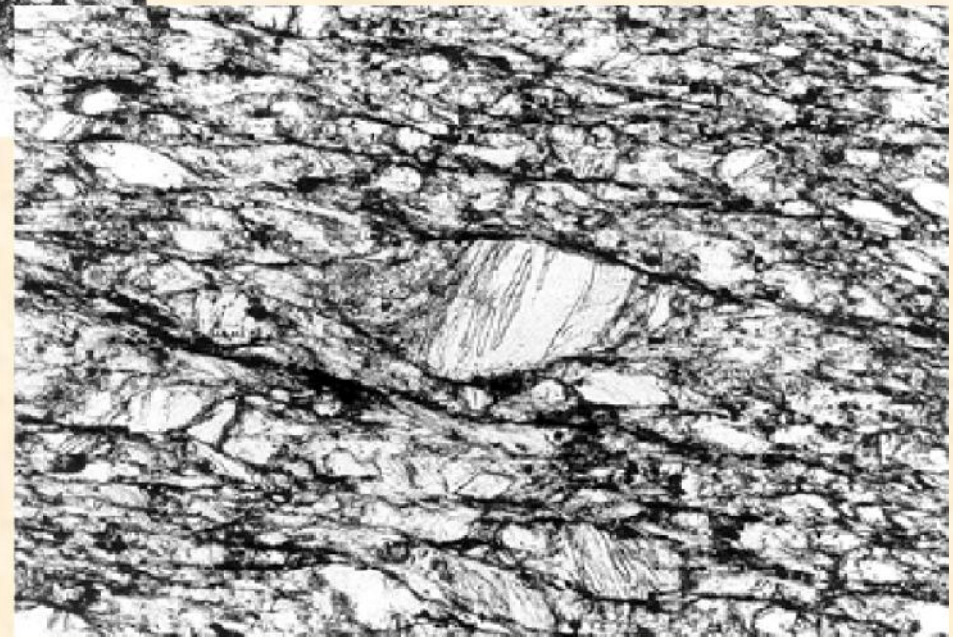
- As “unidades” rochosas podem ser heterogêneas, já que a forma, o volume, a atitude e as relações espaciais podem variar.
- As estruturas geológicas podem ser visualizadas em diferentes escalas (desde um grão mineral, uma camada, um maciço rochoso, até um continente).
- As estruturas podem ser geradas durante a formação da rocha e posteriormente sofrerem modificações (deformações) por ação de esforços, contínuos ou não.

---

Textura: arranjo geométrico entre os grãos



Estrutura: arranjo espacial



Fonte: Microtectonics  
(Passchier, Trouw (1996))

# Classificações Gerais das Estruturas

---

## Quanto à origem

- Primárias: concomitantes à gênese da rocha (sedimentar – por ex. estratificação cruzada - ou magmática – por ex. estrutura fluidal)
- Secundárias: posteriores à gênese da rocha.

Podem ser atectônicas ou adiastróficas (a maioria das estruturas exógenas) ou tectônicas ou diastróficas (estruturas endógenas).

As tectônicas, por sua vez, são:

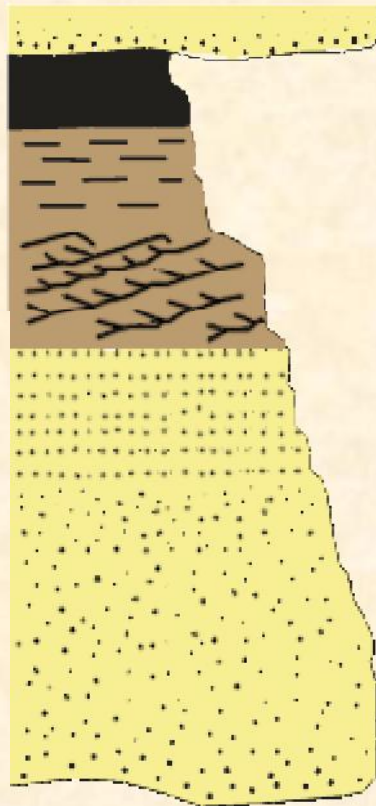
- (a) coesivas ou contínuas, quando há mudança de forma, volume, atitude e posição, sem perda de continuidade (dobras, xistosidades)
- (b) disjuntivas ou disruptivas, quando há perda da continuidade (falhas, juntas).

primárias

(ou)

secundárias

Sequência de Bouma



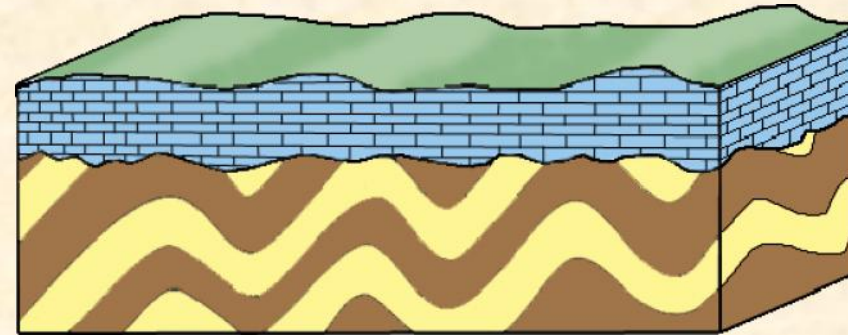
E

D

C

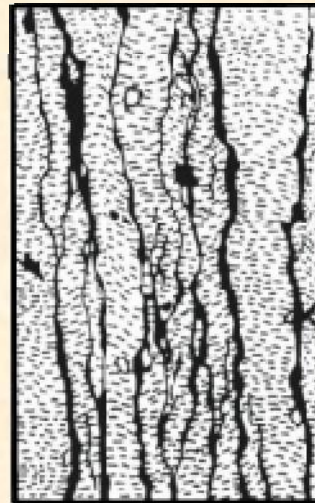
B

A

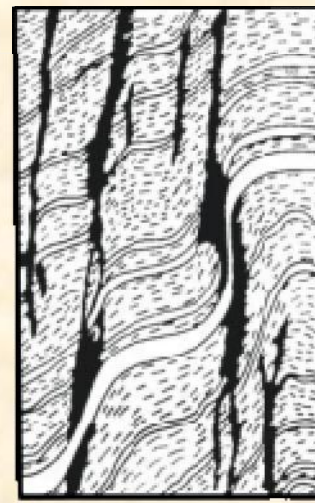


Dobras

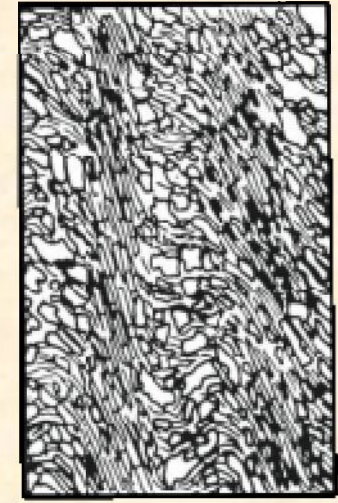
A



B



C



(A) clivagem de crenulação discreta; (B) clivagem de crenulação zonal em trama de variação de camadas; (C) clivagem de crenulação em xisto (Fonte: Gray, 1977a; modificado por C. Dal Ré Carneiro, 1996)

---

## Quanto à geometria:

- Planares: xistosidade, gnaissificação, falhas e acamamentos
- Lineares: eixos de dobras, interseções de estruturas planares
- Cilíndricas ou cônicas: formas especiais

## Quanto à localização no corpo rochoso:

- Internas: circunscritas ao corpo.
- Externas: situadas fora do corpo, em sua superfície.



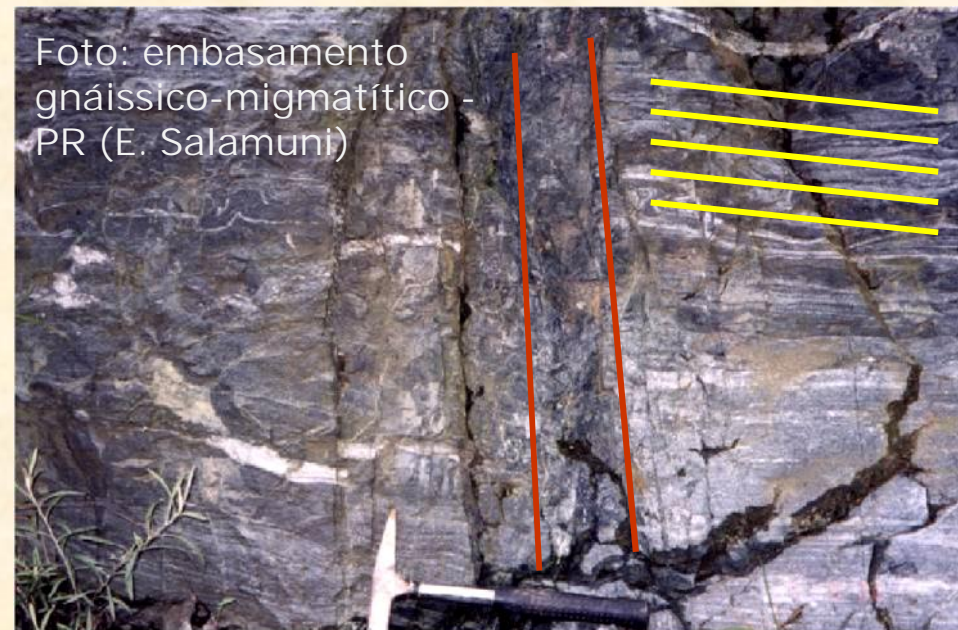
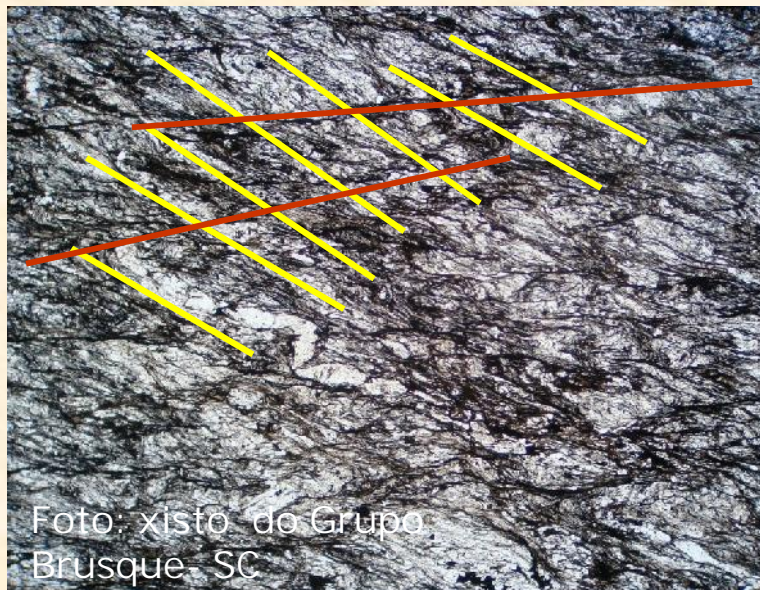
# OUTROS CONCEITOS

---

## Penetratividade

Distribuição regular de uma estrutura qualquer por todo o maciço rochoso, numa certa escala de observação. Utiliza-se também o termo pervasidade

Se a distribuição não é regular, a estrutura é pouco penetrativa ou não-penetrativa (linhas vermelhas) ou bastante penetrativas (linhas amarelas).

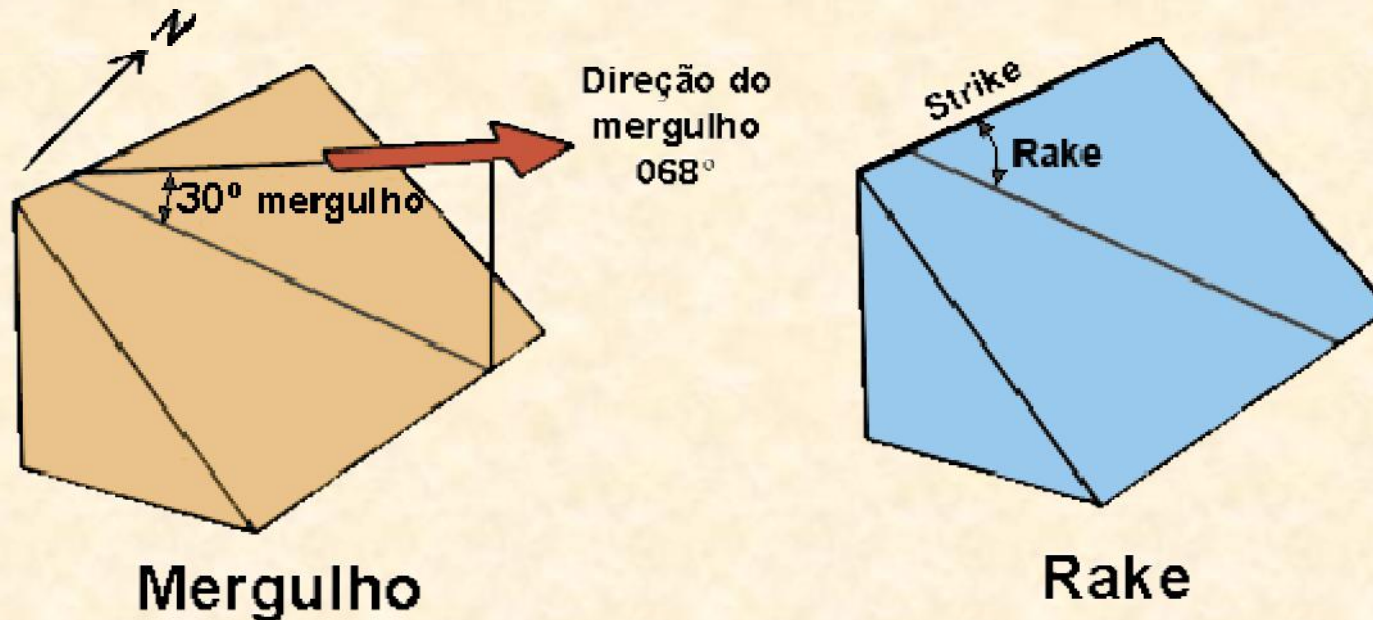


## Atitude, Direção, Mergulho

Atitude: orientação de um plano ou de uma linha no espaço. É composto pela direção e mergulho.

(a) Direção: ângulo horizontal entre uma linha e uma coordenada geográfica (Norte).

(b) Mergulho: inclinação de uma linha em relação ao plano horizontal.





Estrias de atrito - falha em mármore da Pedreira Santo Olavo (Grupo Açungui). Fotos E. Salamuni

---

## Profundidade, Espessura

Profundidade: distância na vertical entre a superfície e um ponto qualquer.

Espessura: distância tomada entre limites de camadas, de forma perpendicular a estes limites.



# ESTRUTURAS PRIMÁRIAS

---

## Estruturas primárias de rochas sedimentares mais comuns

- (a) Acamamento plano-paralelo: estratificações planares paralelas entre si
- (b) Acamamento plano-cruzado: retrabalho de sedimentos em ambientes de rios meandrantess
- (c) Estratificações rítmicas: alternância de finas camadas, repetidas sucessivamente

(a)

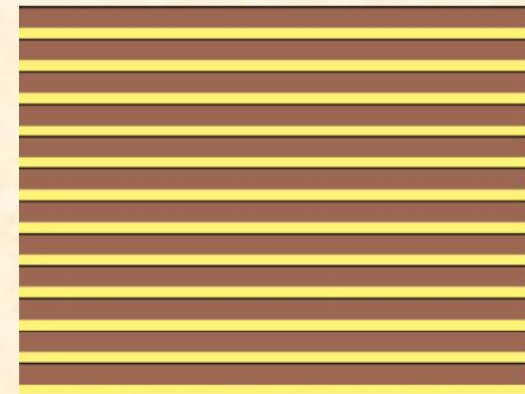


(b)



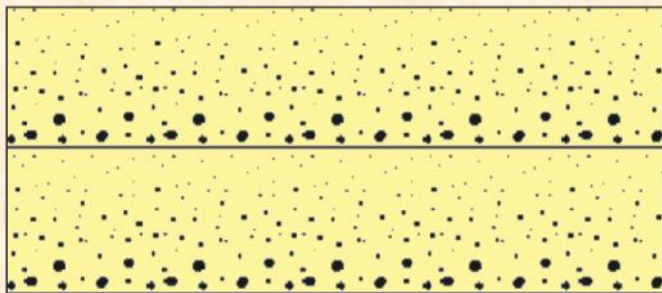
Estratificações Rítmicas

(c)



- 
- (d) Estrutura gradacional: variação granulométrica gradual, mais grossa na base até a mais fina no topo
  - (e) Marcas de onda: simétricas (marca o topo da camada), assimétricas (não permite a observação do topo da camada)
  - (f) Fendas de ressecamento: geralmente preenchidas com material arenoso

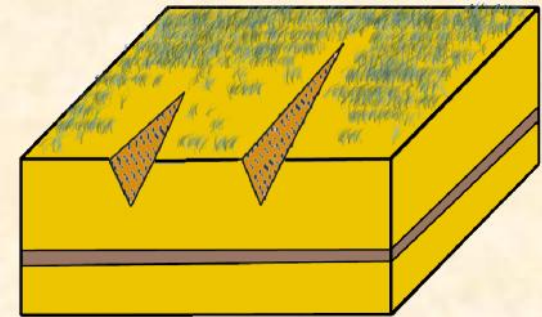
### Estruturas Domingos)



Estrutura Gradacional

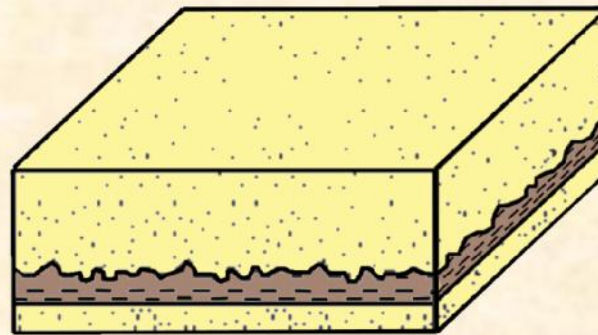


Estruturas onduladas  
(Contesto. Foto:  
Fabiana Domingos

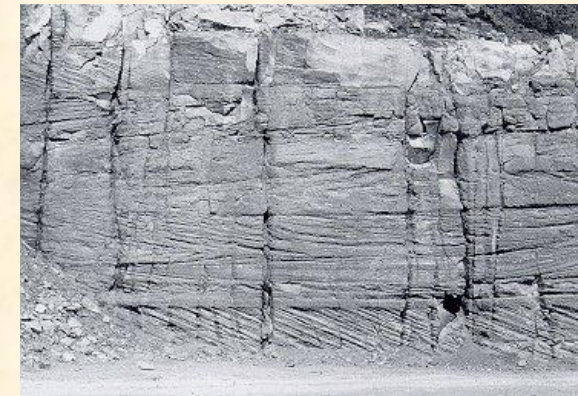


Fendas de Ressecamento

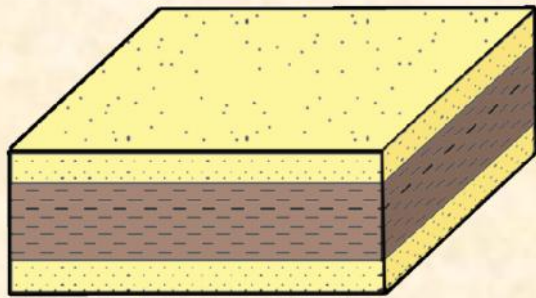
- (g) Estruturas convolutas: a camada de cima desliza sobre a camada inferior que funciona como uma camada lubrificante
- (h) Camadas basais: camadas arenosas penetram nas camadas argilosas devido às pressões de suas camadas superiores
- (i) Discordâncias: camadas inferiores apresentam tectonismo, enquanto as mais jovens ocorrem intactas. A discordância pode ser angular ou paralela



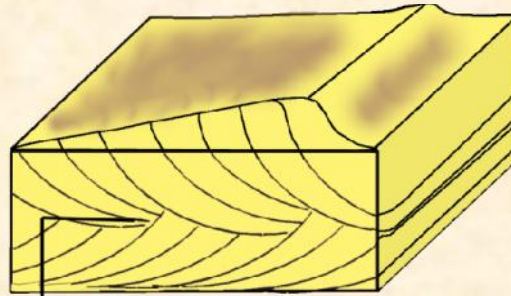
Marcas Basais



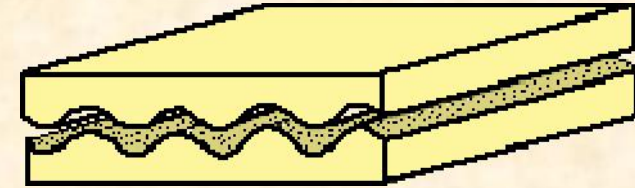
# Outros exemplos



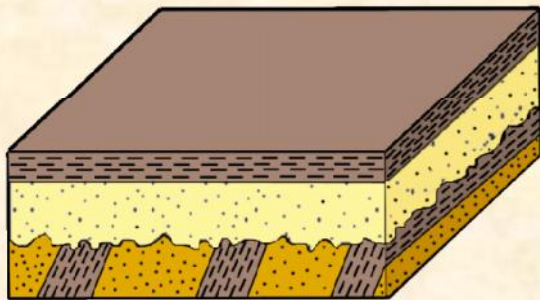
**Estratificação plano-paralela**



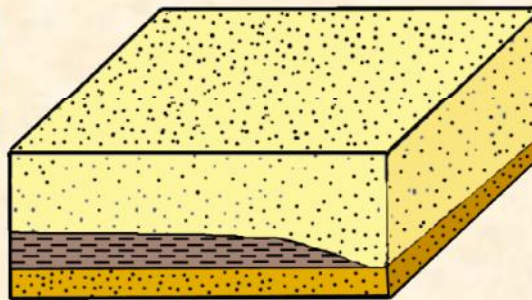
**Estratificação cruzada**



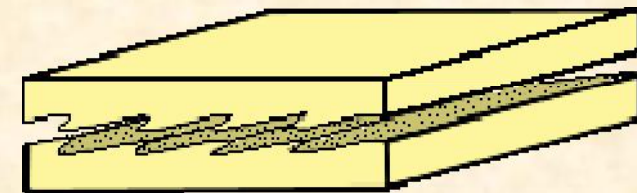
**Marcas onduladas simétricas**



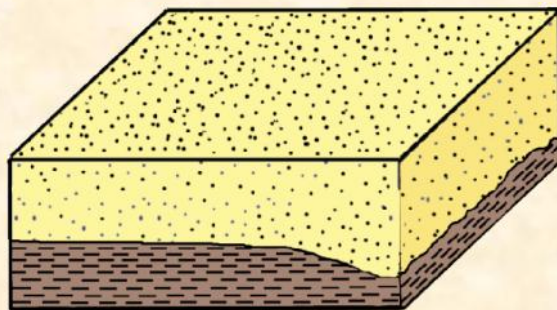
**Discordância angular**



**Discordância paralela**



**Marcas onduladas assimétricas**



**Estruturas convolutas**





---

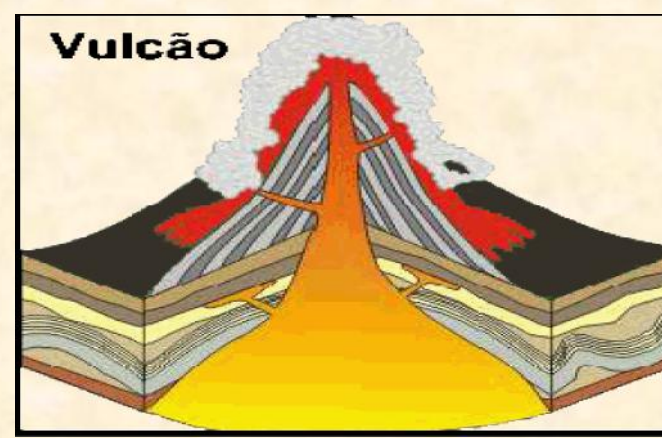
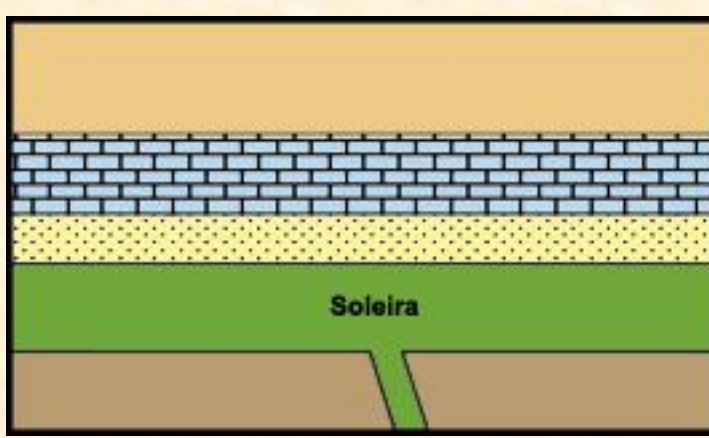
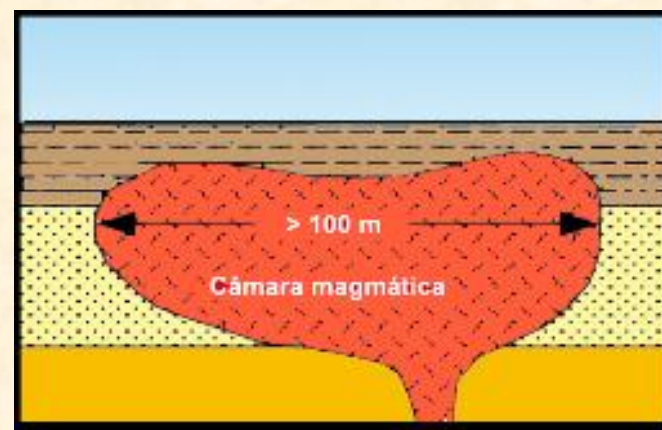
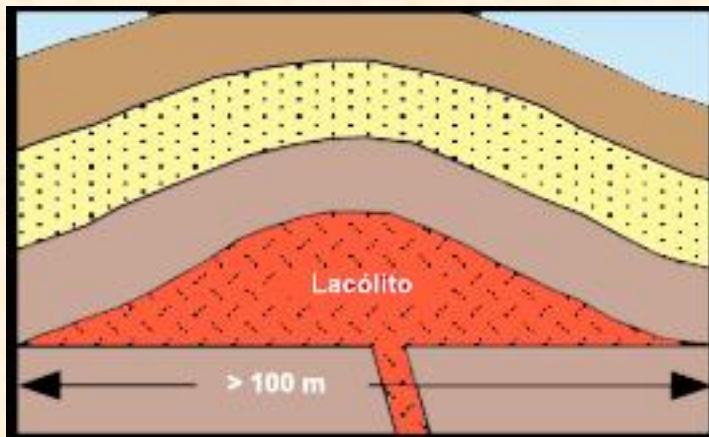
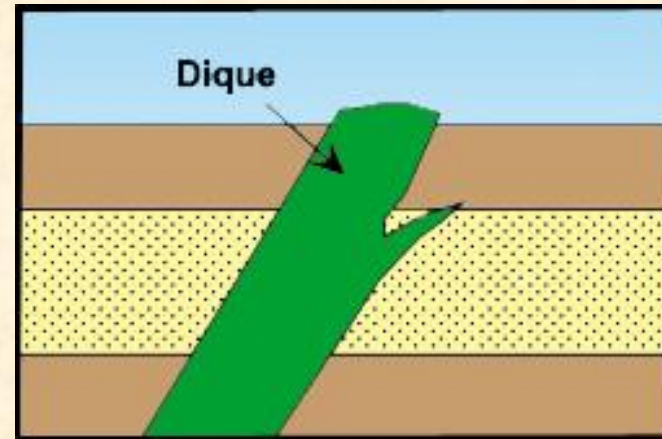
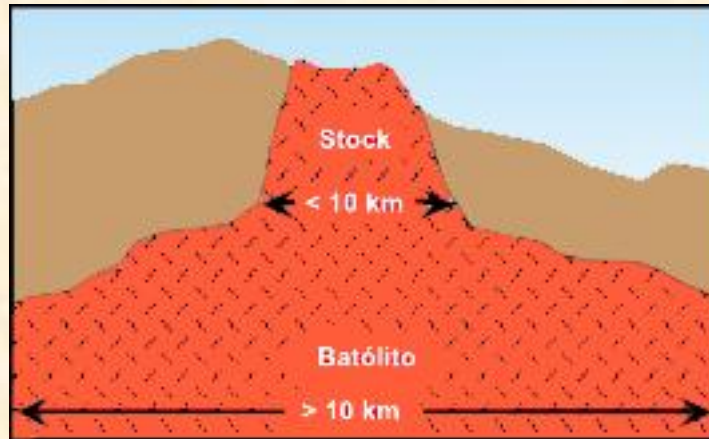
## Estruturas primárias mais comuns das rochas ígneas são formadas quando o magma está se consolidando

### (a) Forma dos corpos

Tabulares (diques e sills), cilíndricos (chaminés vulcânicas), circulares (intrusões graníticas e outros), irregulares (batólitos e stocks)

### (b) Relações de contatos

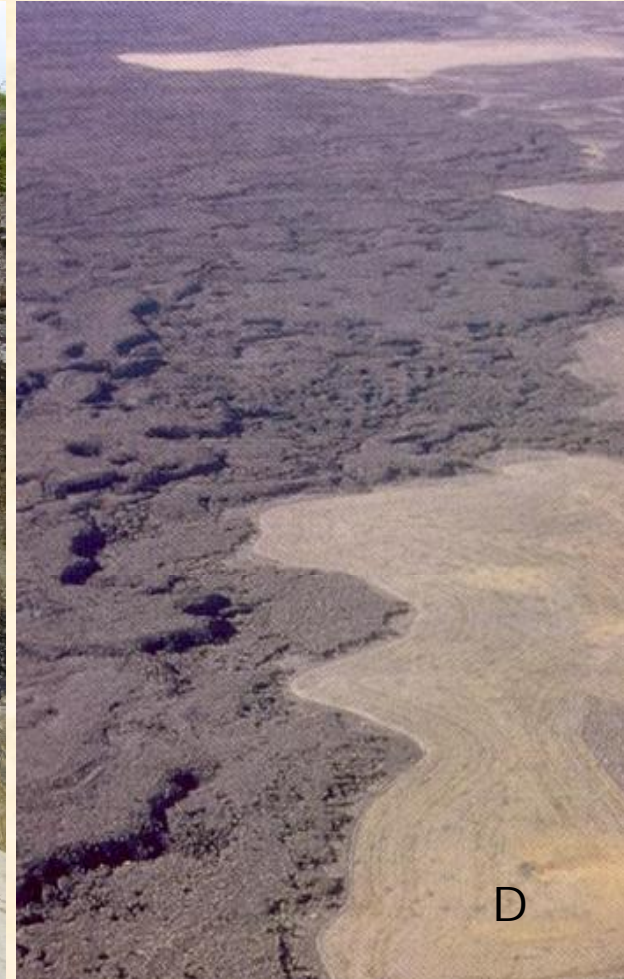
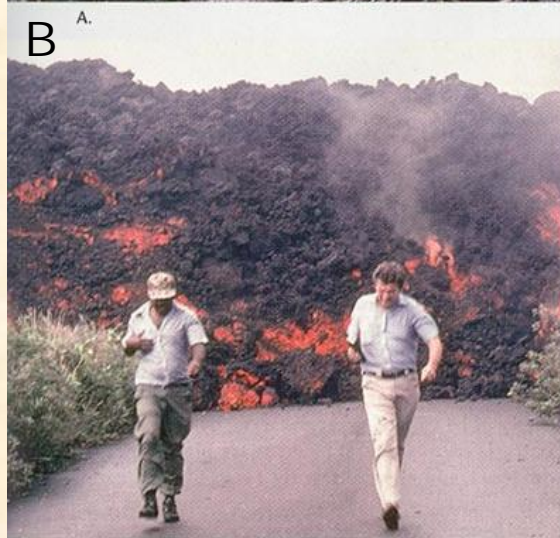
Contato abrupto (corpos próximos à crosta ou extravasantes); contato gradacional (rocha ígnea que passa gradativamente às características da rocha encaixante); contato concordante (sills); Contato discordante (diques).



---

### (c) Estruturas Internas

- Fluidais: o fluxo laminar da massa ígnea determina orientação planar dos minerais.
- Estruturas vesiculares: localizadas no topo de um derrame.
- Sistemas de fraturas atectônicas: sucessão de esforços internos ou externos. Por ex., fraturas paralelas à estrutura fluidal ou motivadas pelo resfriamento.
- Sistemas de fraturas marginais: ocorrem à margem do contato.



(A) Fluxo de lava tipo pahoehoe, Kilauea (Hawaii); (B) fluxo lento de lava (Fotos A e B: J.D. Griggs, USGS). (C) Dique de diabásio, intrusivo em gnaisses do Terreno Paranaguá, Ilha do Mel - PR (Foto: E. Salamuni; (D) Derrame de lava básica, Hawaii



Hidrofraturas geradas pela intrusão de rocha ígnea em estado fluidal

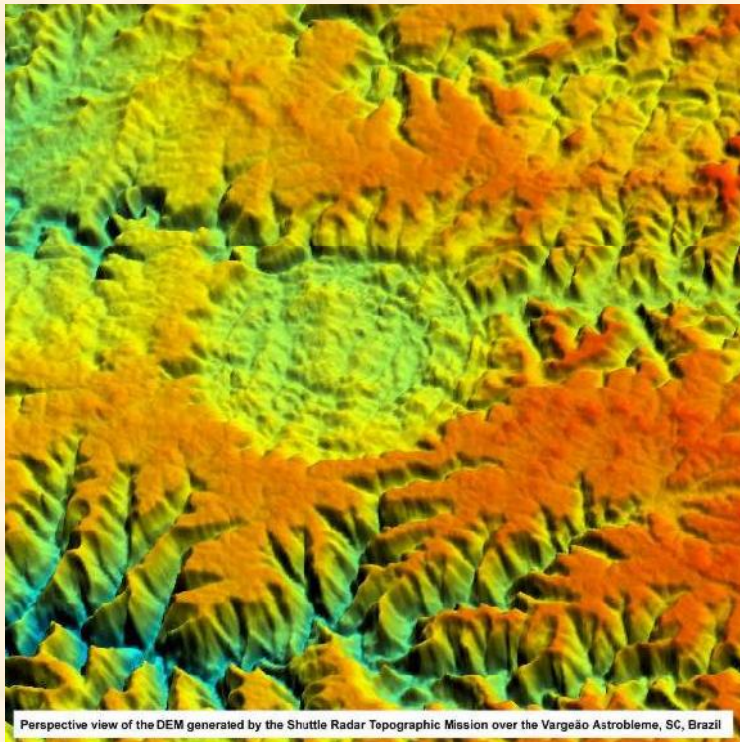
---

## Estruturas primárias atectônicas

Ocorrem normalmente próximas à superfície do terreno.

- (a) Compactação: arqueamento e compactação das camadas inferiores devido ao peso isostático.
- (b) Deslizamentos de terras: parecem falhas mas na realidade são erosão das encostas por movimentos rotacionais.
- (c) Creep: movimentos lentos do solo que tendem a arquear a encosta.
- (d) Expansão de argilas: as argilas em estado plano tendem a dobrar-se para aumentar sua superfície de contato e volume pela saturação de água.
- (d) Expansão de argilas: as argilas em estado plano tendem a dobrar-se para aumentar sua superfície de contato e volume pela saturação de água.
- (e) Deslizamentos sub-aquáticos: “dobras” atectônicas e fraturas atectônicas.

- (f) Arrasto pelo gelo: os movimentos de geleiras podem arrastar e dobrar uma camada em estado horizontal, fazendo com que esta camada fique irregularmente dobrada. Também pode haver cisalhamento em estado frio.
- (g) Astroblemas, ou crateras geradas por impactos de meteoritos



Astroblema de Vargeão (SC)  
Fontes: Alvaro Crósta (UNICAMP)



Barringer (Arizona)  
Fonte: Google Earth

# DEFORMAÇÃO DA CROSTA CONTINENTAL / MORFOESTRUTURA

---

## MOVIMENTOS GLOBAIS

- Eustasia ⇒ termo que designa as variações do nível do mar. Movimentos eustáticos podem ser positivos (quando há transgressão marinha) ou negativos (regressão marinha).

## MOVIMENTO LOCAIS

- Isostasia ⇒ termo que explica que a superfície do Planeta sempre tende ao equilíbrio isostático, isto é, à compensação das pressões: havendo carga na região haverá subsidência, havendo erosão haverá ascensão.

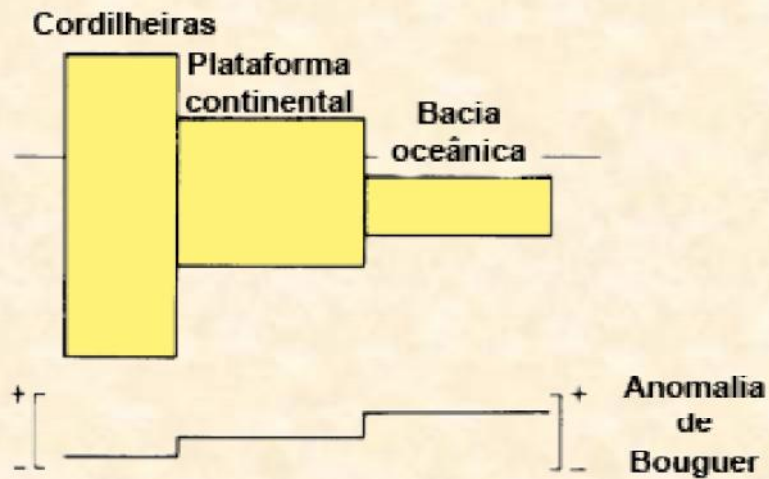


Praias geradas devido a movimento eustático

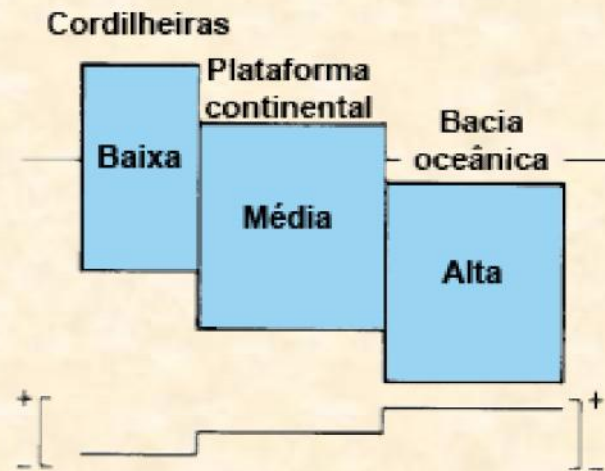


# Modelos de compensação isostática

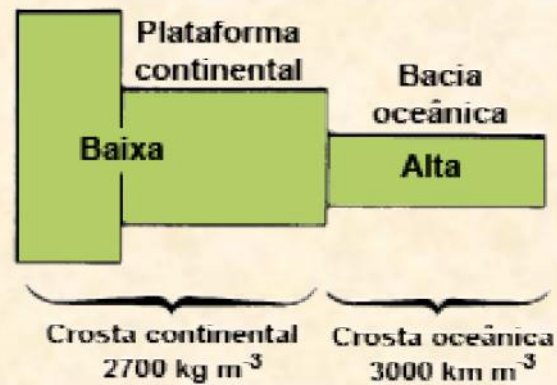
MODELO DE ESPESSURA CRUSTAL (Airy)



MODELO DE DENSIDADE CRUSTAL (Pratt)



Cordilheiras

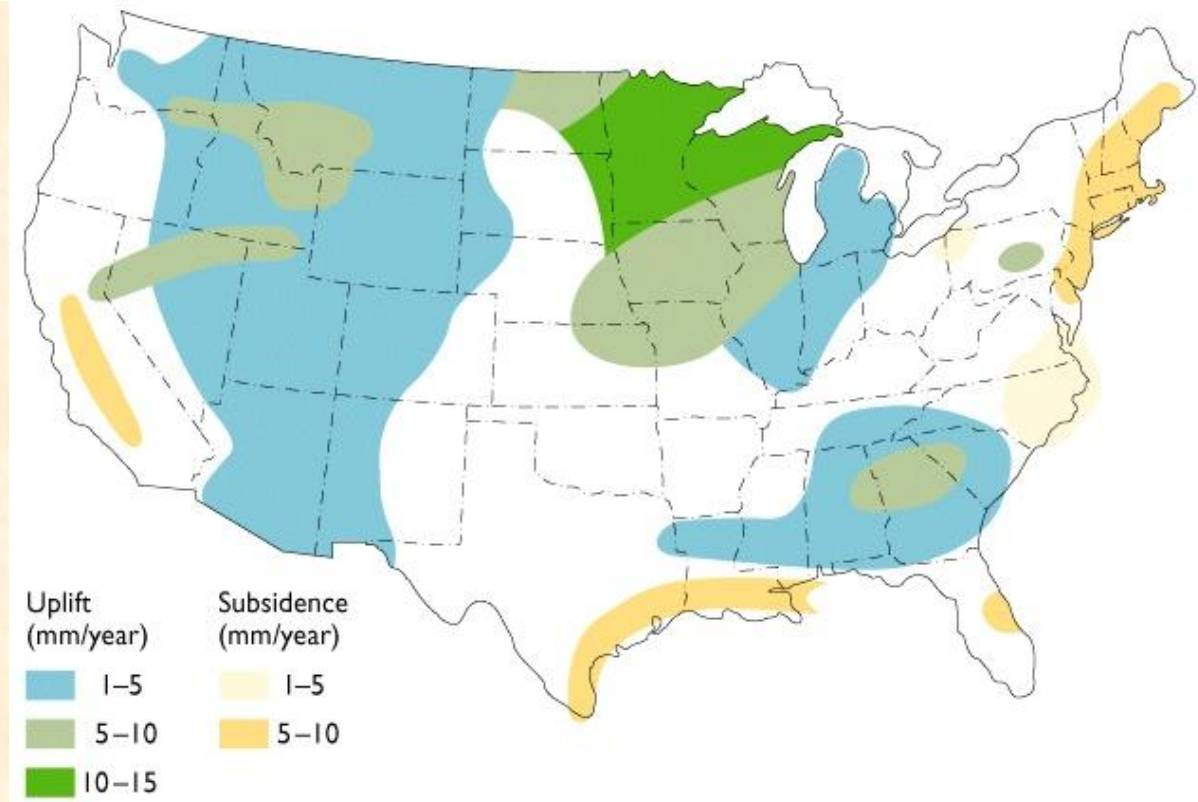


MODELO COMPOSTO

## MOVIMENTOS REGIONAIS

### Epirogênese ⇒

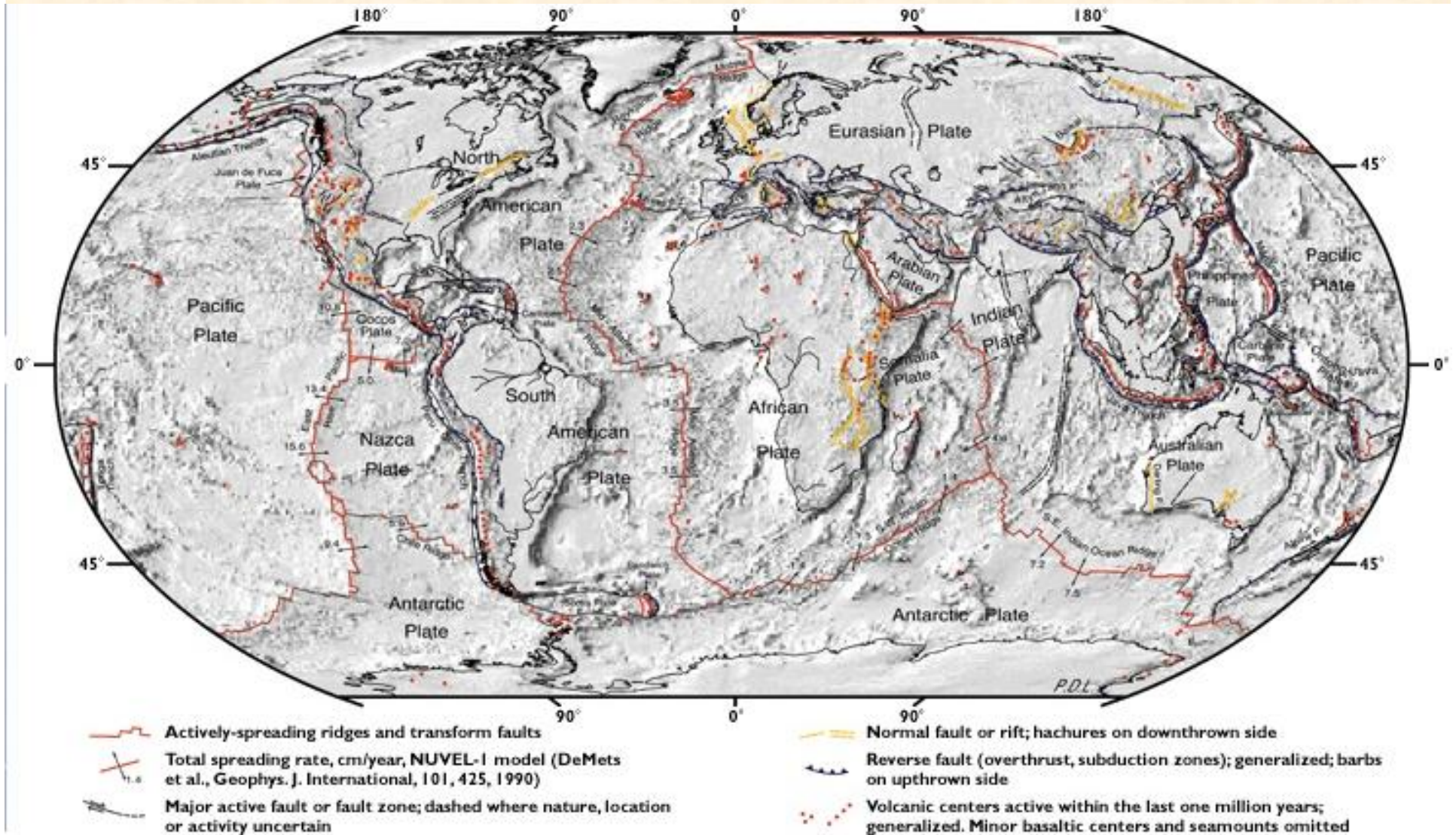
movimentos de ascensão ou descenso de grandes áreas da crosta terrestre, de modo lento. É um reajustamento isostático abrangente (extensas regiões) sem afetar de forma significativa estruturas antigas.



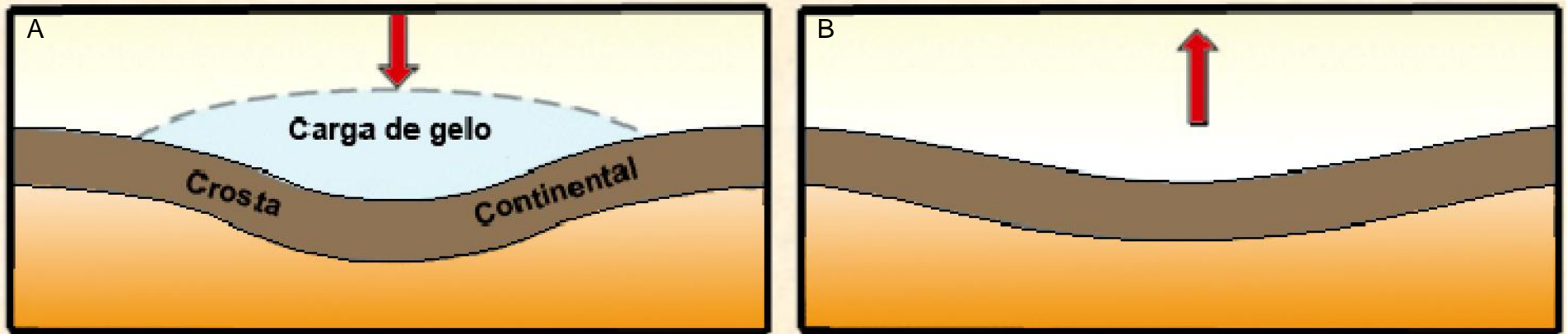
### Taxas atuais de subsidência e ascensão nos EUA

Orogênese ⇒ conjunto de fenômenos que levam à formação de cadeias de montanhas, produzidas pelo diastrofismo (falhas e ou dobras) em zonas de subducção.

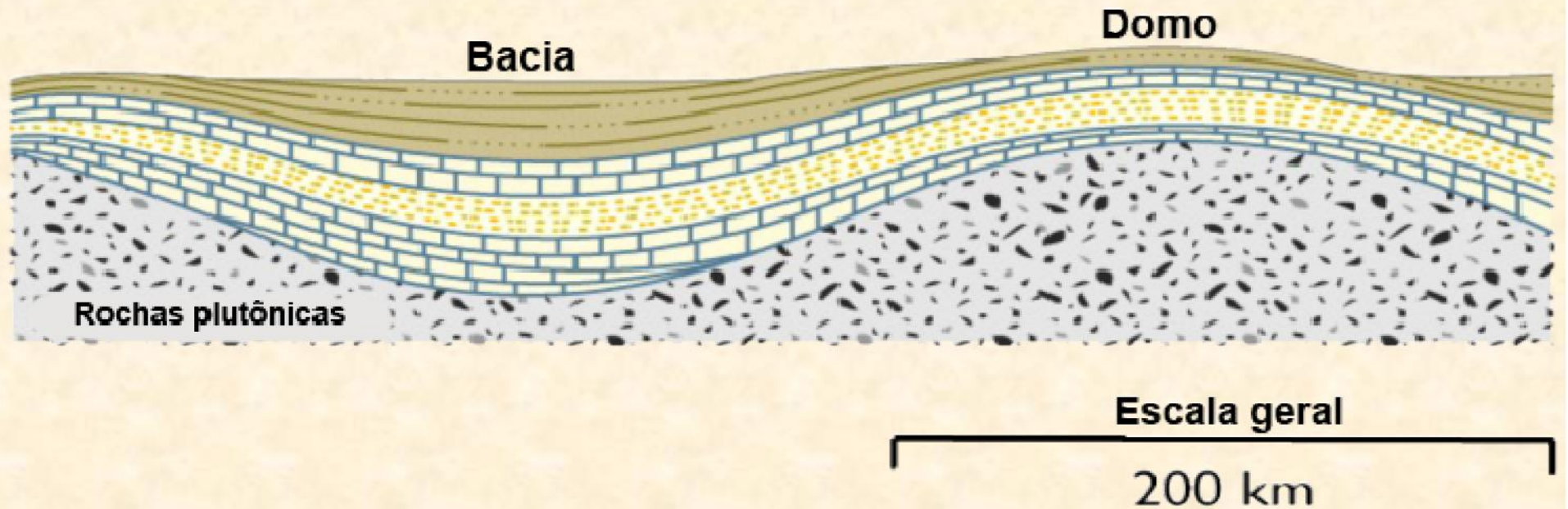
# DEFORMAÇÃO DA CROSTA



# Levantamento causado pela remoção de capa de gelo

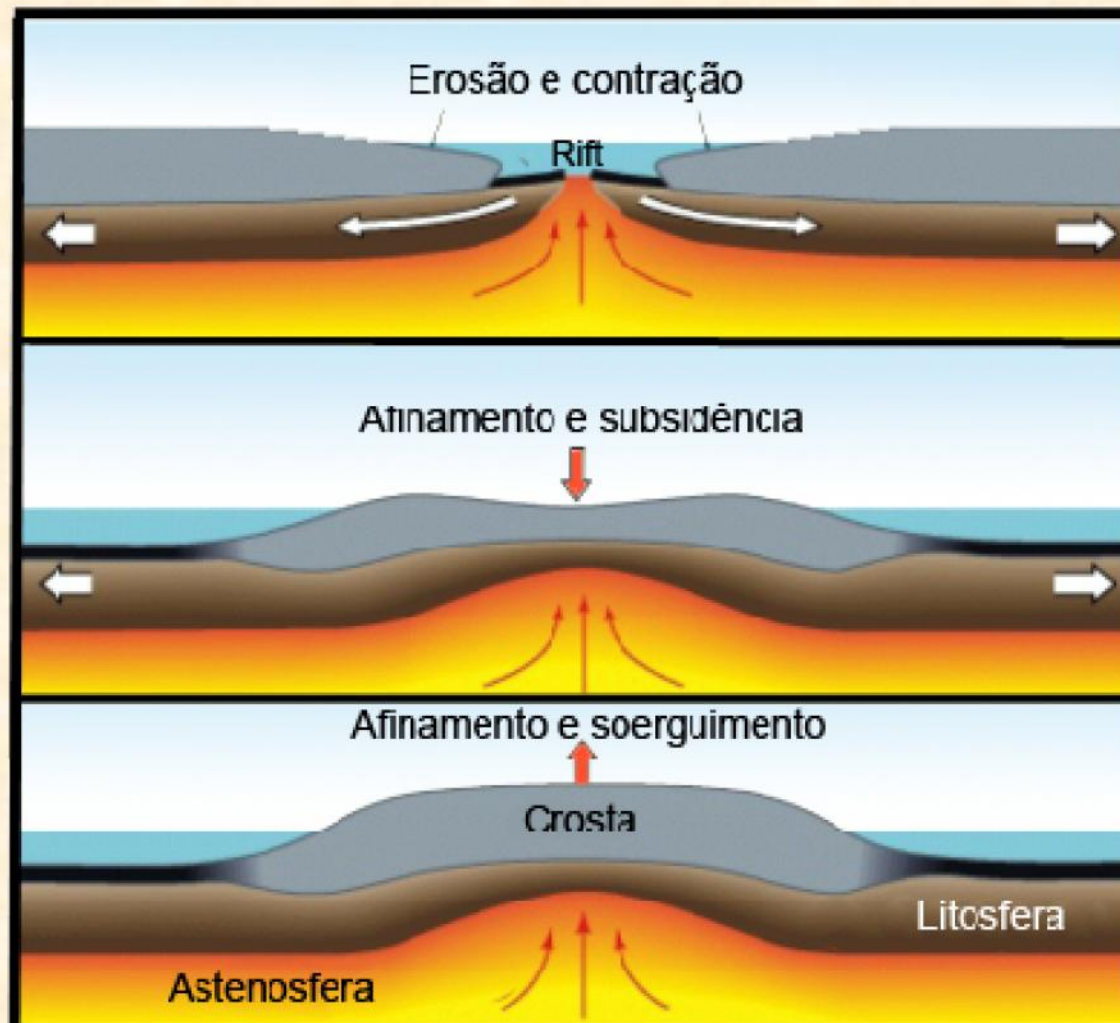


Seção esquemática em áreas com domos e bacias

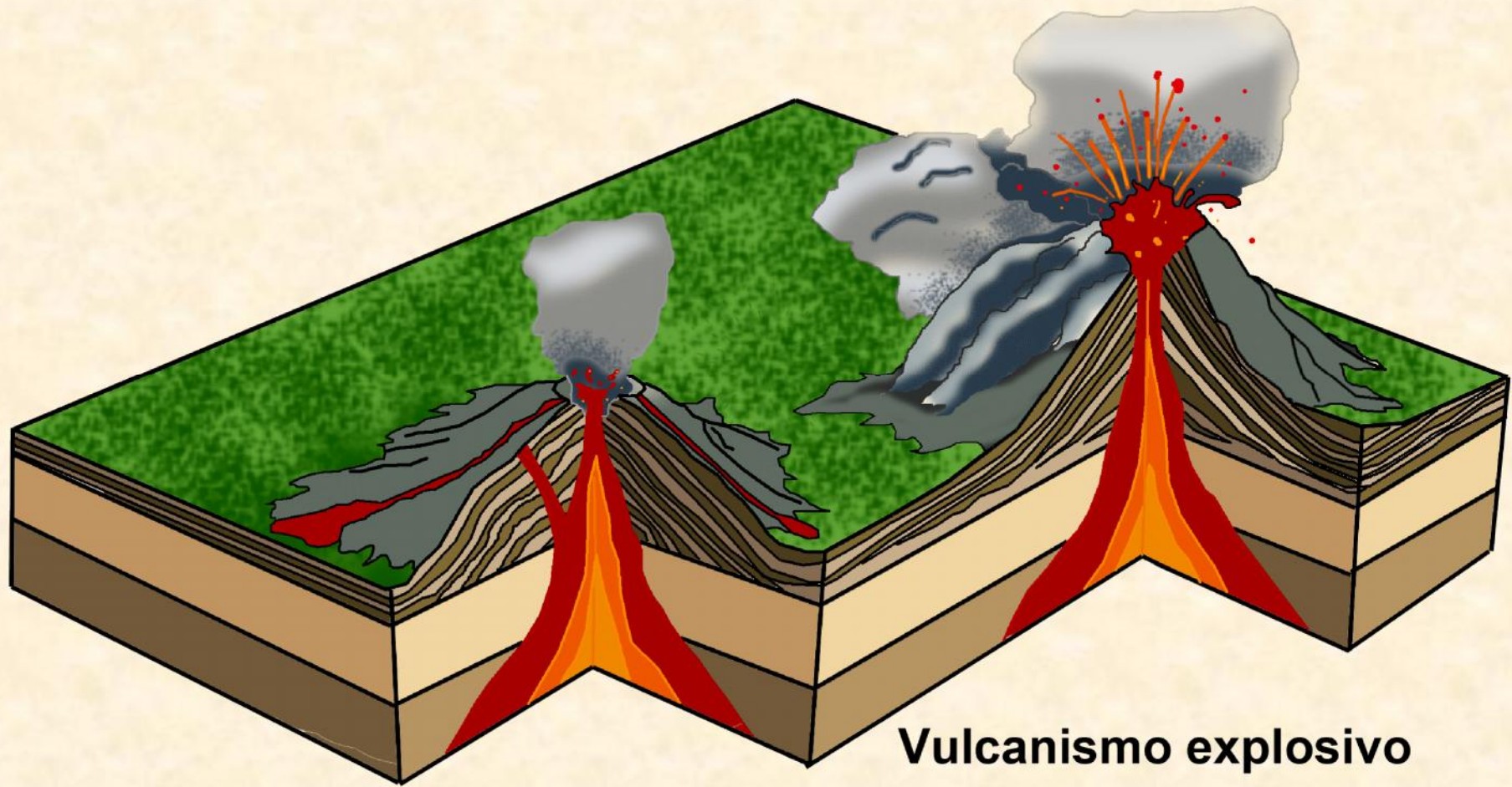


## Ascensão e subsidência da crosta

Ascensão é causada por levantamento da pluma mantélica e subsidência por extensão e resfriamento.



# Origem Vulcânica



**Vulcanismo extrusivo**

**Vulcanismo explosivo**

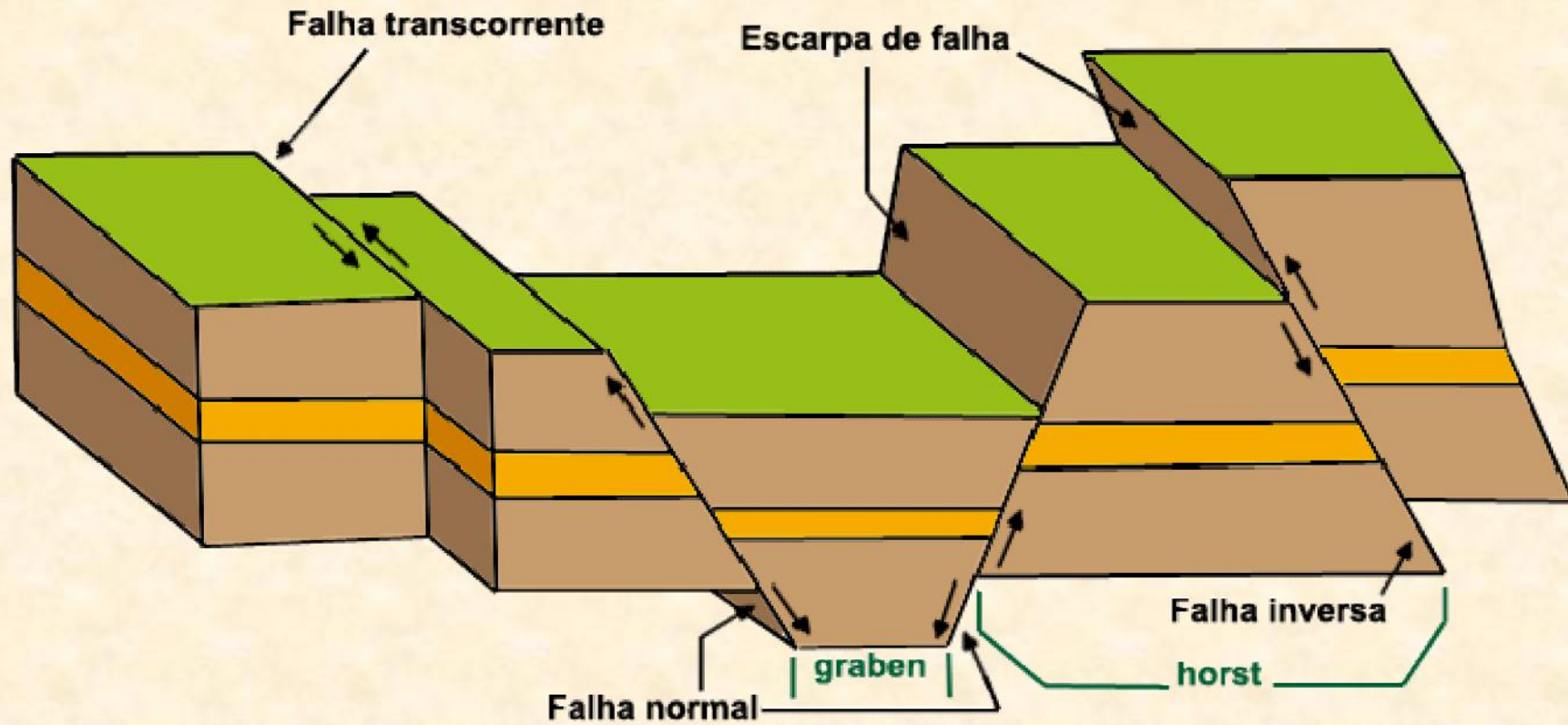


Sistemas de dobras:  
vales e cristas

Anticlinal das Montanhas  
de Zagros (Irã). Foto: J.T.  
Daniels (NASA)



Tipos fundamentais de falhas: normais, inversas e transcorrentes



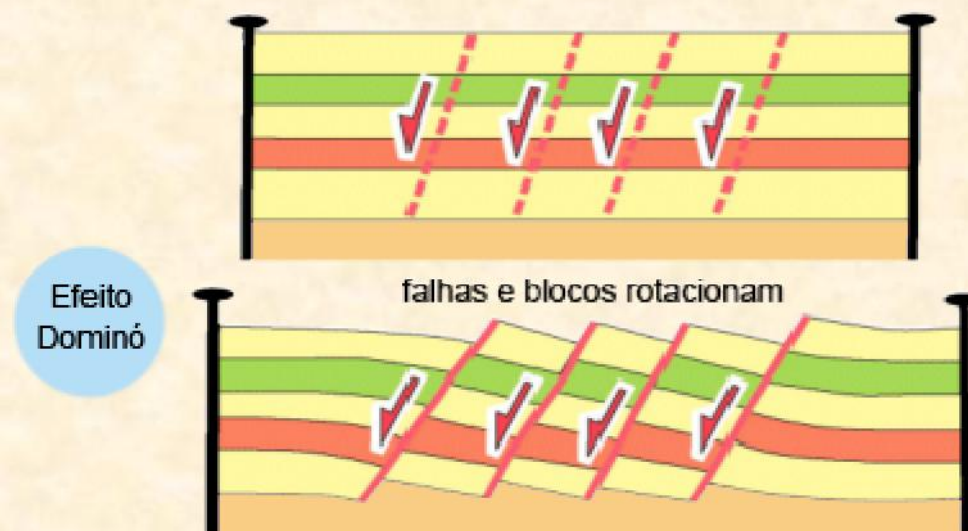
Expressão geomórfica das falhas

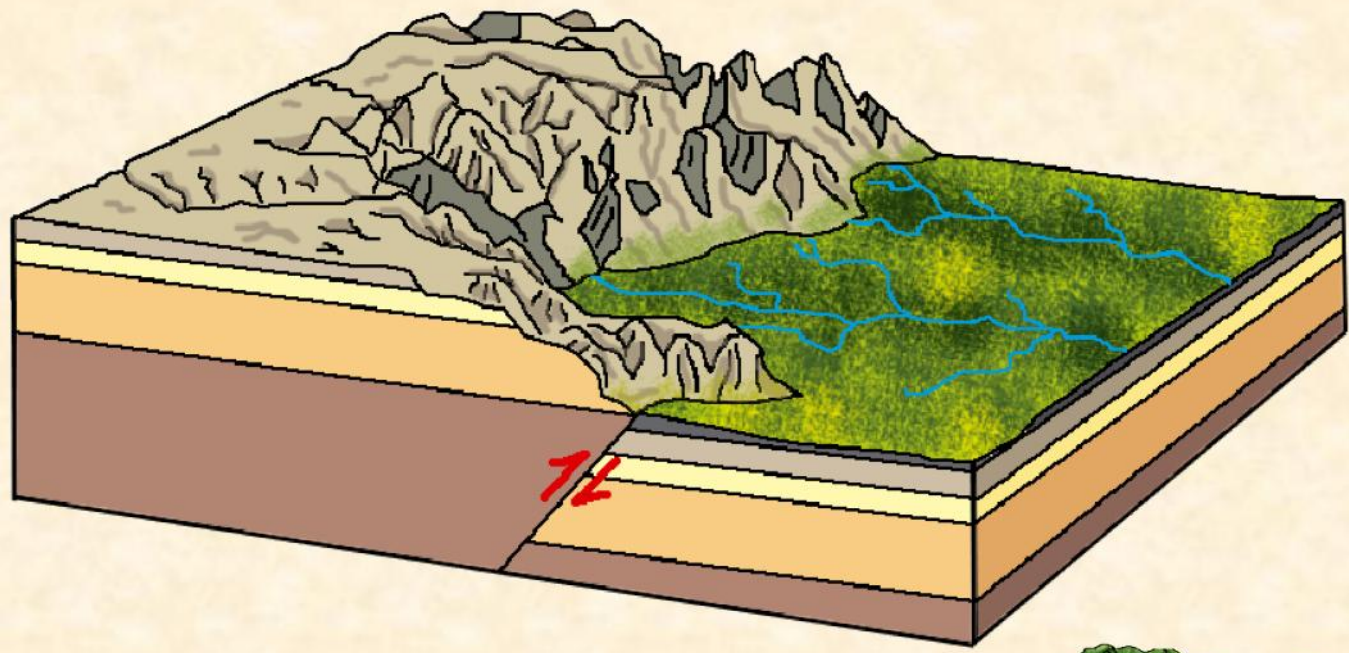


# Falhas normais: blocos inclinados tipo dominó / abertura de bacias



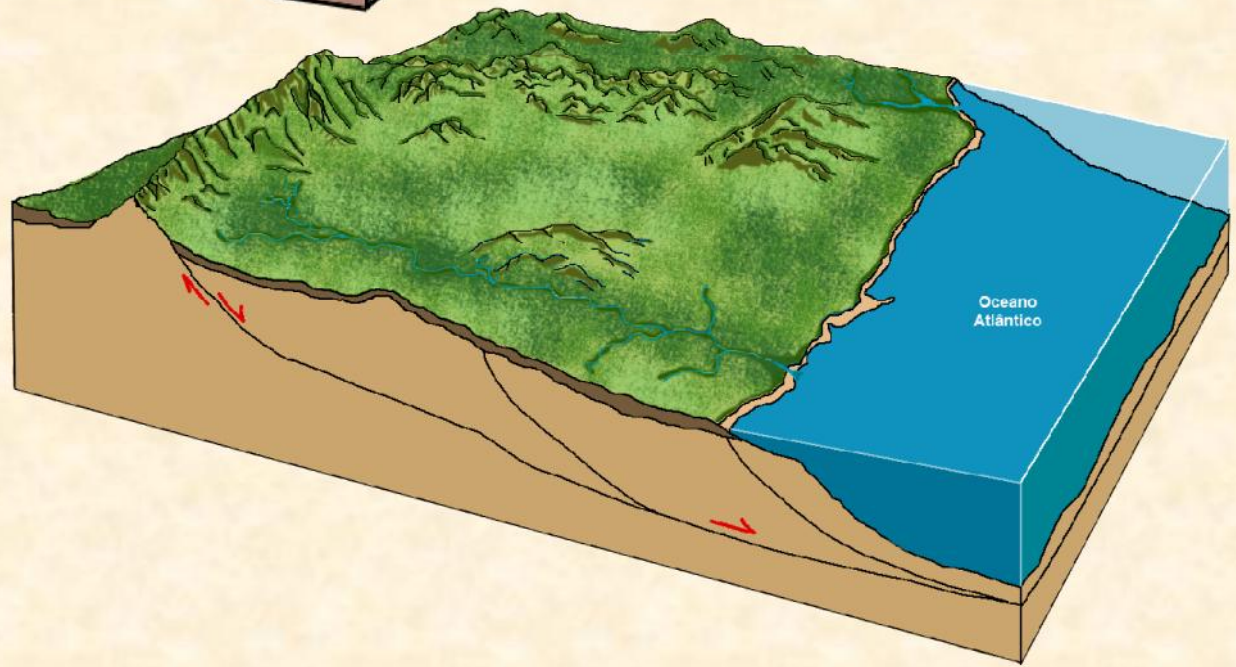
Falhas normais



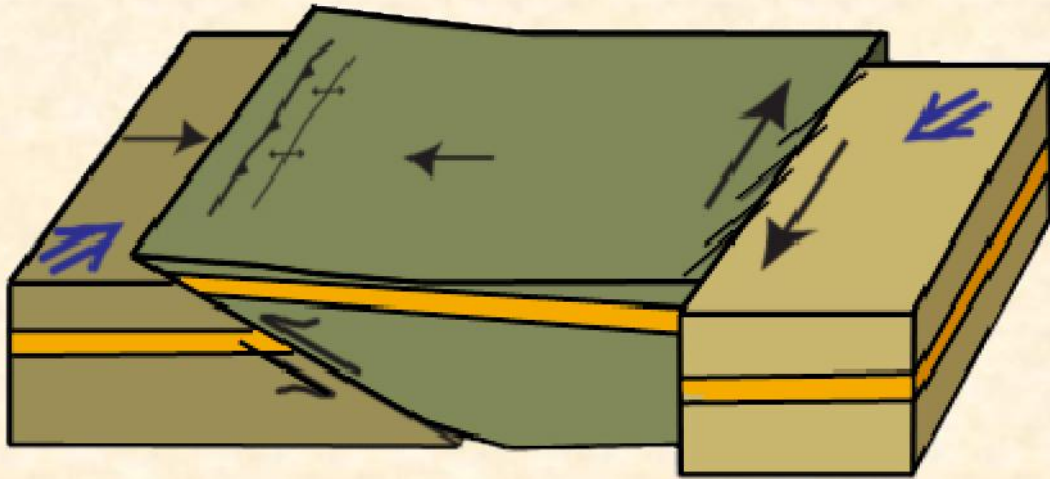


Falhas inversas

Falhas normais:  
blocos inclinados



Falha transcorrente (direita da figura)  
gerando falha inversa (a esquerda)



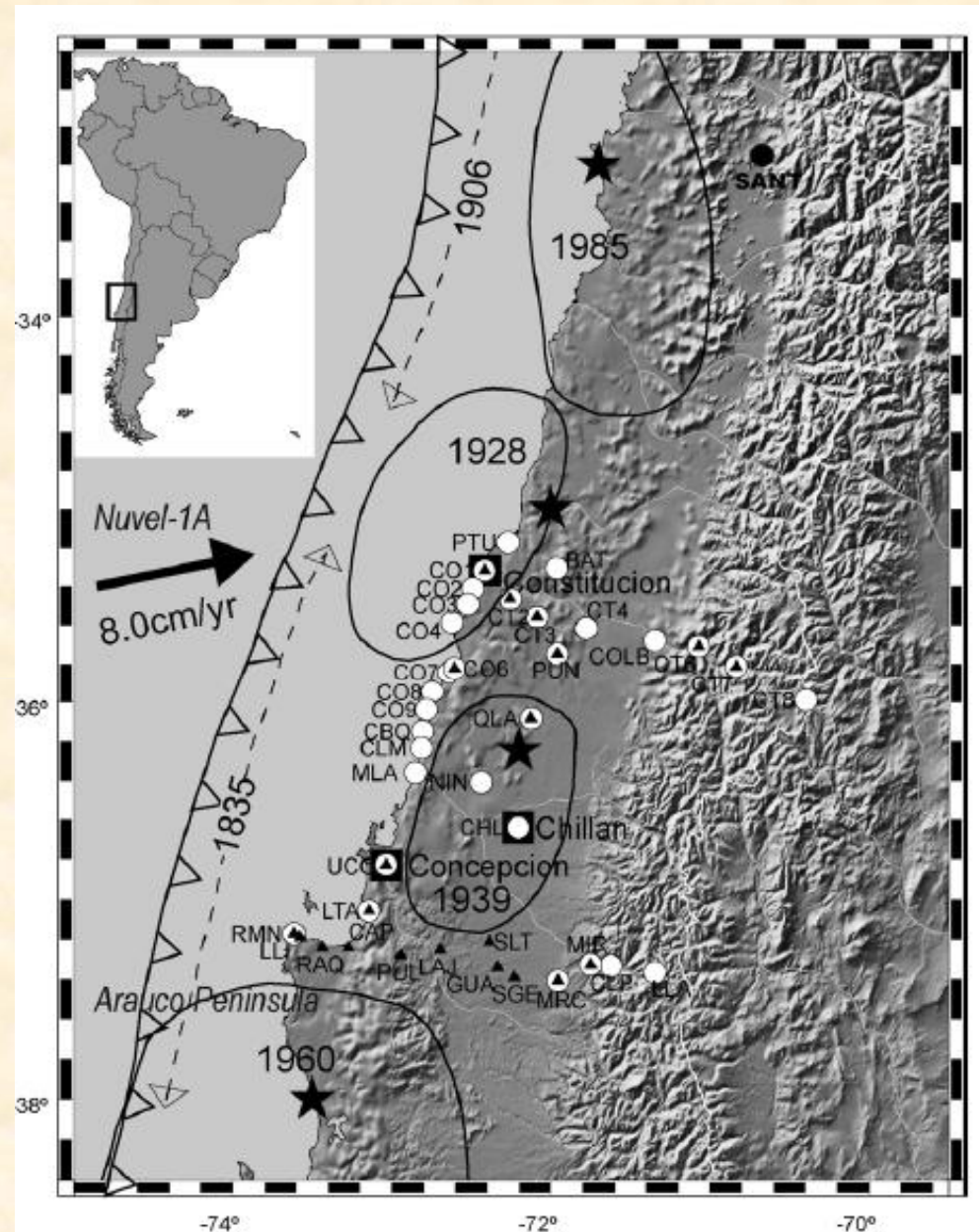
Falha transcorrente atual na  
Nova Zelândia



# Detalhe da costa do Chile / Placa de Nazca

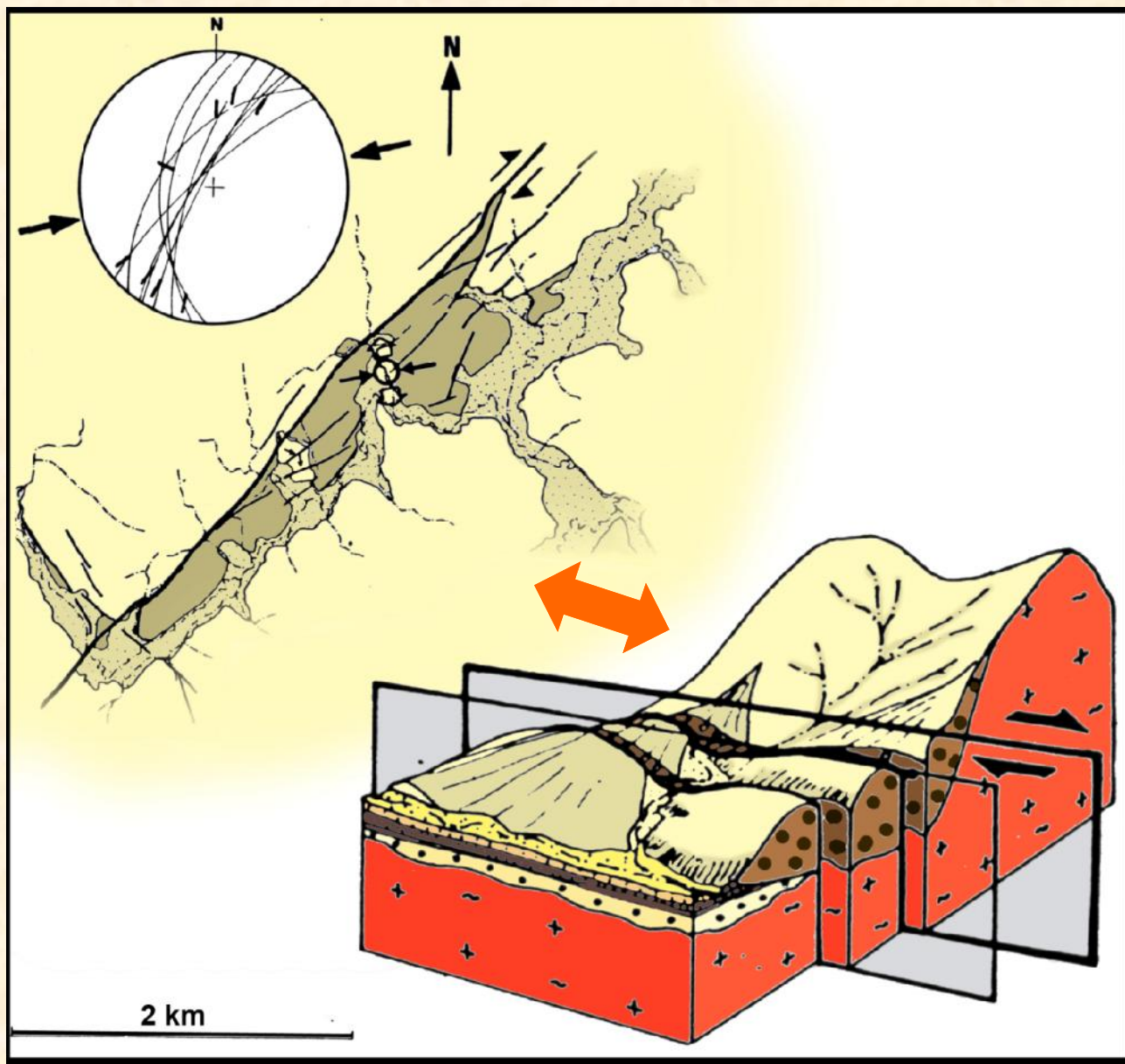
Direção de movimento é mostrada pela seta.

Os locais de epicentros de sismos com maior intensidade estão marcados pelas estrelas



Fonte: Ruegg et al. (2009) Physics of The Earth Planetary Interiors, 175

# Falha transcorrente



# Exemplos de falhas transformantes/transcorrentes



Falha do rio Jordão



Falha de Santo André



...para  
pensar até a  
próxima  
aula!

---

# ANEXO

---



# PARÂMETROS EM GEOLOGIA ESTRUTURAL

---

## CONSTANTES E FATORES DE CONVERSÃO

- Tal como nas ciências físicas em Geologia Estrutural são usados dados fundamentais e símbolos para a representação das propriedades físicas.
- Os dados numéricos dependem de circunstâncias, tais como localização geológica e, assim, não são constantes físicas estritas.
- As tabelas consistem de listas de propriedades físicas que são representadas por símbolos, que incluem letras do alfabeto grego. Os dados numéricos e as propriedades do material formam uma importante linguagem da Geologia Estrutural.

---

## TABELA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome	Unidades
$\rho$	densidade	ML <sup>-3</sup>
$\sigma$	stress	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
$\tau$	stress cisalhante	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
$\sigma_n$	stress normal	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
$\epsilon$	strain	adimensional [LL <sup>-1</sup> ]
E	Módulo de Young	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
$\nu$	Raio de Poisson	adimensional
$\gamma$	Strain cisalhante (engenharia)	adimensional
$P_p$	poro-pressão	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
f	porosidade	adimensional
T	temperatura	C°
q	Fluxo de calor	JL <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>
k	Condutividade térmica	JL <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> C° <sup>-1</sup>
z	Profundidade	L

## TABELA DE DADOS NUMÉRICOS

Símbolo	Nome	Magnitude
g	gravidade ao nível do mar	9.8 m/sec <sup>2</sup>
dm	densidade média do manto	4.5 x 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>2</sup> (4.5 g/cm <sup>2</sup> )
dquartzo	densidade do quartzo	2.65 x 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>2</sup> (2.65 g/cm <sup>2</sup> )

## TABELA DE CONVENÇÕES

Nome	Convenção
Stress principal	s1 > s2 > s3

(Stress na crosta)

Stress horizontal máximo	SH
Stress horizontal mínimo	Sh
Stress vertical	Sv
Stress normal compressional	positivo
Stress normal distensional	negativo

## TABELA DE FATORES DE CONVERSÃO

Stress e pressão

1 atm = 14.5 psi = 1 bar = 10<sup>6</sup> dynes/cm<sup>2</sup> = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> = 10<sup>5</sup> Pascals (Pa)

1 MPa = 10 bars = 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>

(obs: a pressão é aplicada em um fluido e o stress em corpos sólidos)

## TABELA DE DEFINIÇÕES

Nome	Definição
Uma componente do stress principal	$s_{ii}$ ou $s_i$
Alguma componente do stress	$s_{ij}$
Stress diferencial	$s_d = s_1 - s_3$
Stress de cisalhamento máximo	
Stress litostático	$S_H = S_h = S_v$
Pressão hidrostática	$P_p = P_p = P_p$
Stress significativo	
Stress deviatório (3 componentes)	$s_m - s_1, s_m - s_2, s_m - s_3$
Stress efetivo	$s_i - P_p$

## TABELA DE EQUAÇÕES

$P_p = \rho_{H_2O}gz$     $S_v = \rho_{rock}gz$  ; if  $\rho_{rock} = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ ,  $z = 103 \text{ m}$ ;  
então  $S_v = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/m-sec}^2 = 25 \text{ MPa/km}$

- O gradiente geotérmico ( $dT/dz \rightarrow T=\text{Temperatura}$  e  $z=\text{profundidade}$ ) na crosta é cerca de  $20^\circ \text{ C/km}$ . O gradiente pode variar de  $10^\circ \text{ C/km}$  a  $40^\circ \text{ C/km}$  em um terreno glaucofanaxisto. O baixo gradiente geotérmico pode ocorrer nas vizinhanças de rocha cristalina com cavalgamentos onde a crosta fria é rebaixada. Altos gradientes ocorrem em regiões de intrusão magmática. Fluxos de calor ( $q$ ) na superfície é uma indicação de gradiente geotérmico contanto que condutividade térmica ( $K$ ) da crosta seja baixa  $q = K(dT/dz)$ .