

Deformação de rochas processos e produtos

Tipos de deformação
Estruturas: dobras e falhas



Aula on-line
realizada com o Google Meet
em 04 de setembro de 2020
por conta da pandemia de covid-19

Estruturas Primárias

- São estruturas formadas durante o processo de geração da rocha.
- ***Estruturas primárias ígneas***: estrutura vesicular e/ou amigdaloidal, estrutura maciça, forma dos corpos (diques, sills, etc.).
- ***Estruturas primárias sedimentares***: estrutura estratificada (ou laminada, quando fina) e outras estruturas registradas durante a deposição e litificação de sedimentos (ex.: marcas onduladas, gotas de chuva, pegadas e rastros de fósseis).

Estruturas ígneas primárias



Fig. 17.47 Vista dos derrames da Formação Serra Geral formando o canhão de Aparados da Serra. Foto: M. Ernesto.

Estruturas ígneas primárias



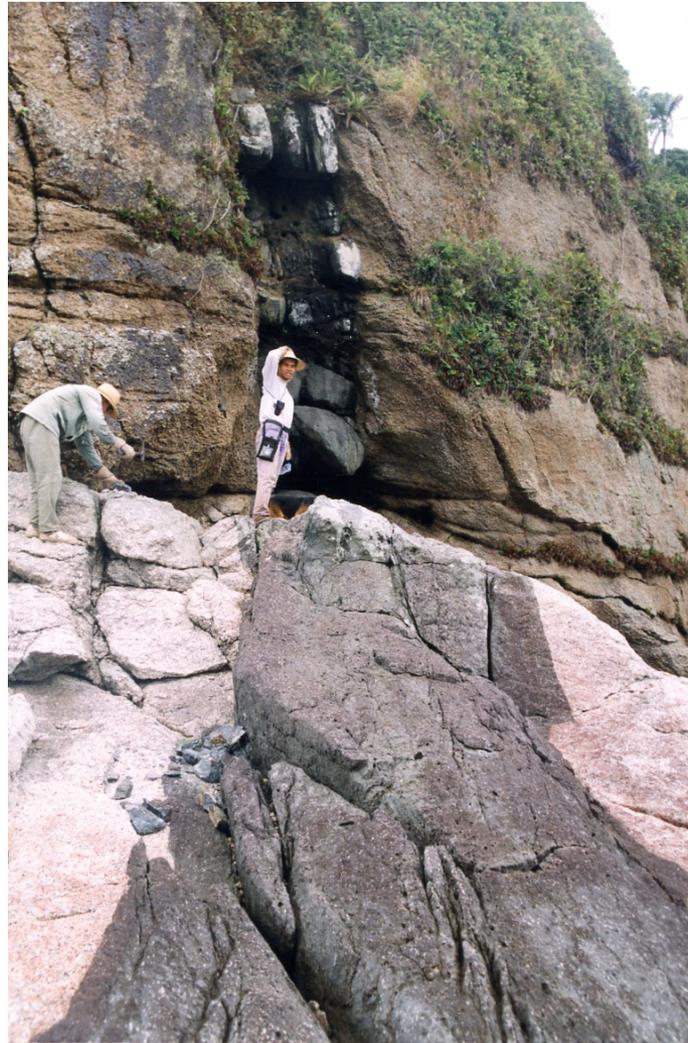
Fig. 17.43 Rocha vulcânica amigdaloidal. Formação Serra Geral da Bacia do Paraná. Foto: Coleção do Instituto de Geociências da USP.

Estruturas ígneas primárias



(C) Hexagonal columnar joints commonly form by contraction when a lava cools. The long axis of the column is approximately perpendicular to the cooling surface. These columns form the Giant's Causeway, Ireland. *(Photograph © Tom Till)*

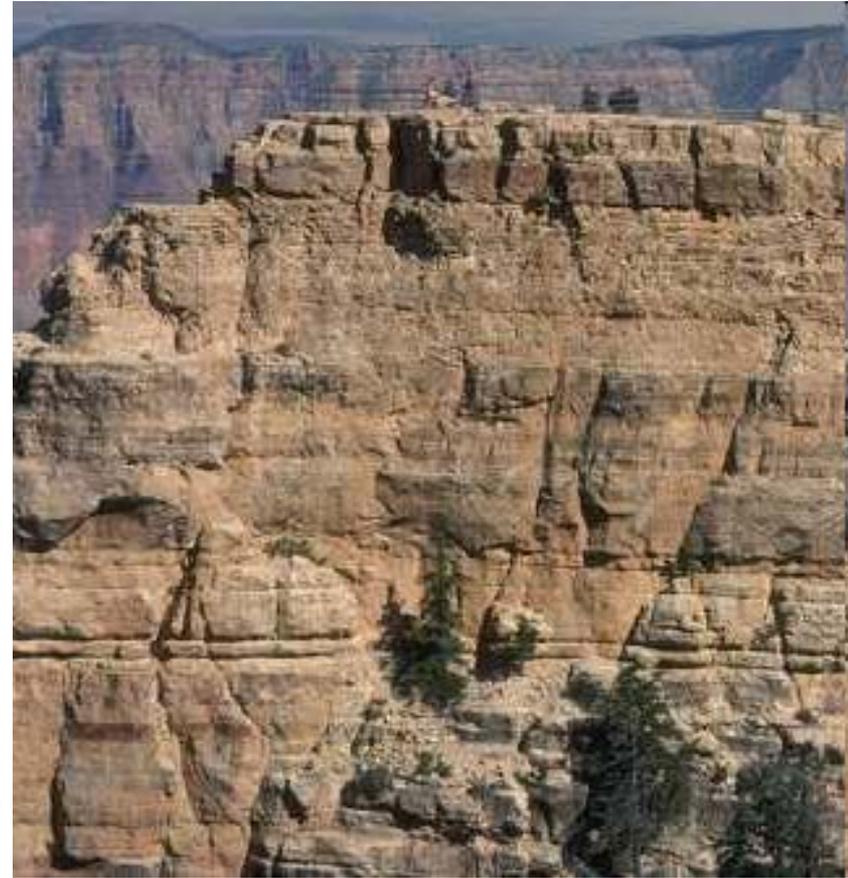
Estruturas ígneas primárias



**Dique de fonólito
Ilha Monte de Trigo, SP**

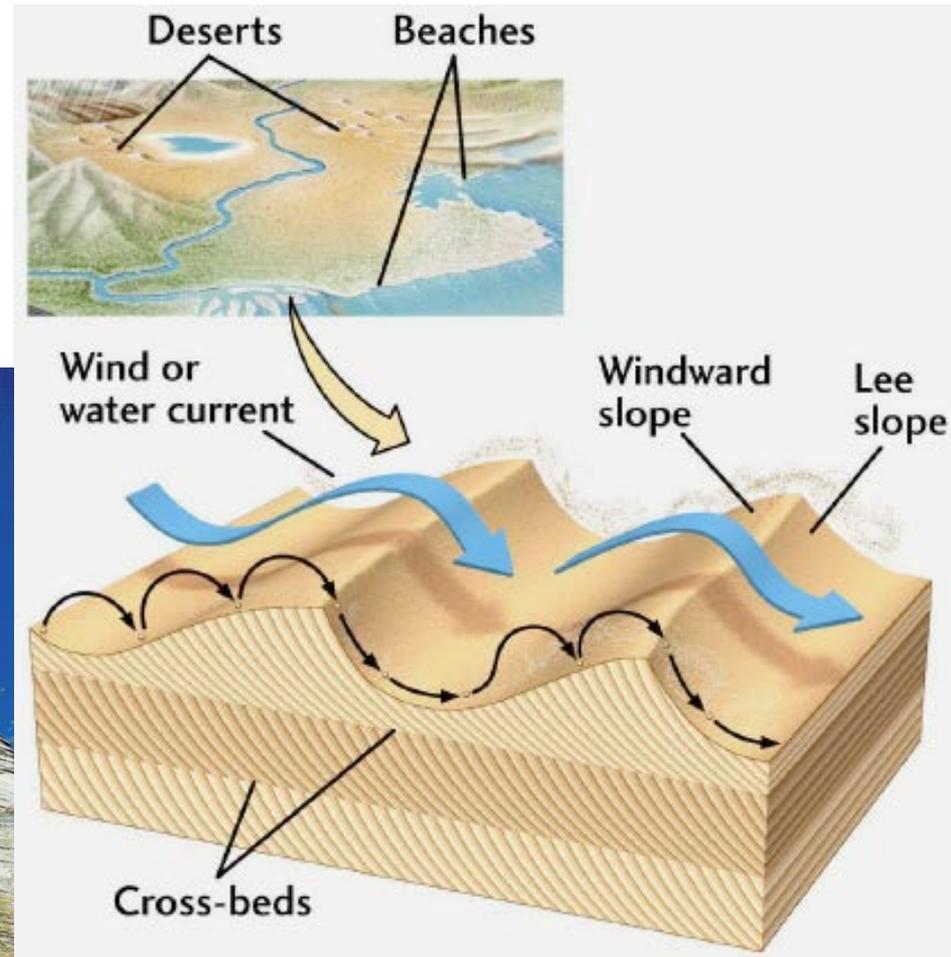
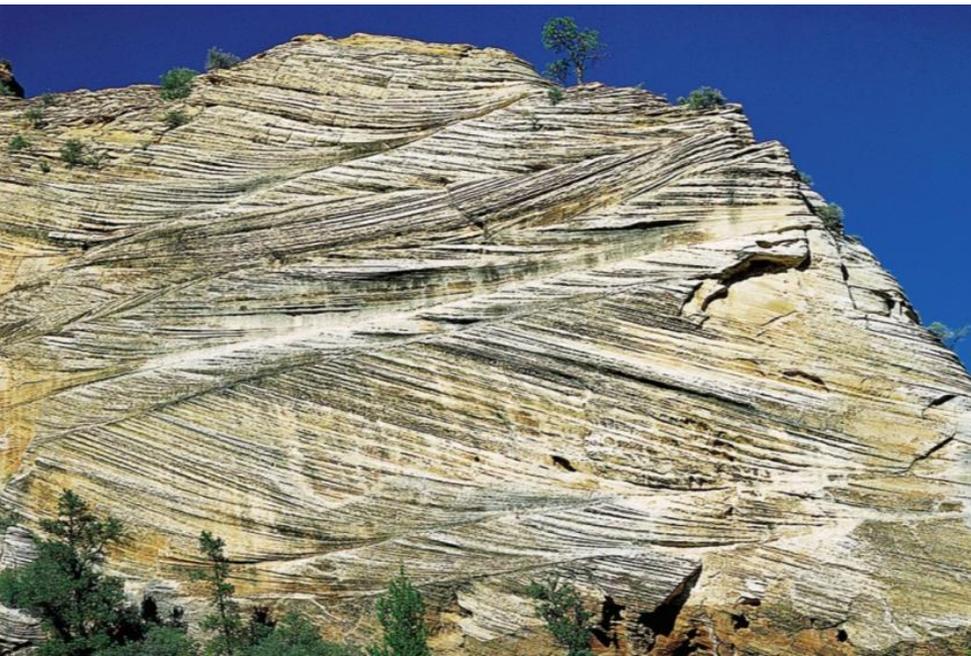
Estruturas sedimentares primárias

Estratificação Plano-Paralela



Estruturas sedimentares primárias

Estratificação Cruzada



Estruturas sedimentares primárias

Marcas Onduladas



Estruturas geológicas secundárias

- Geradas por **deformação** de rochas pré-existentes.
- Em geral associada a formação de rochas metamórficas

Estruturas secundárias



Estruturas Secundárias



Estruturas Secundárias



Estruturas secundárias



Estruturas secundárias



Fotos: Metrô - SP

Deformação nas rochas

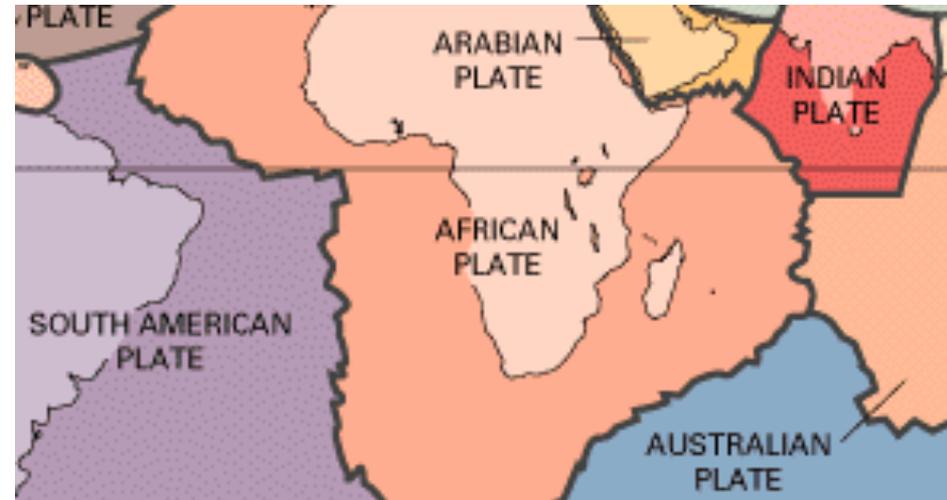
Onde? Por quê?



Deformação nas rochas

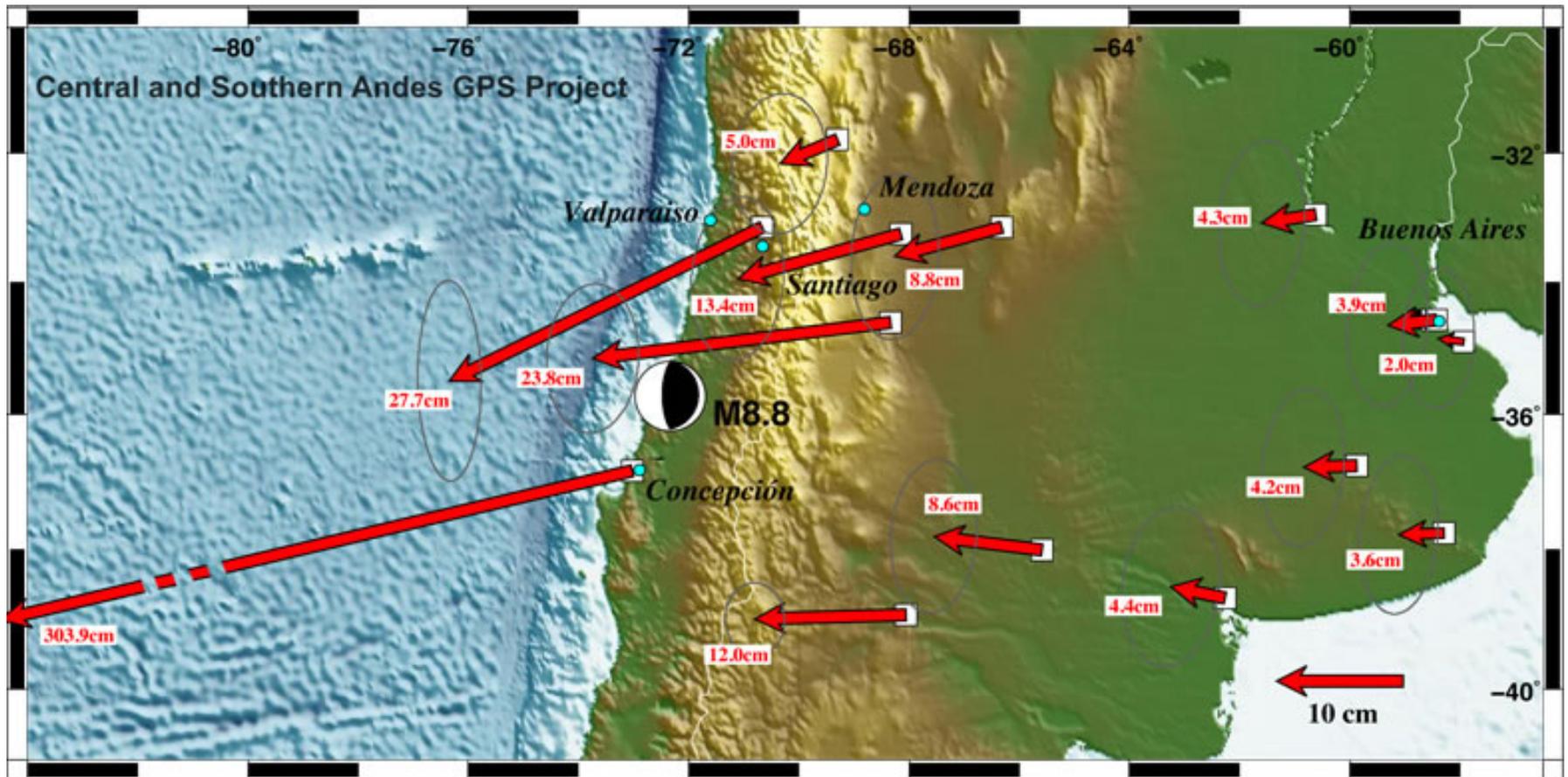
Onde? Por quê?

- As placas tectônicas, que constituem a parte superior do planeta, estão em constante movimento



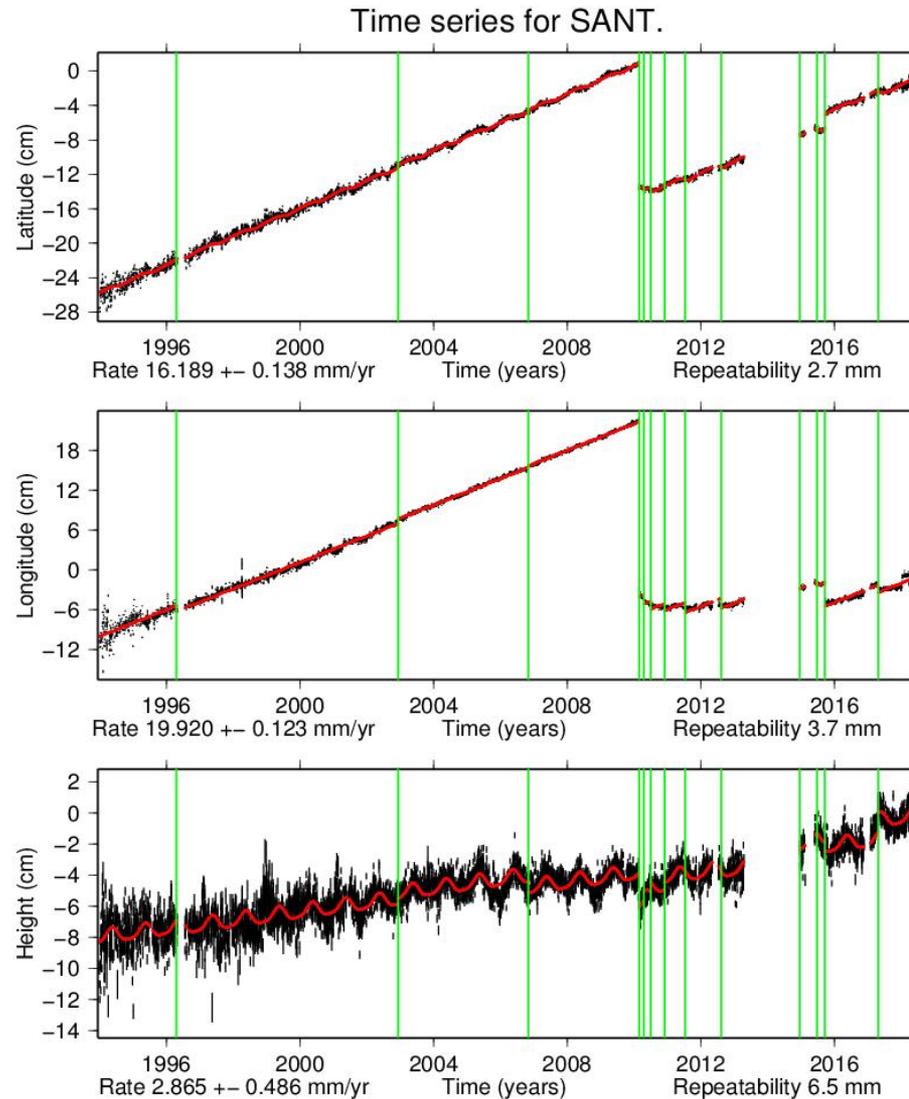
Placas tectônicas

Deslocamento da crosta durante o terremoto do Chile M8,8 em 27/02/2010



Deslocamento da crosta durante o terremoto do Chile M8,8 em 27/02/2010

Estação de GPS de Santiago, Chile



Deformação nas rochas

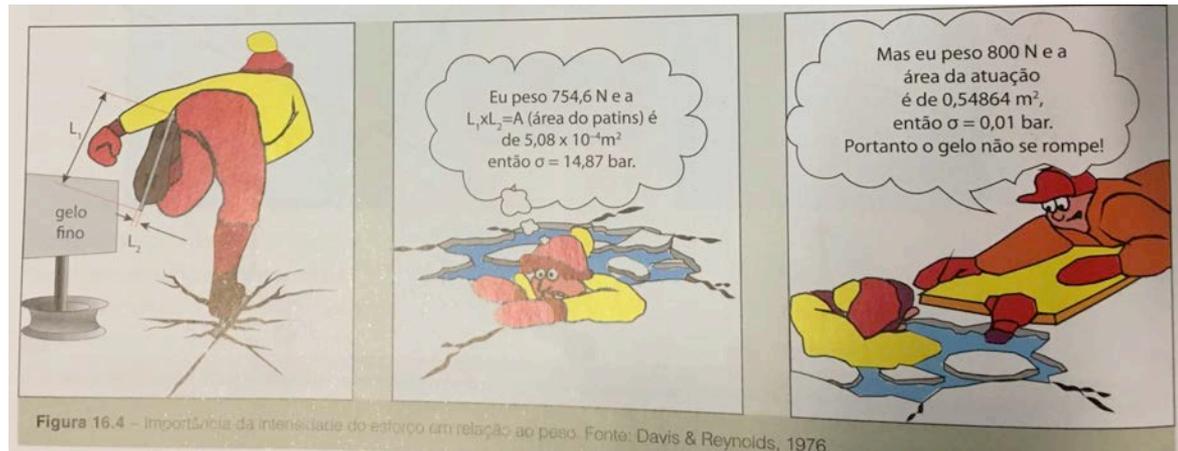
Onde? Por quê?

- Terremotos são uma manifestação da deformação ativa (limites e interior) das placas tectônicas
- O relevo também é uma manifestação da deformação (montanhas, riftes, graben)

Definições básicas

- **Esforço** (σ) é a força (F) que atua sobre uma área (A):

$$\sigma = F/A$$

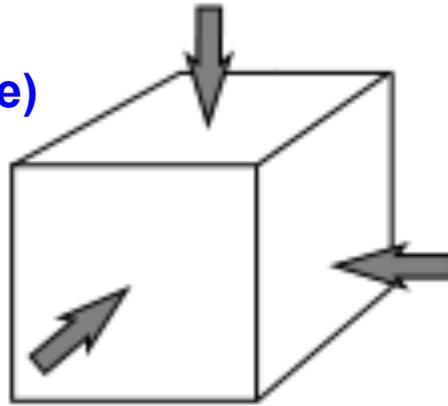


- é medido em Pascal (Pa), que é Newton/metro²
- nos livros de geociência também aparece KPa (quilopascal), MPa (megapascal), GPa (gigapascal) ou bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)

Definições básicas

- **Deformação** ocorre quando uma tensão deviatória (ou diferencial) causa a mudança de forma de um corpo
 - Tração causa o estiramento do corpo
 - Compressão causa o achatamento do corpo
 - Cisalhamento causa translação e deslizamentos internos do/no corpo

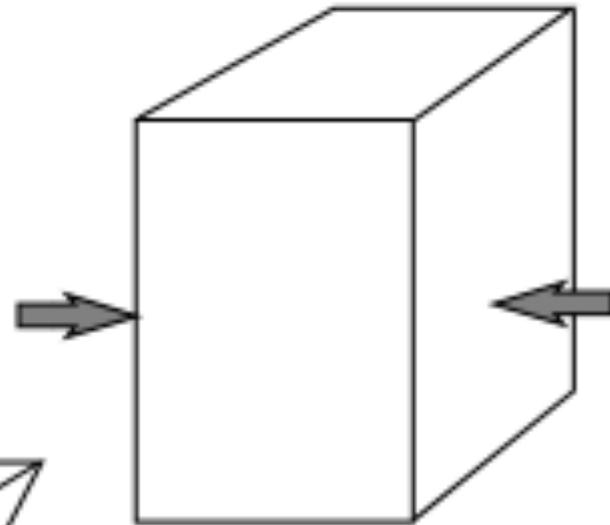
pressão litostática (confinante)



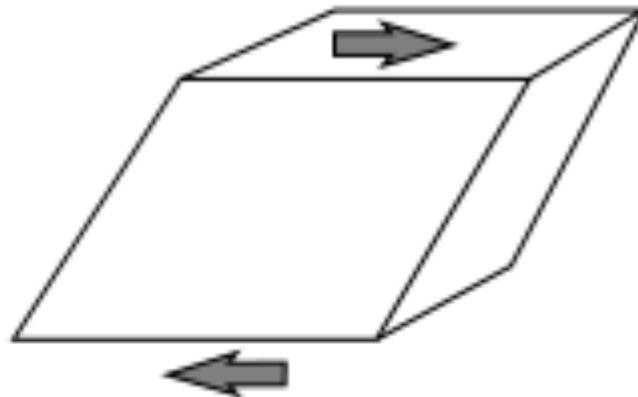
tensão diferencial



tração



compressão

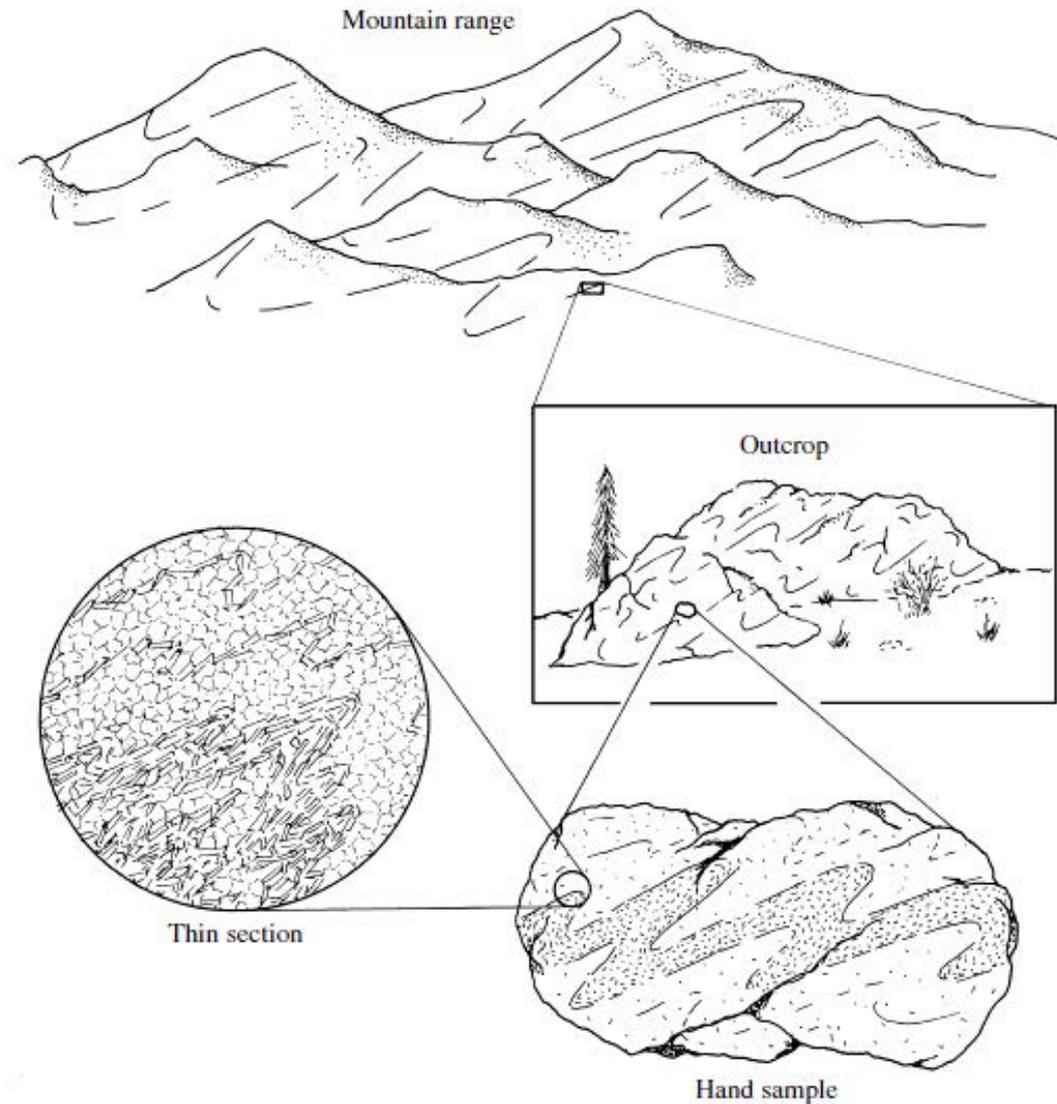


cisalhamento

Esforço e Deformação

- Relações entre **Esforço** e **Deformação**
 - importante para o estudo do comportamento mecânico das rochas durante o processo deformacional
- Estudo dos corpos rochosos deformados
 - aspectos geométricos
 - investigação das causas
 - processos de deformação

Escala das Transformações



14.14 Many terranes of regionally metamorphosed rock have been homogeneously deformed on all scales of observation—from mountain range down to thin section. This penetrative anisotropic tectonite fabric is, therefore, scale invariant and fractal-like. In this hypothetical diagram, looking down the axis of folds, their orientation and style are the same regardless of the size of the area observed.

Deformação



elástico

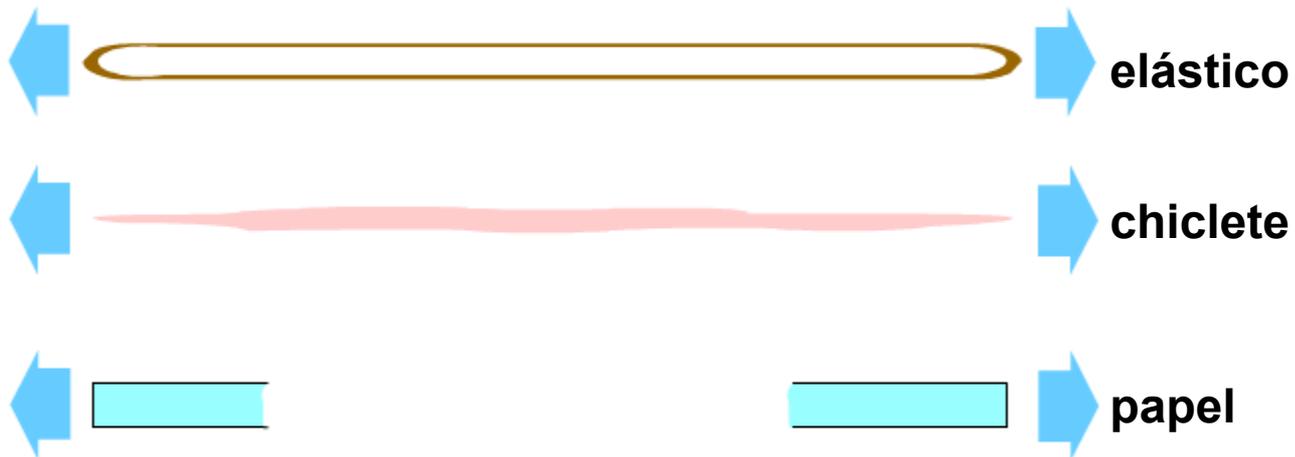


chiclete



papel

Deformação



Deformação

deformação elástica



elástico

deformação plástica



chiclete

ruptura

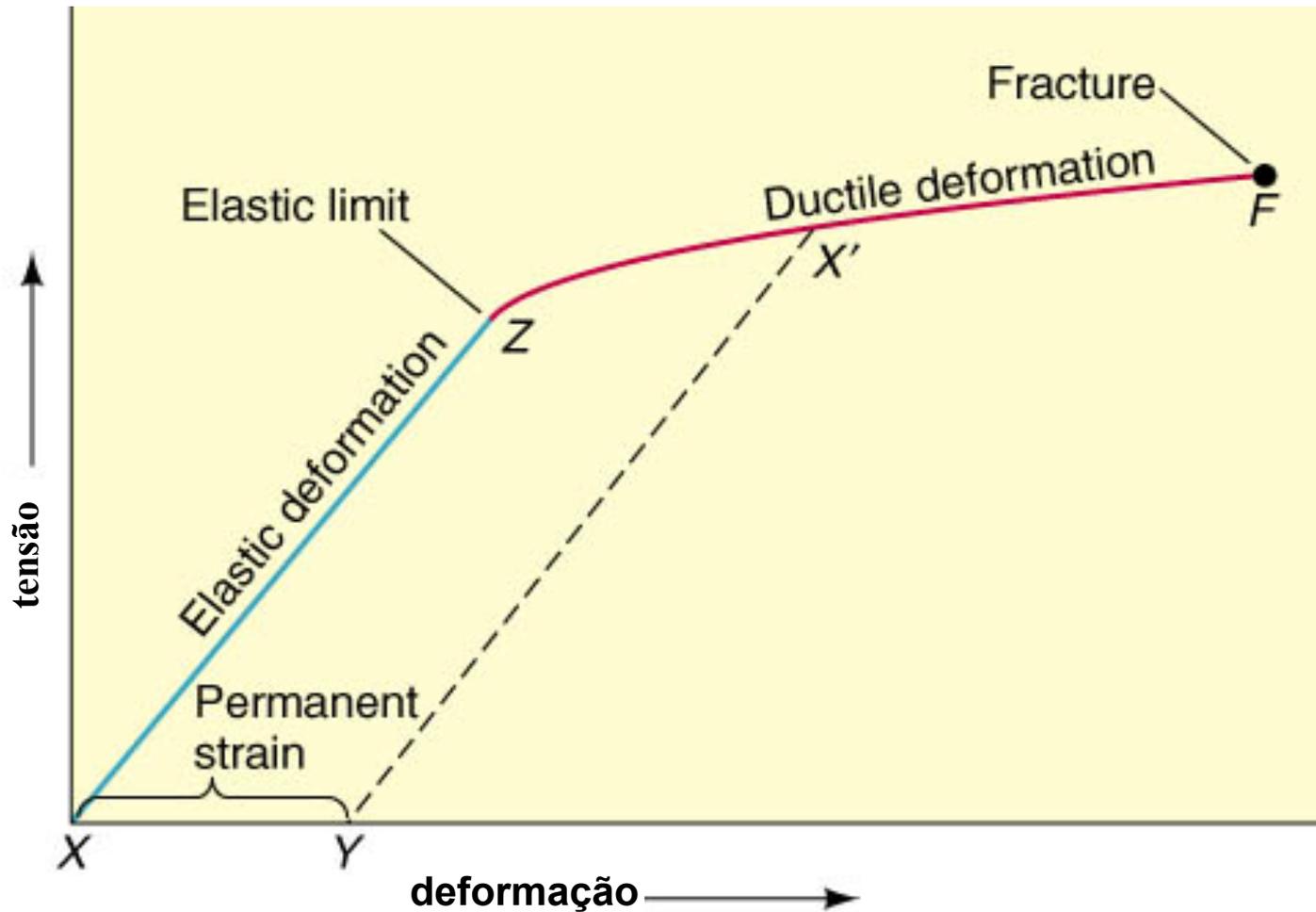


papel

Deformação nas rochas

- **Deformação elástica:**
 - reversível, assim que a tensão for retirada o corpo volta ao estado original
- **Deformação plástica (ductil):**
 - irreversível.
 - forma estruturas internas (foliação ou xistosidade de rochas metamórficas) e dobras.
- **Deformação rúptil:**
 - os corpos rochosos são quebrados,
 - forma juntas e falhas.

Deformação nas rochas



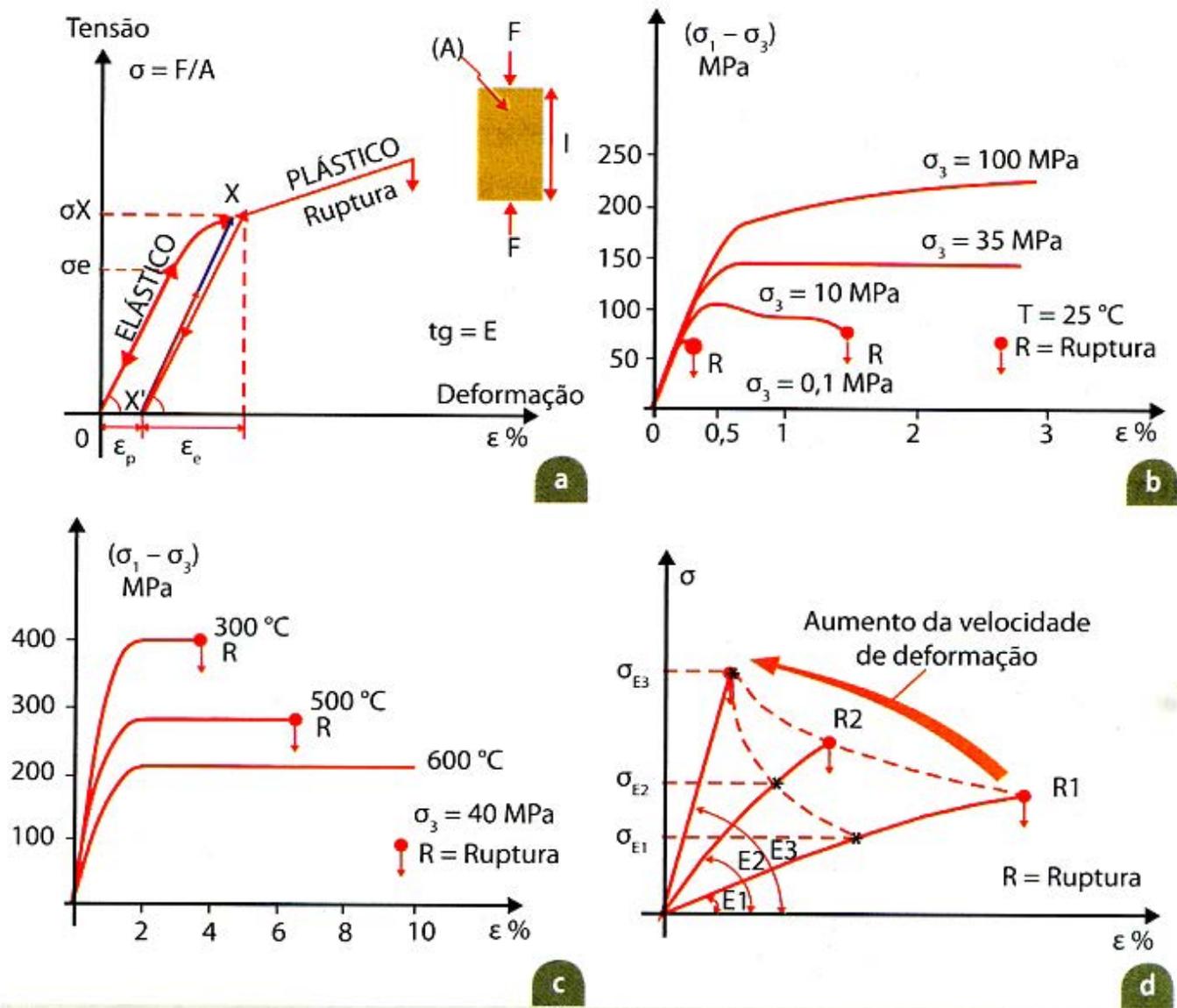
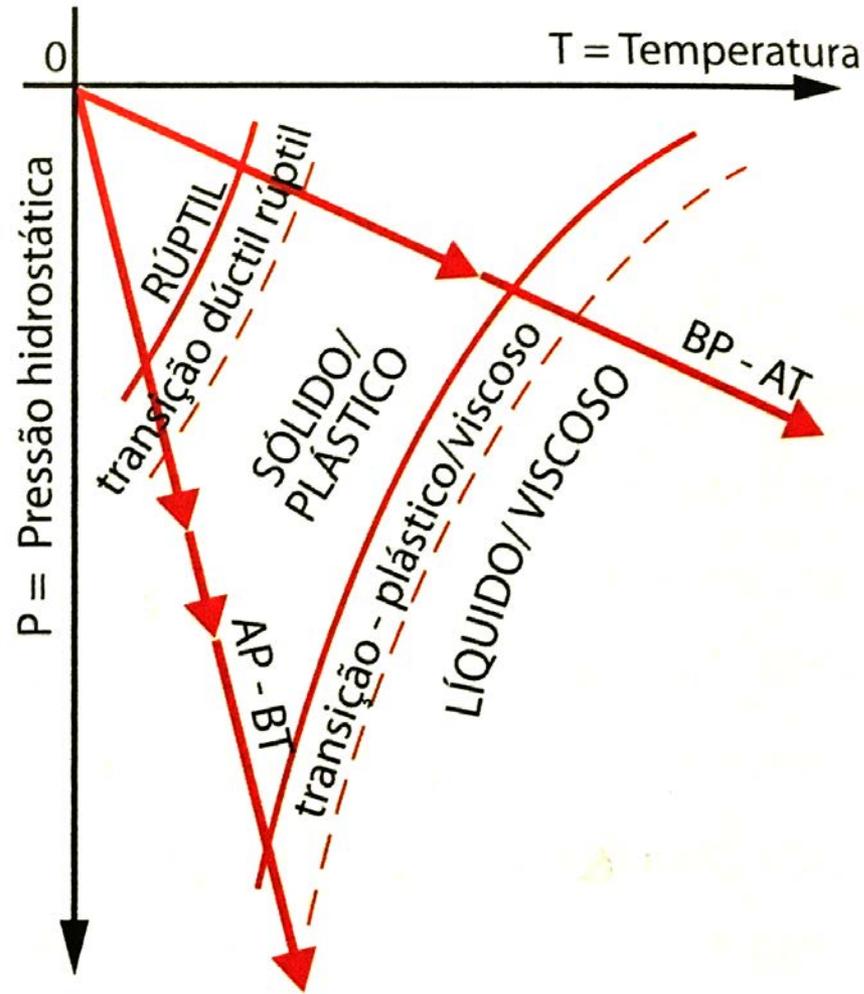
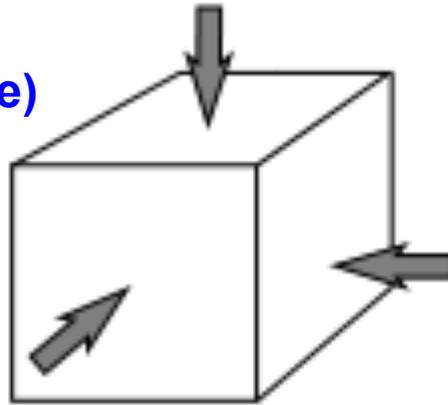


Figura 16.6 – Gráficos da deformação em função do esforço: a) para um cilindro sob compressão uniaxial; b) deformação sob temperatura constante e pressões de confinamento (σ_3) variáveis; c) deformação sob pressão confinante constante ($\sigma_3 = 40$ MPa) e temperatura variável; d) deformação sob condições de velocidade e deformação variáveis. Fonte: Mercier & Vergely, 1992.

Deformação nas rochas



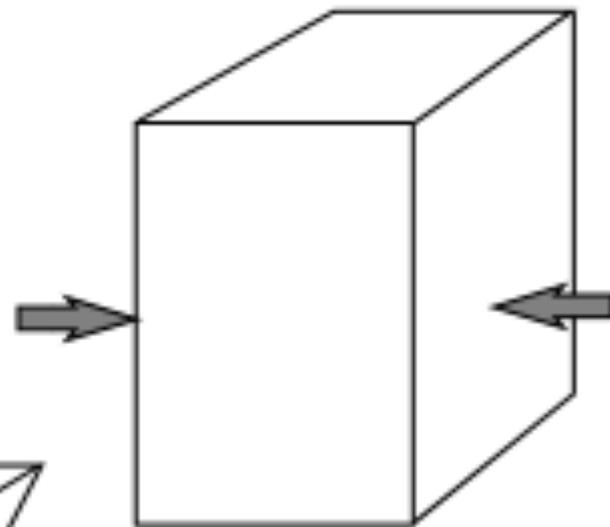
pressão litostática (confinante)



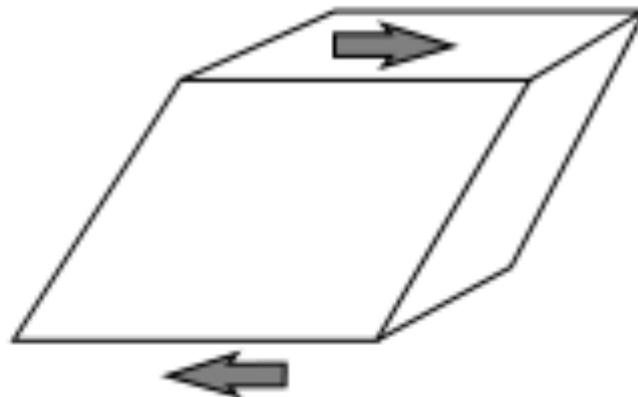
tensão diferencial



tração



compressão

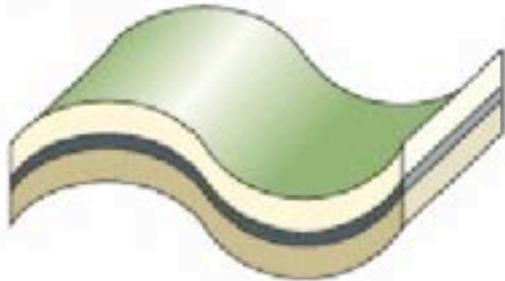


cisalhamento

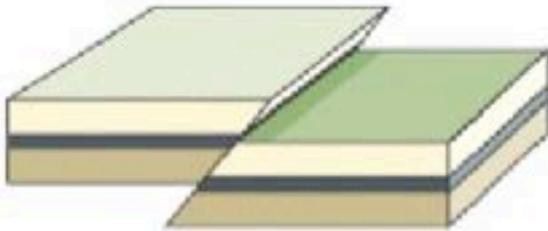
Forças compressivas



DOBRAMENTO



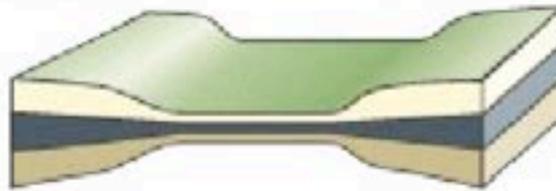
FALHA



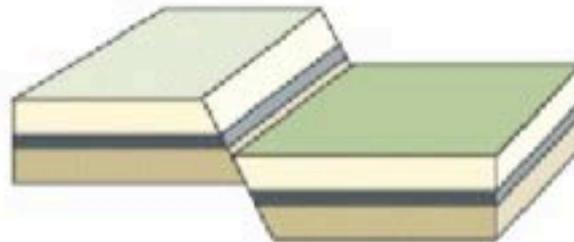
Forças extensionais



ESTIRAMENTO e AFINAMENTO



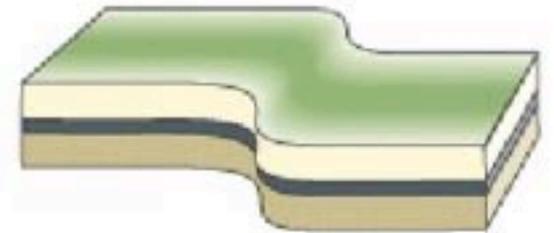
FALHA



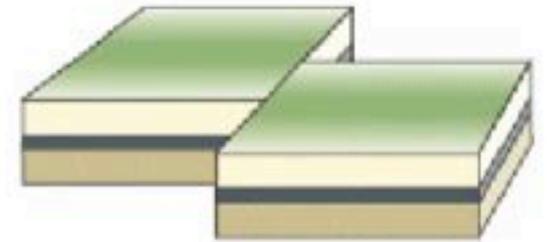
Forças cisalhantes



CISALHAMENTO



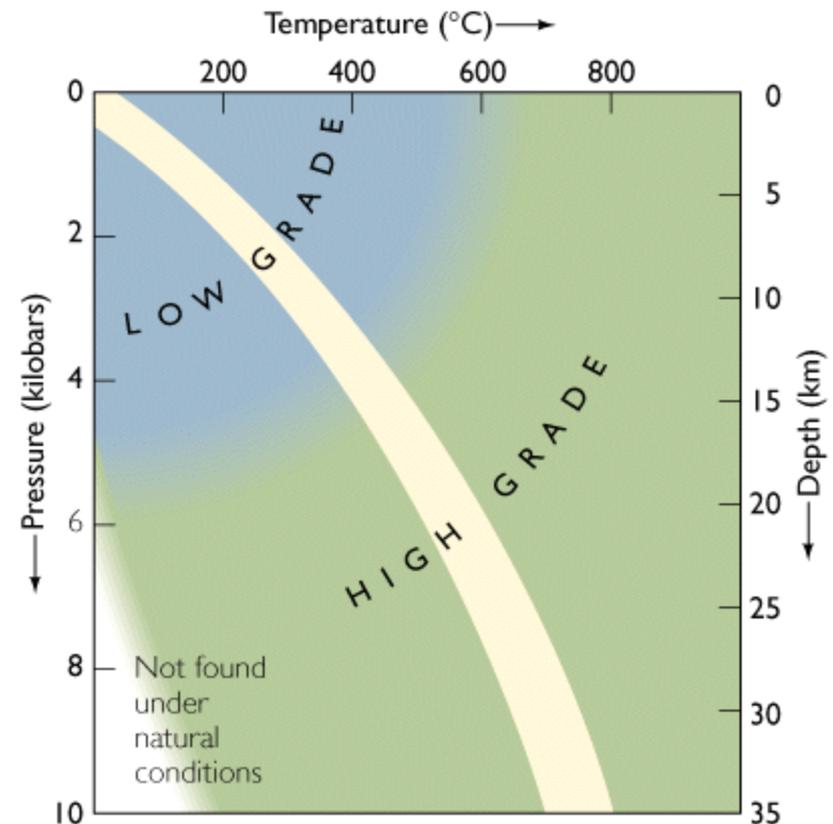
FALHA



O que controla o tipo de deformação das rochas?

- O tipo de deformação que uma rocha sofre é controlado por vários fatores, sendo os mais importantes:
 - Temperatura
 - Pressão confinante (profundidade)
 - Pressão dirigida (tectônica)
 - Características composicionais do próprio material

- Gradiente geotérmico na crosta
 - Aumento da ordem de 20 – 30°C por km
- Aumento de pressões
 - Da ordem de ~ 1 kbar para cada 3 km

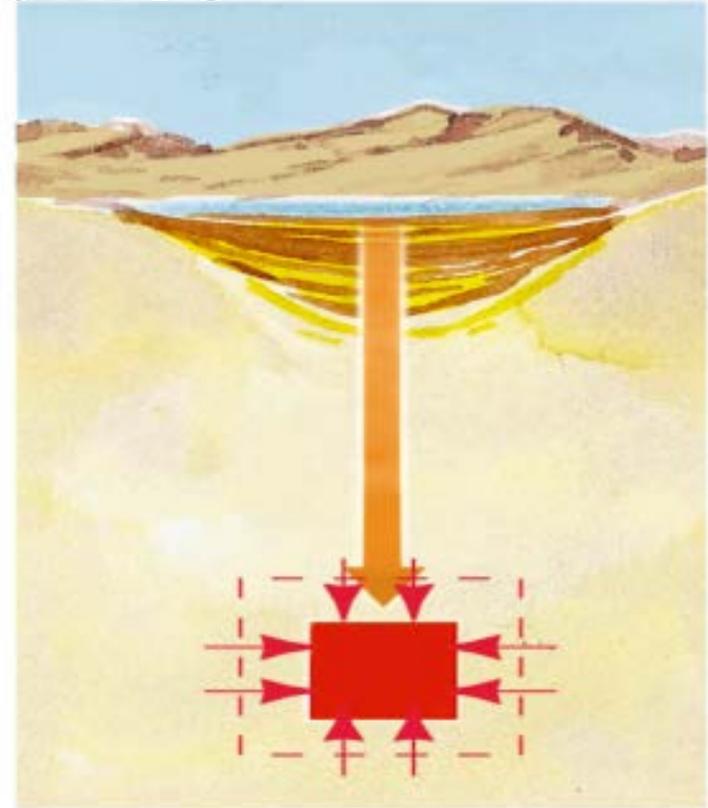
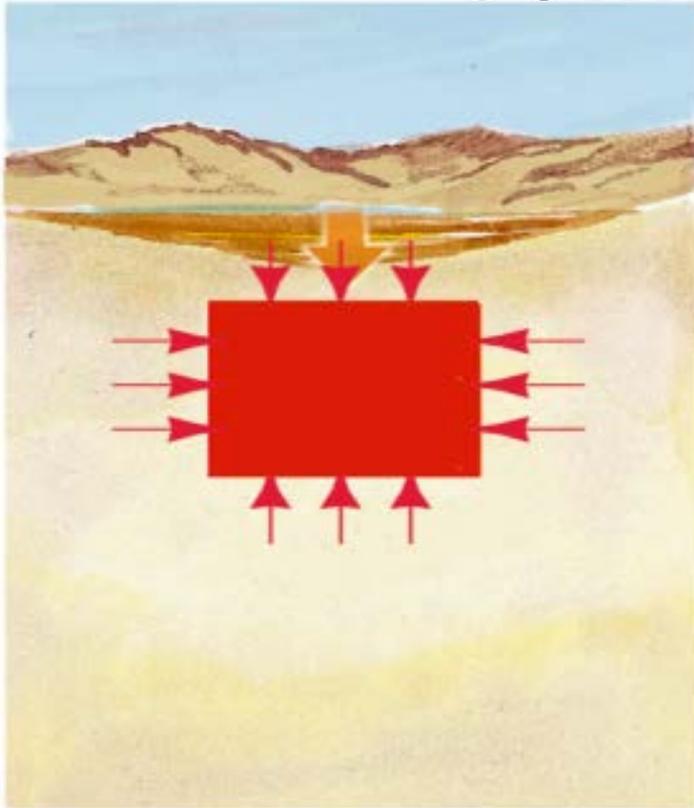


Fatores condicionantes do metamorfismo:

PRESSÃO

- A pressão aumenta com a profundidade: ~ 1 kbar para cada 3 km
- **Pressão litostática ou confinante**
 - Não apresenta direção preferencial, decorrente do peso da coluna de rochas suprajacente.
- **Pressão dirigida ou tectônica**
 - Causada por esforços tectônicos: deformação nas rochas e orientação de minerais.

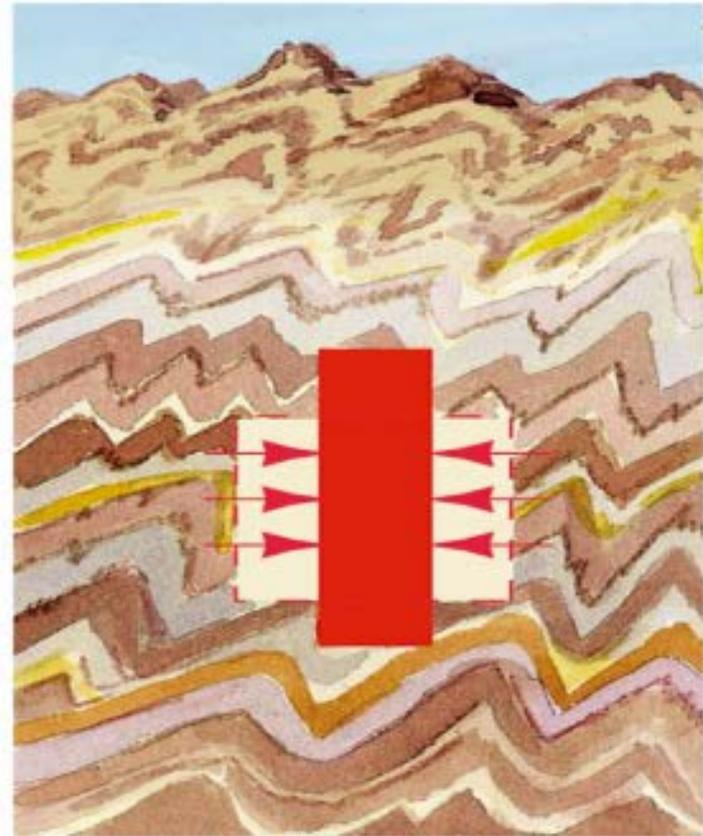
Pressão Litostática ou Confinante



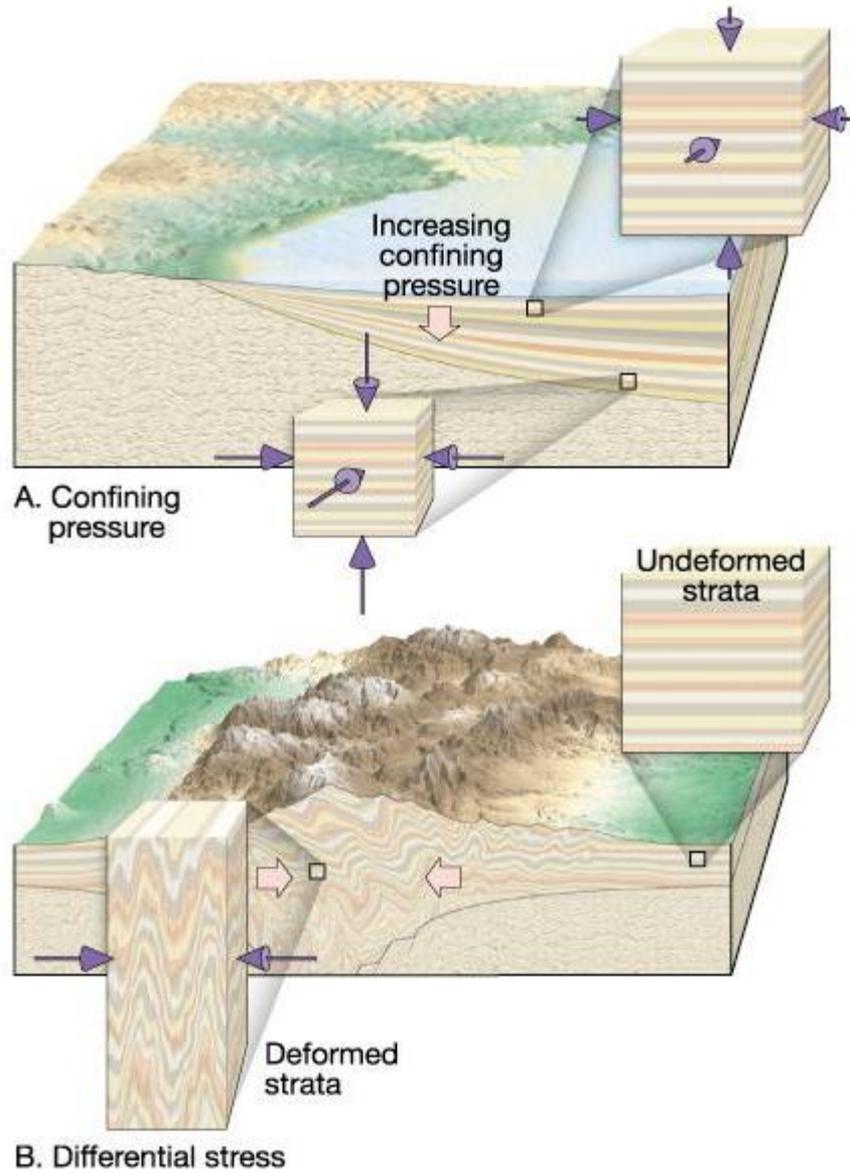
depende de h (altura da coluna de rocha)

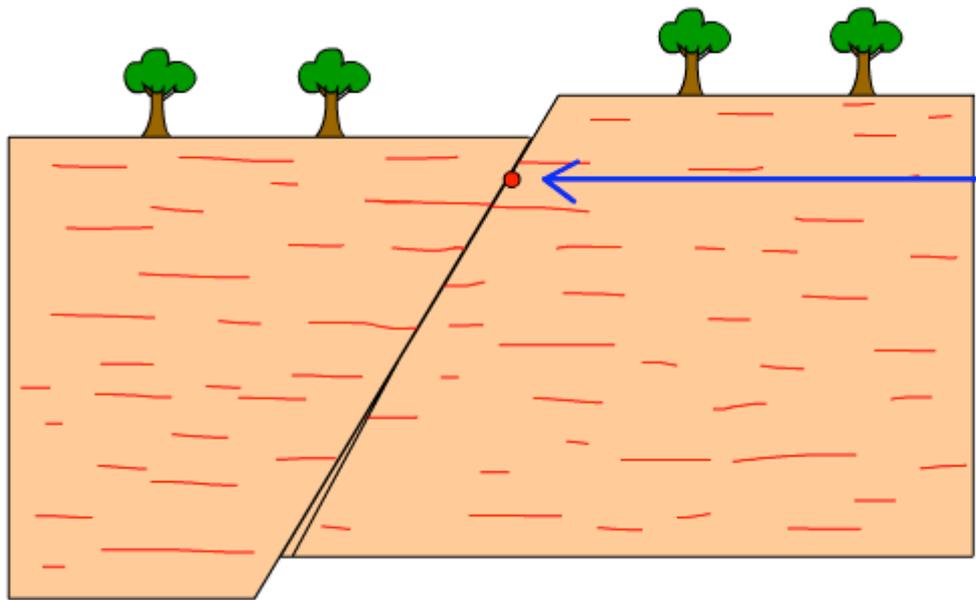
$$P = \rho \cdot g \cdot h \text{ (densidade x gravidade x altura)}$$

Pressão Dirigida ou Tectônica

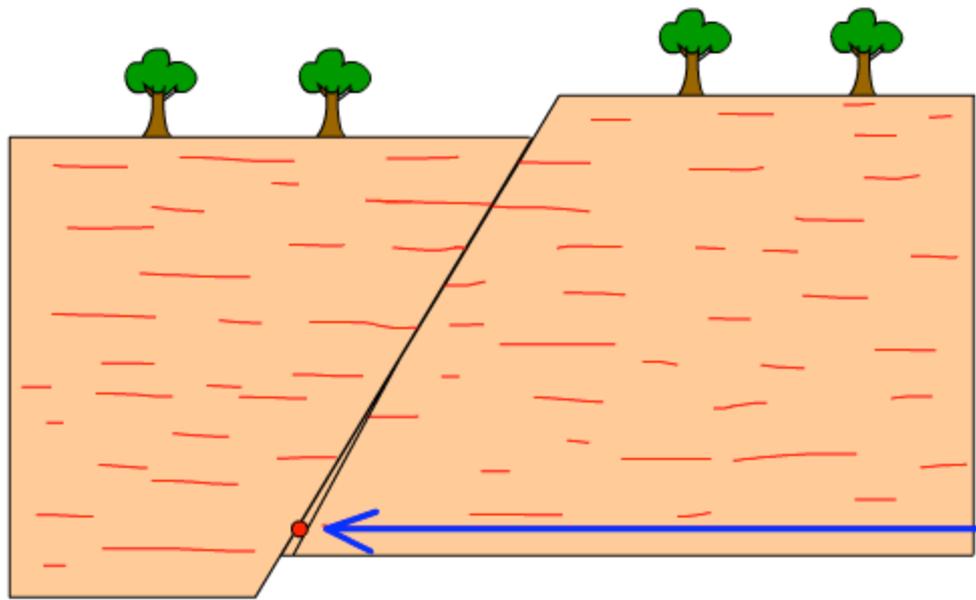
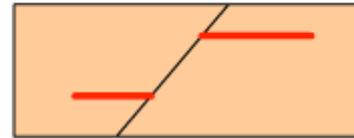


O estiramento é perpendicular à compressão tectônica.

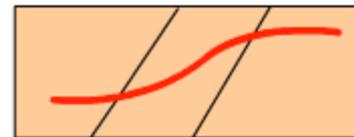




**Baixa temperatura
- falha**



**Temperatura
elevada
- zona de
cisalhamento**



Tipos principais de estruturas

- Algumas rochas apresentam foliação, dobra e lineação
- Outras rochas apresentam falhas e juntas (fraturas)

Exercício (opcional)

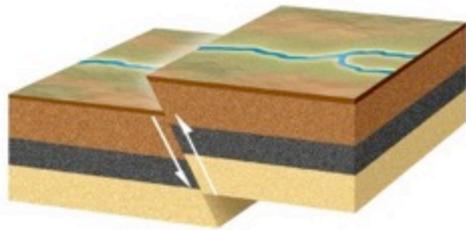
- Deformação de uma camada de rocha estratificada
 - uma caixa transparente com quinas retas
 - um papelão cortado da espessura exata da caixa
 - Material colorido em pó para simular camadas de rocha (café, farinha, areia, etc...)

Deformação rúptil

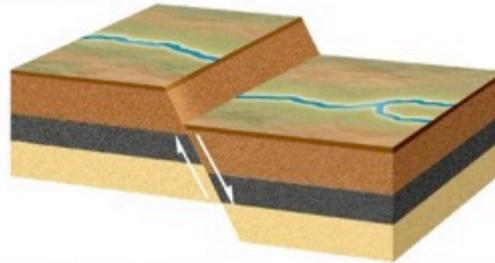
- A deformação rúptil é controlada por baixas pressões confinantes e baixas temperaturas
- Falhas e juntas são geradas nas rochas

Brittle materials change a little and then break suddenly.

Reverse faulting



Normal faulting



Strike-slip faulting

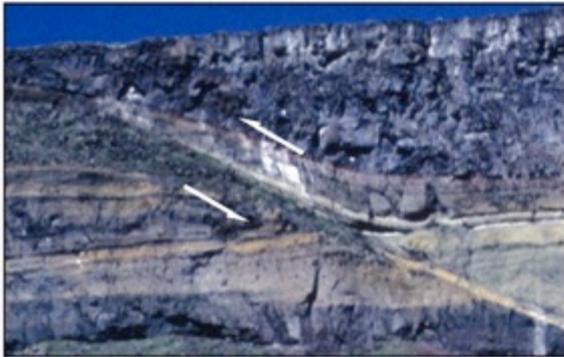
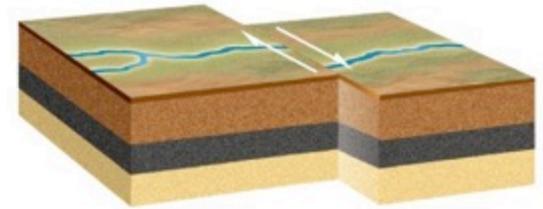


Fig. Story 11.6

Falhas

- As **falhas** são formadas por movimentos abruptos e são marcadas por **fraturas ao longo das quais ocorre movimento**
- O plano da falha separa o corpo rochoso em dois blocos principais, a **capa** e a **lapa**
- As falhas podem envolver pequenos movimentos, cujo **rejeito** varia entre poucos centímetros até centenas de quilômetros

Falhas

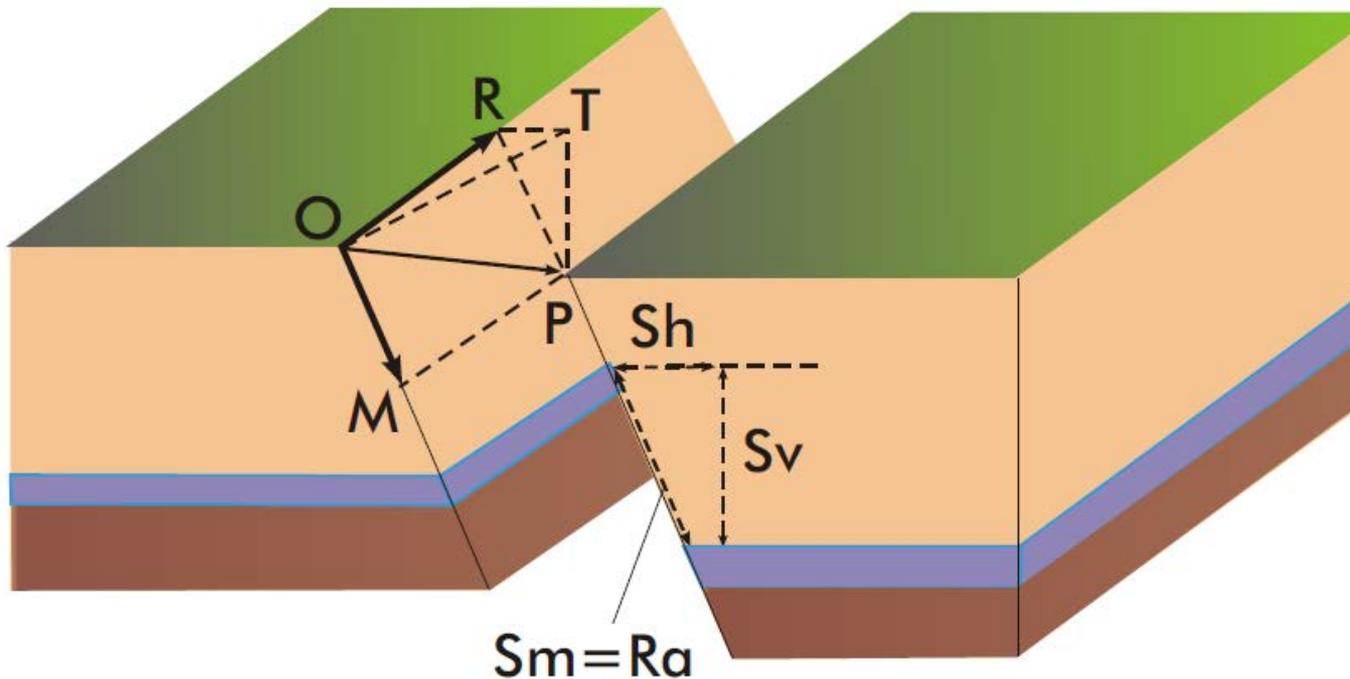
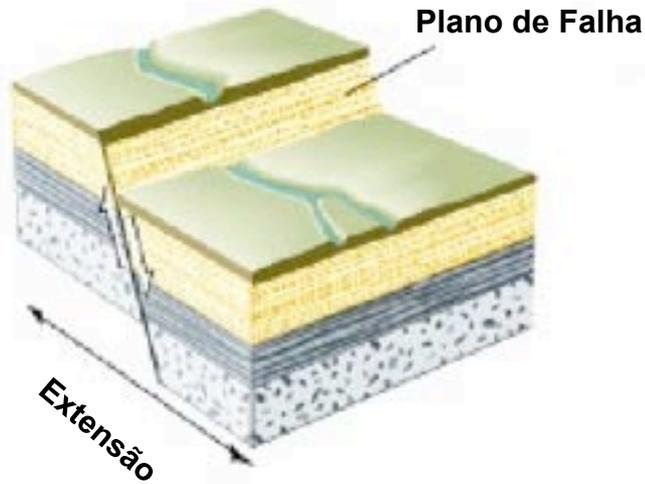


Fig. 19.26 Componentes do rejeito e separação de uma falha: OP=rejeito total, OR=MP=rejeito direcional, OM=RP=rejeito de mergulho, OT=rejeito horizontal, PT=rejeito vertical, Sh=separação horizontal, Sv=separação vertical, SmM=separação de mergulho, Ra=rejeito aparente.

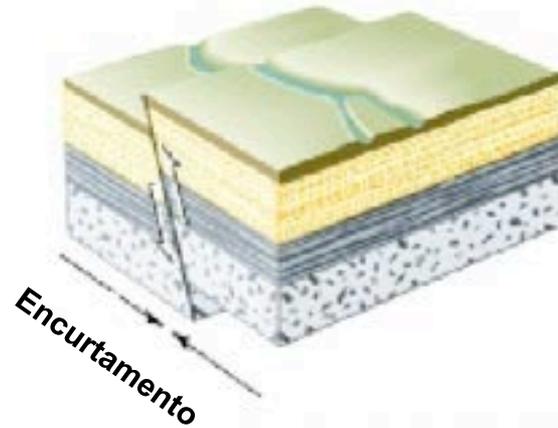


Tipos de Falhas

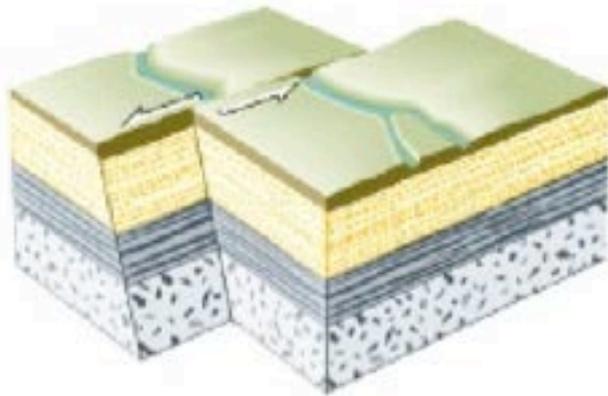
Falha Normal



Falha reversa



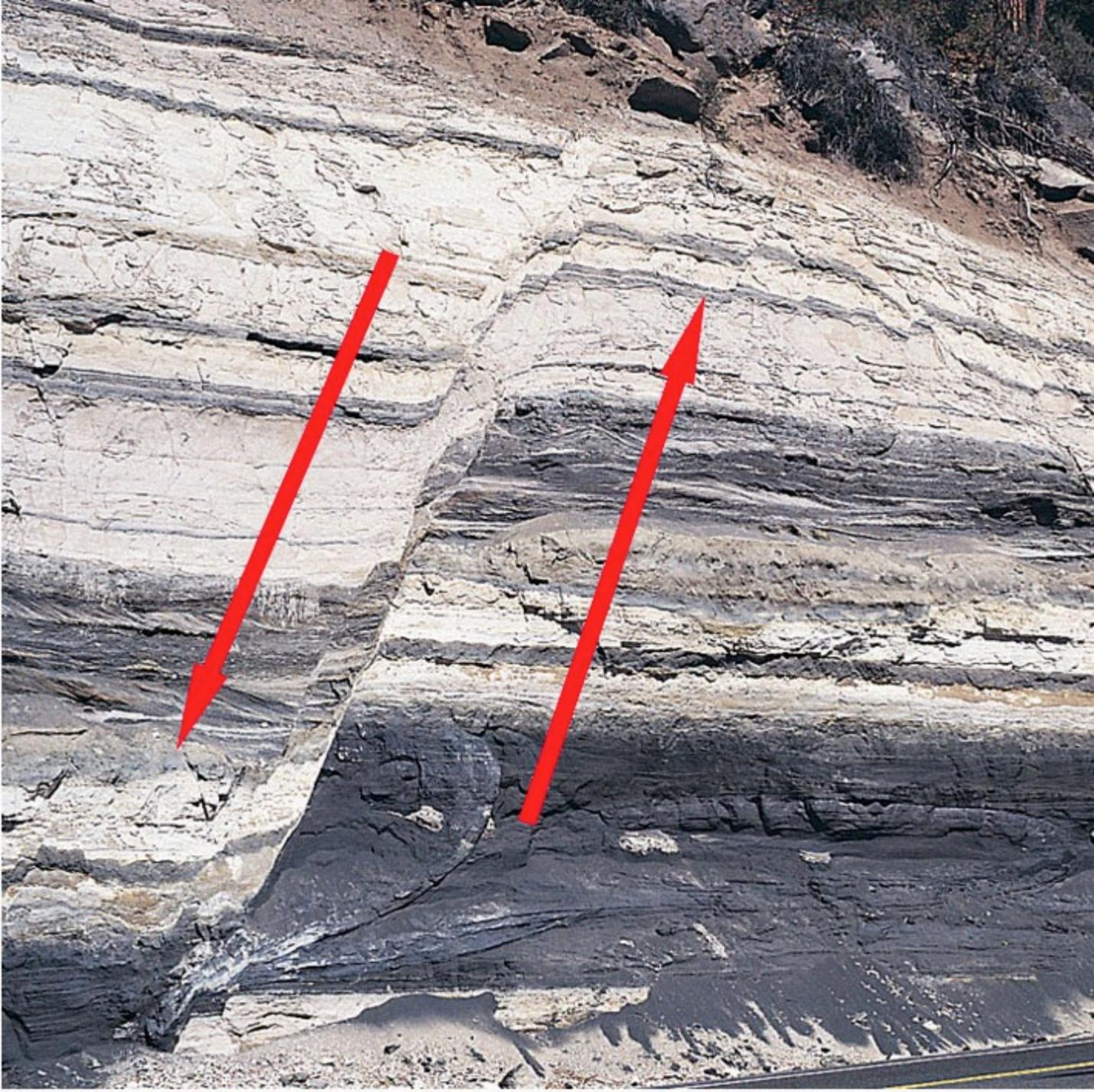
Falha Trancorrente



Falha Normal e Trancorrente



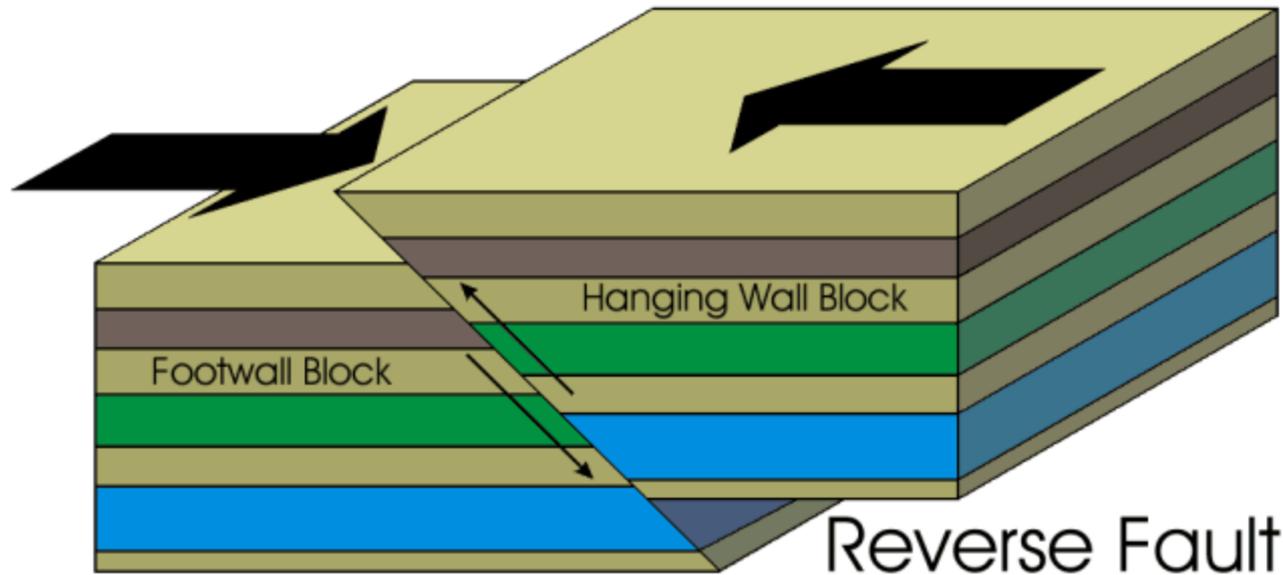
Falha normal

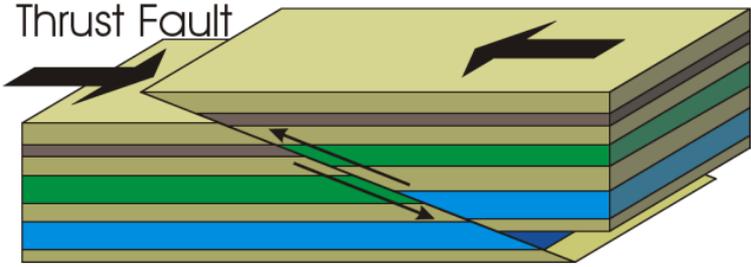


Falha reversa



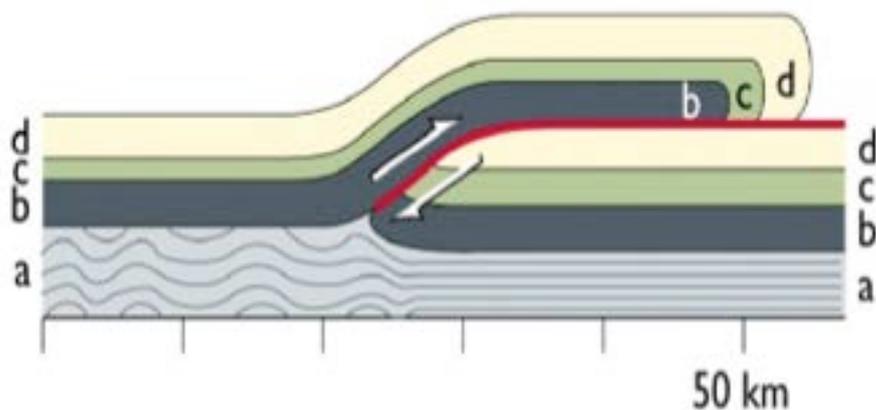
Reverse fault in Entrada Fm., Grand Staircase-Escalante National Monument, Utah





Falha de empurrão

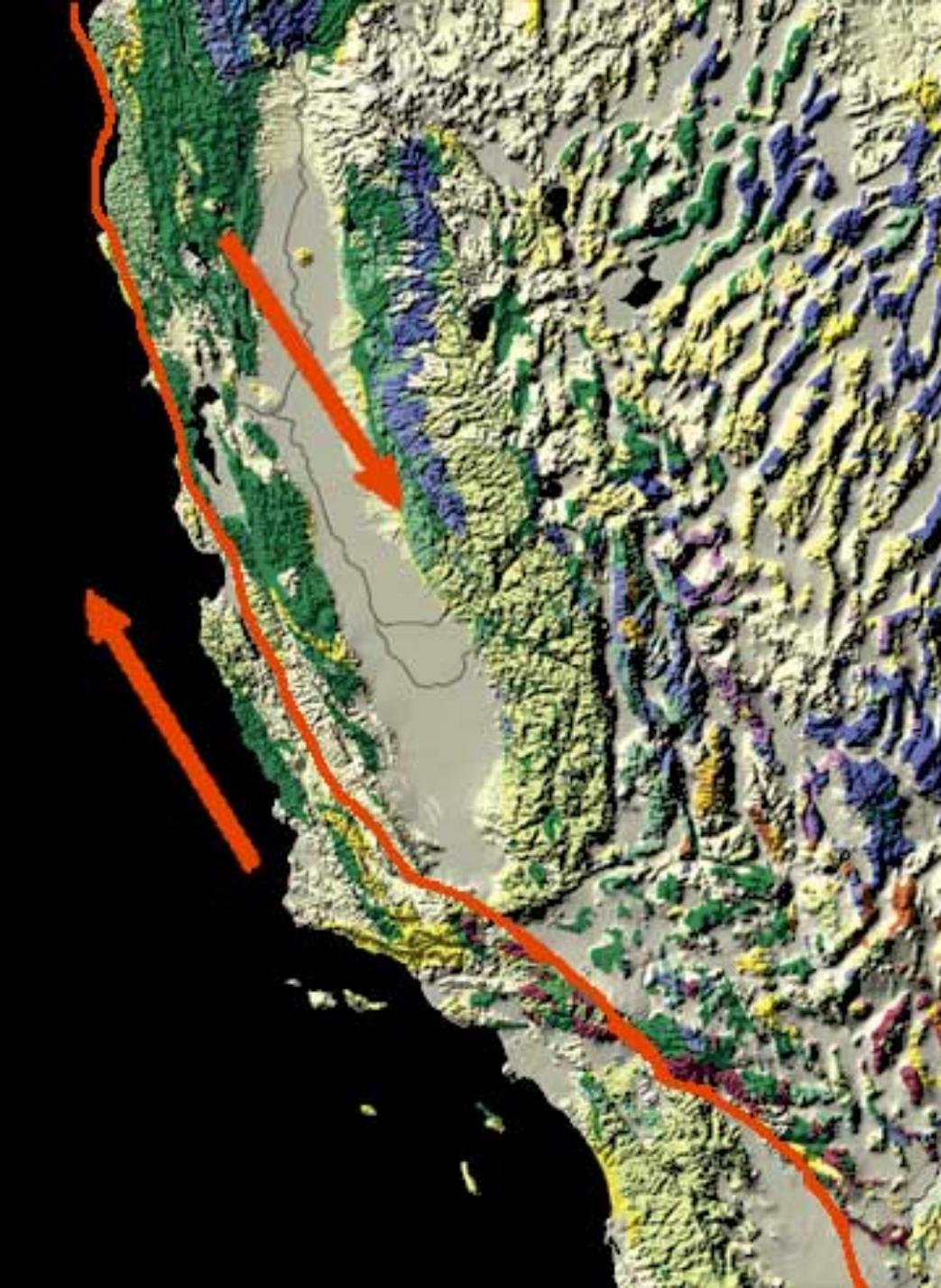
- Falha de empurrão ou cavalgamento é um tipo especial de falha reversa
- O plano de falha é de baixo ângulo e essas falhas podem envolver transportes de dezenas a centenas de quilômetros

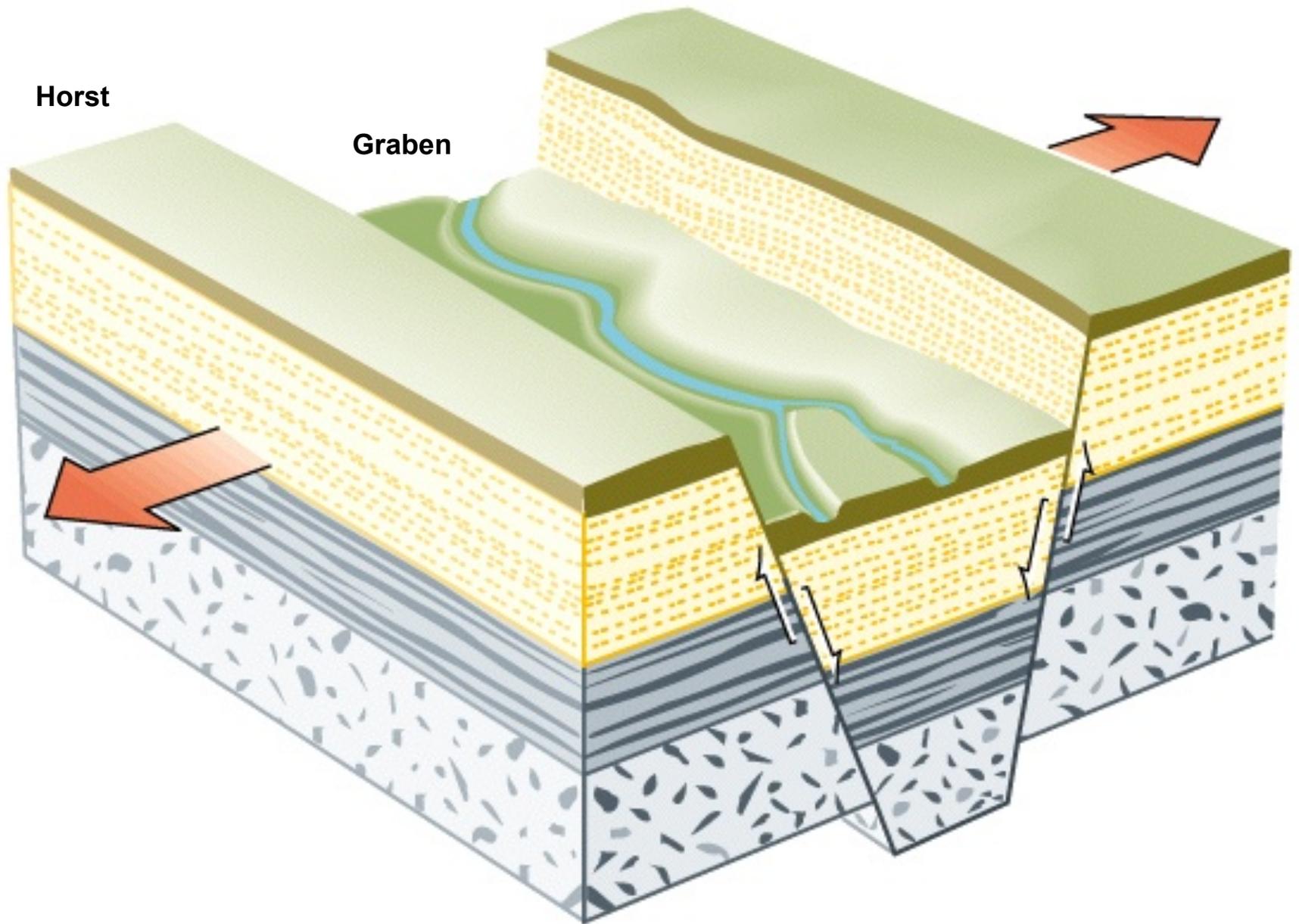


Thrust fault and nonconformity, Fountain Creek, Manitou Springs, Colorado



Falha transcorrente
Falha de San Andreas - Califórnia





Juntas

- Juntas: fraturas sem movimentação dos blocos
- Juntas conjugadas e de alívio de pressão



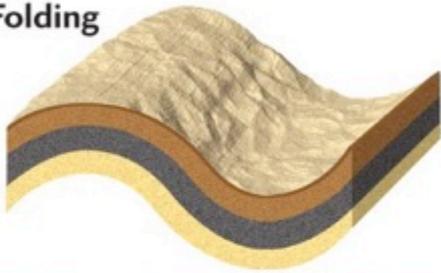
Deformação dúctil

- A deformação dúctil é controlada por altas pressões confinantes e altas temperaturas
- Foliação, dobras e lineação são geradas nas rochas

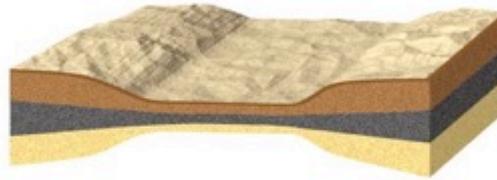


Ductile materials undergo smooth, continuous plastic deformation and do not spring back to their original shape when the deforming force is released.

Folding



Stretching



Shearing

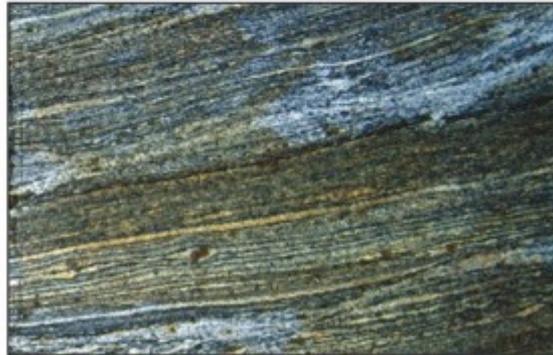
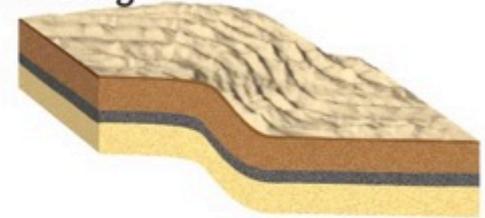


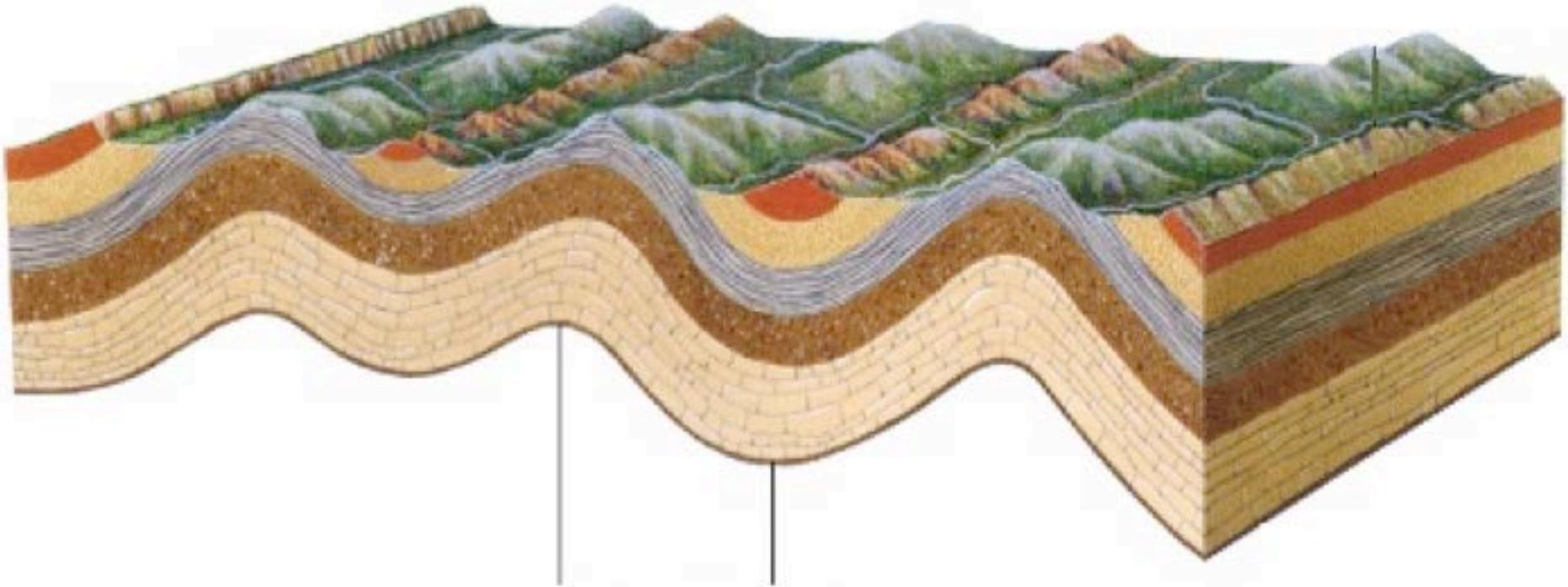
Fig. Story 11.6

Dobras

- Elementos geométricos da dobra: plano axial, eixo, flancos
- Tipos: simétrica, assimétrica, deitada, recumbente, isoclinal

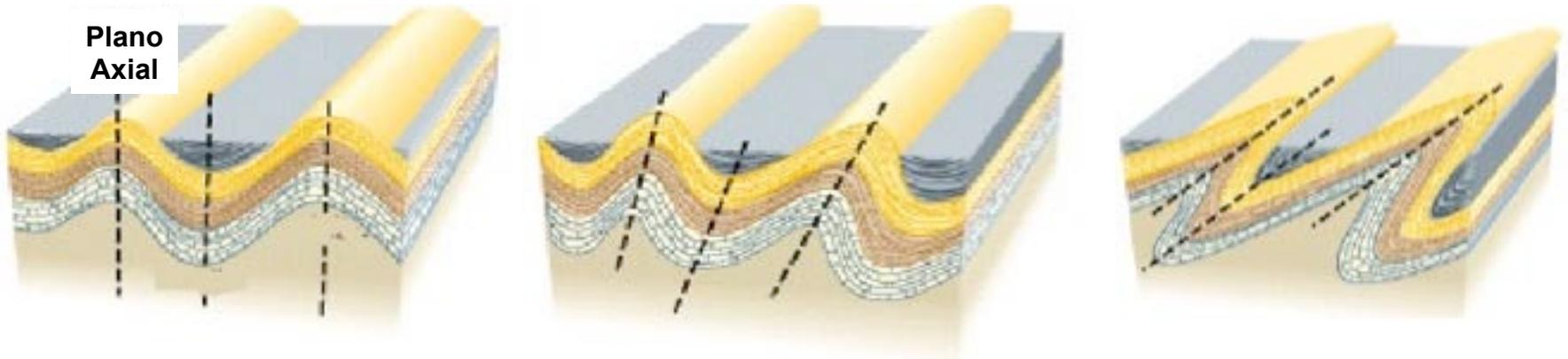


Dobra



Antiforma **Sinforma**

Tipos de Dobras

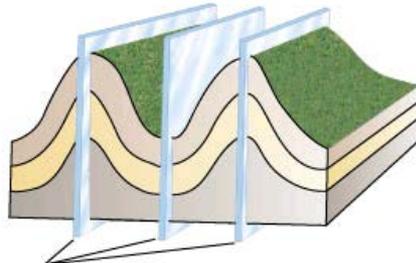


Tipos de dobras

Aberta

A Open (symmetrical)

Both limbs dip equally away from the axial plane.

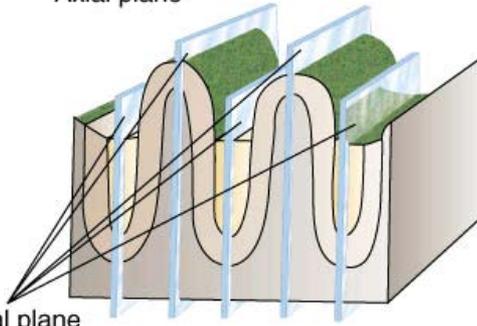


Axial plane

Isoclinal

B Isoclinal

Both limbs of any fold are parallel to each other, regardless of the dip of the axial plane.

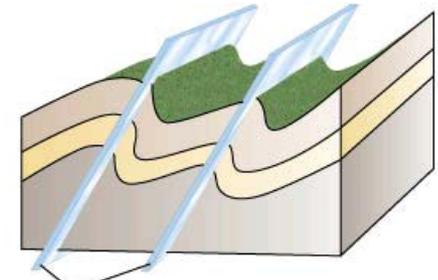


Axial plane

Assimétrica

C Asymmetrical

One limb of the fold dips more steeply than the other.

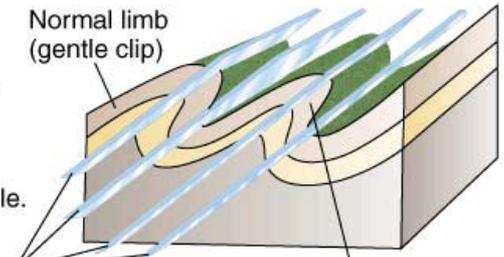


Axial plane

Inclinada

D Overturned

Strata in one limb have been tilted beyond the vertical. Both limbs dip in the same direction but not at the same angle.



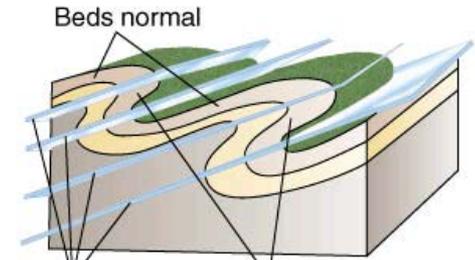
Axial plane

Overturned limb (steep clip)

Recumbente

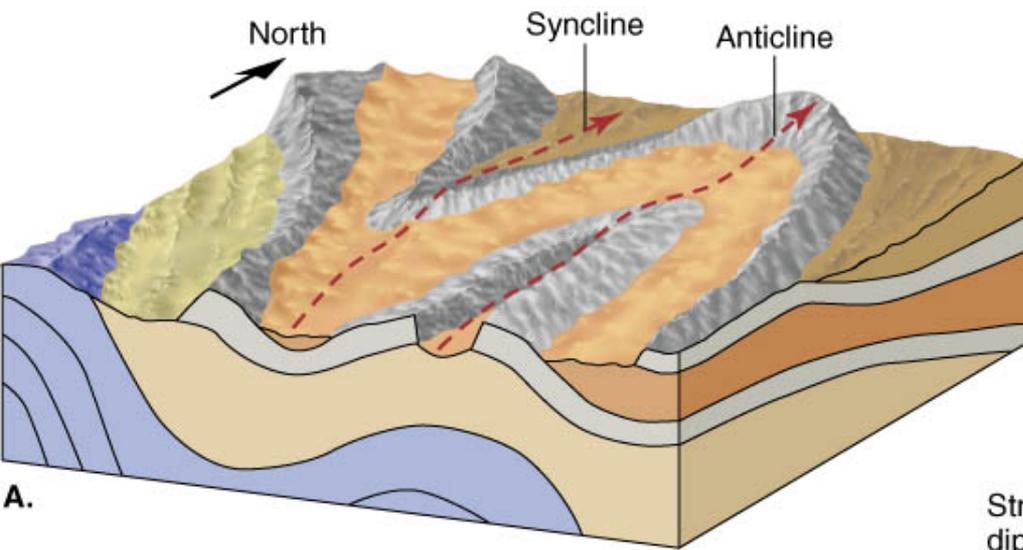
E Recumbent

Axial planes are horizontal or nearly so. Strata on the lower limb of anticline and upper limb of syncline are upside down.

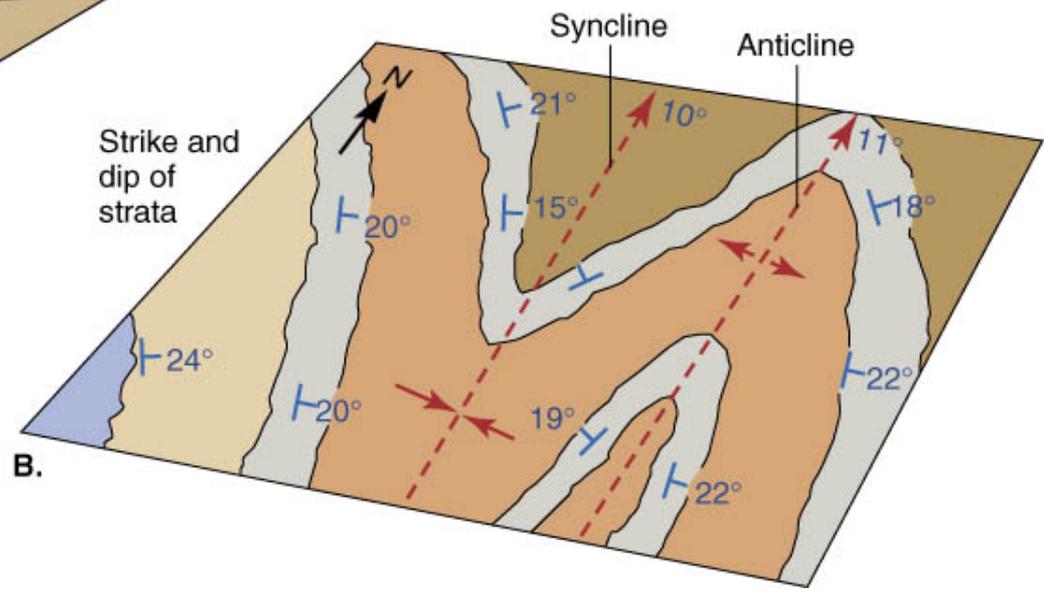
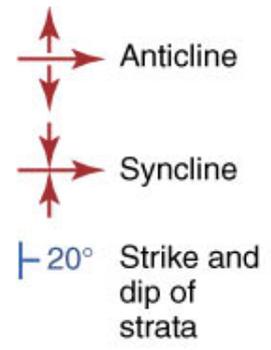


Axial plane

Beds inverted



A.



B.

Figure 9.25

Exemplos de falhas e dobras no Google Earth