

NEOTECTÔNICA E MORFOTECTÔNICA

Aula 2

DEFORMAÇÃO DA CROSTA

Prof. Eduardo Salamuni

DEFORMAÇÃO DA CROSTA

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).

Movimentos 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.

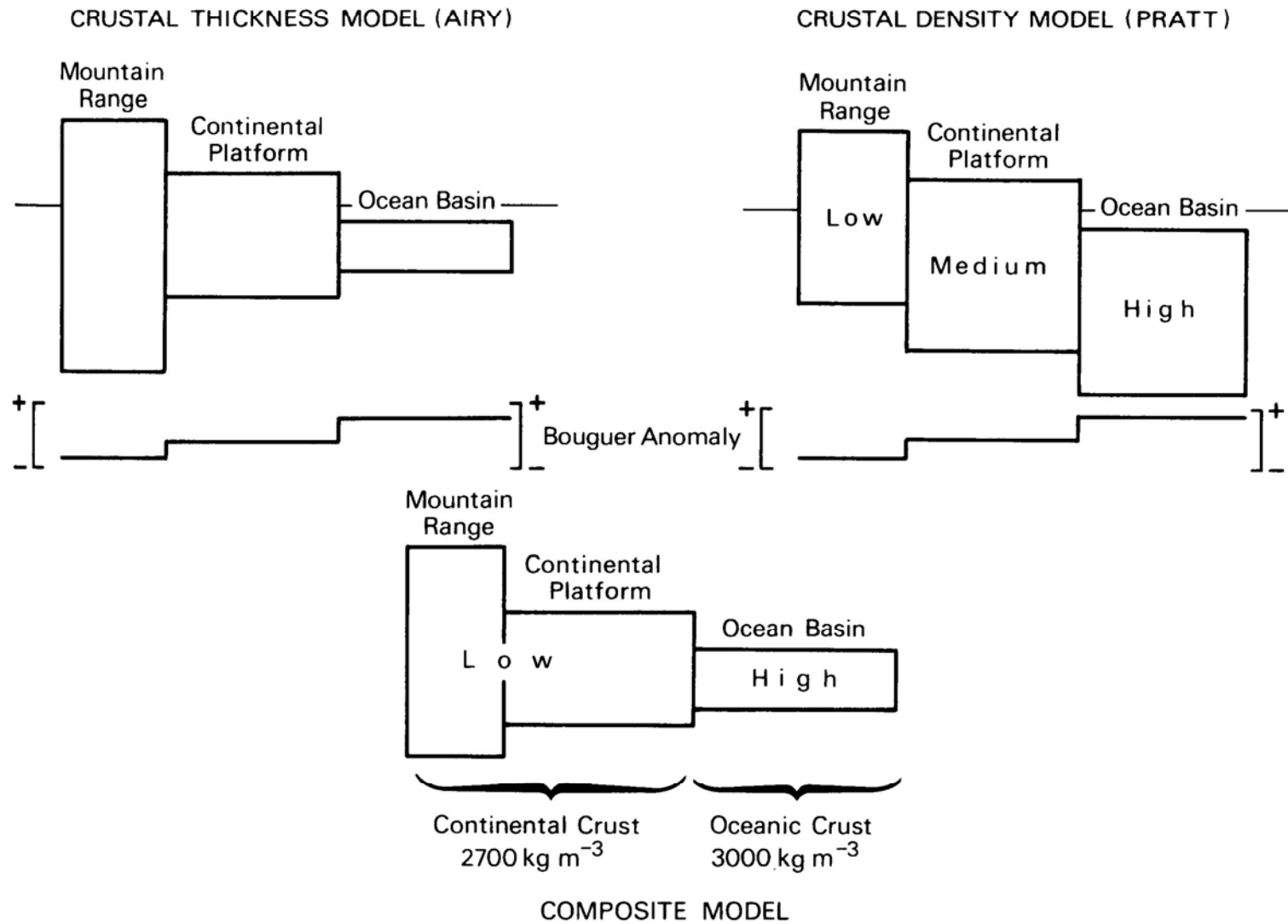
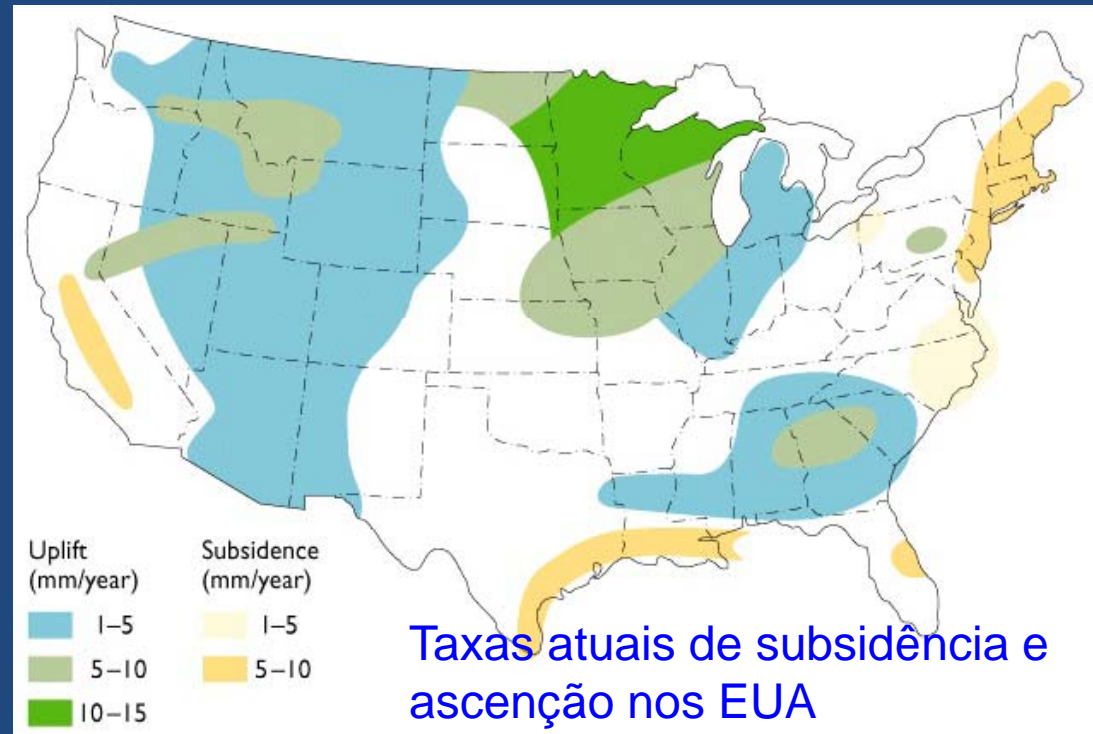


Fig. 2.9 A schematic representation of three models of isostatic equilibrium. Although differences in the density and thickness of the crust are illustrated, the lithosphere as a whole is involved in isostatic compensation.

Movimentos Regionais

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

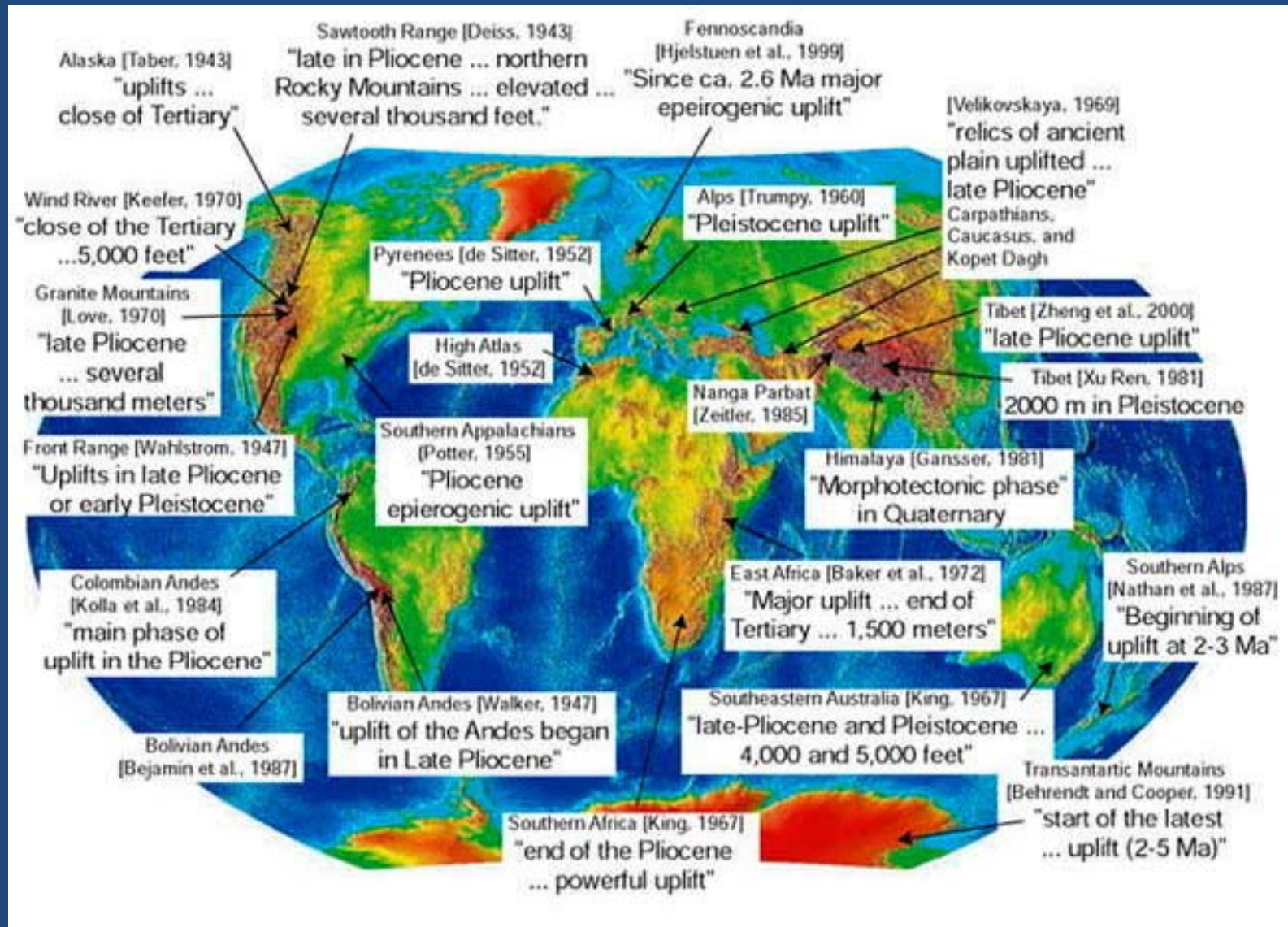


Orogênese ⇒ conjunto de fenômenos que levam à formação de cadeias de montanhas, produzidas pelo diastrofismo (falhas e ou dobras) em zonas de subducção.

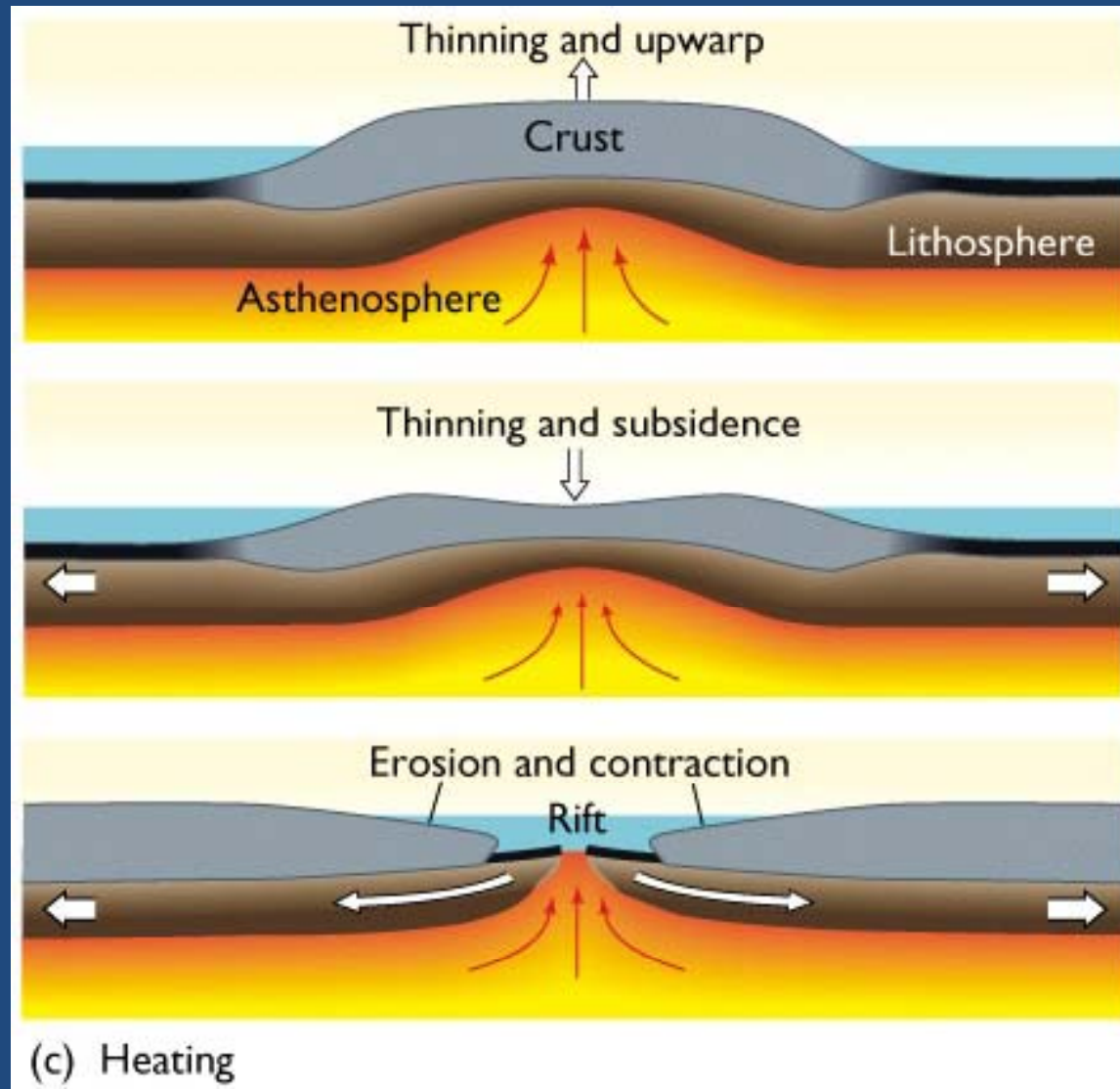


Praias geradas devido a movimento isostático

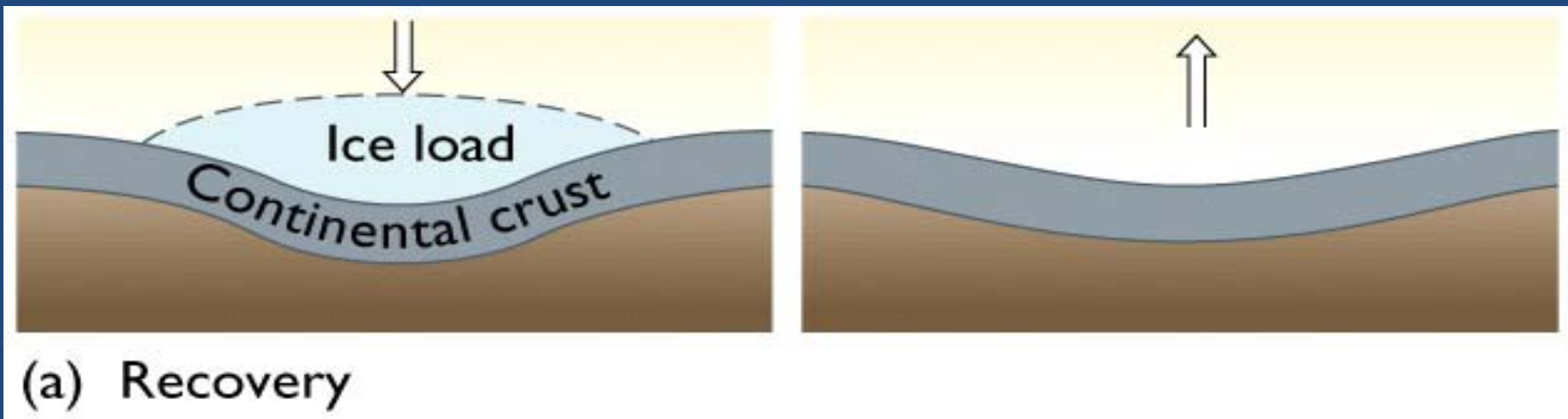
Movimentos ascensionais atuais da crosta, em geral estão ligados a movimentos tectônicos a partir do meio do Neógeno (cerca de 10 ma.) caracterizando fase neotectônica.



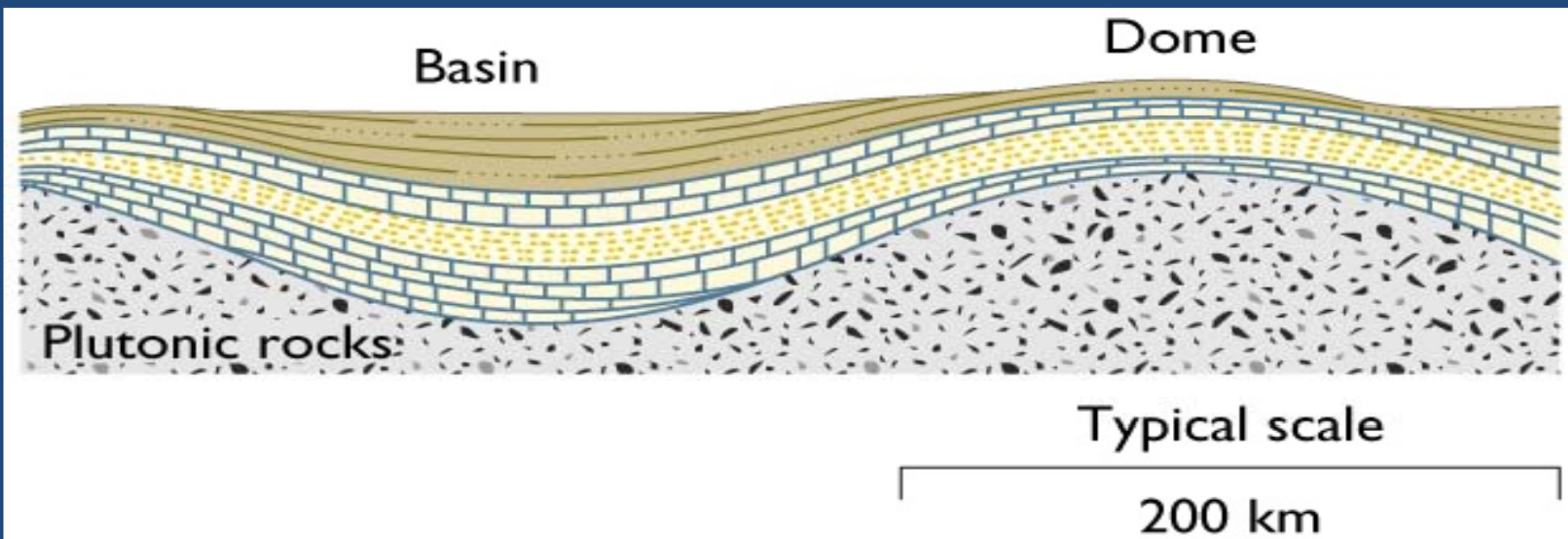
A ascensão da crosta, pode ser causada por levantamento da pluma mantélica, enquanto sua e subsidência em geral é causada por extensão e resfriamento.

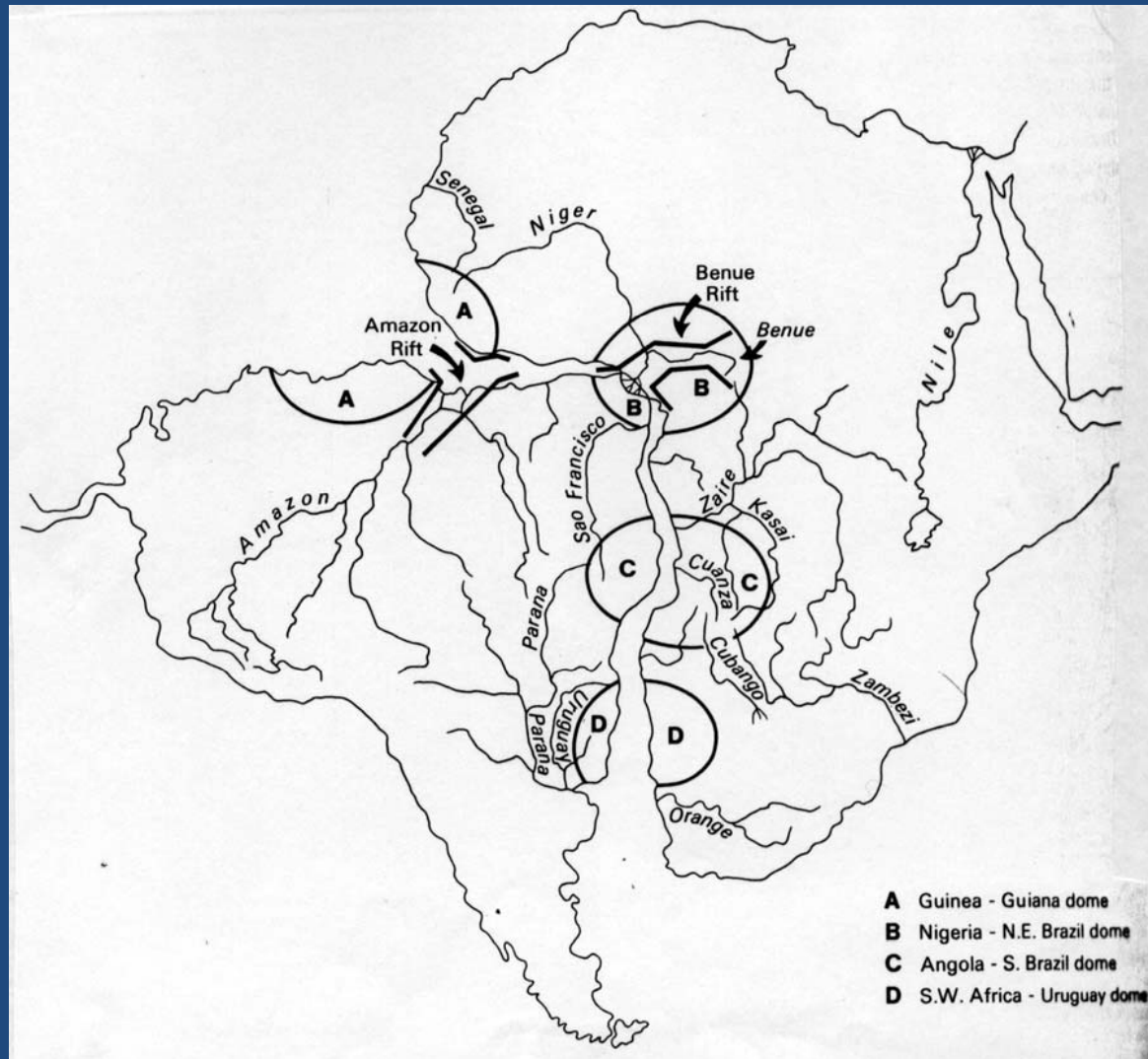


A ascensão pode ser causada também pela remoção de capa de gelo

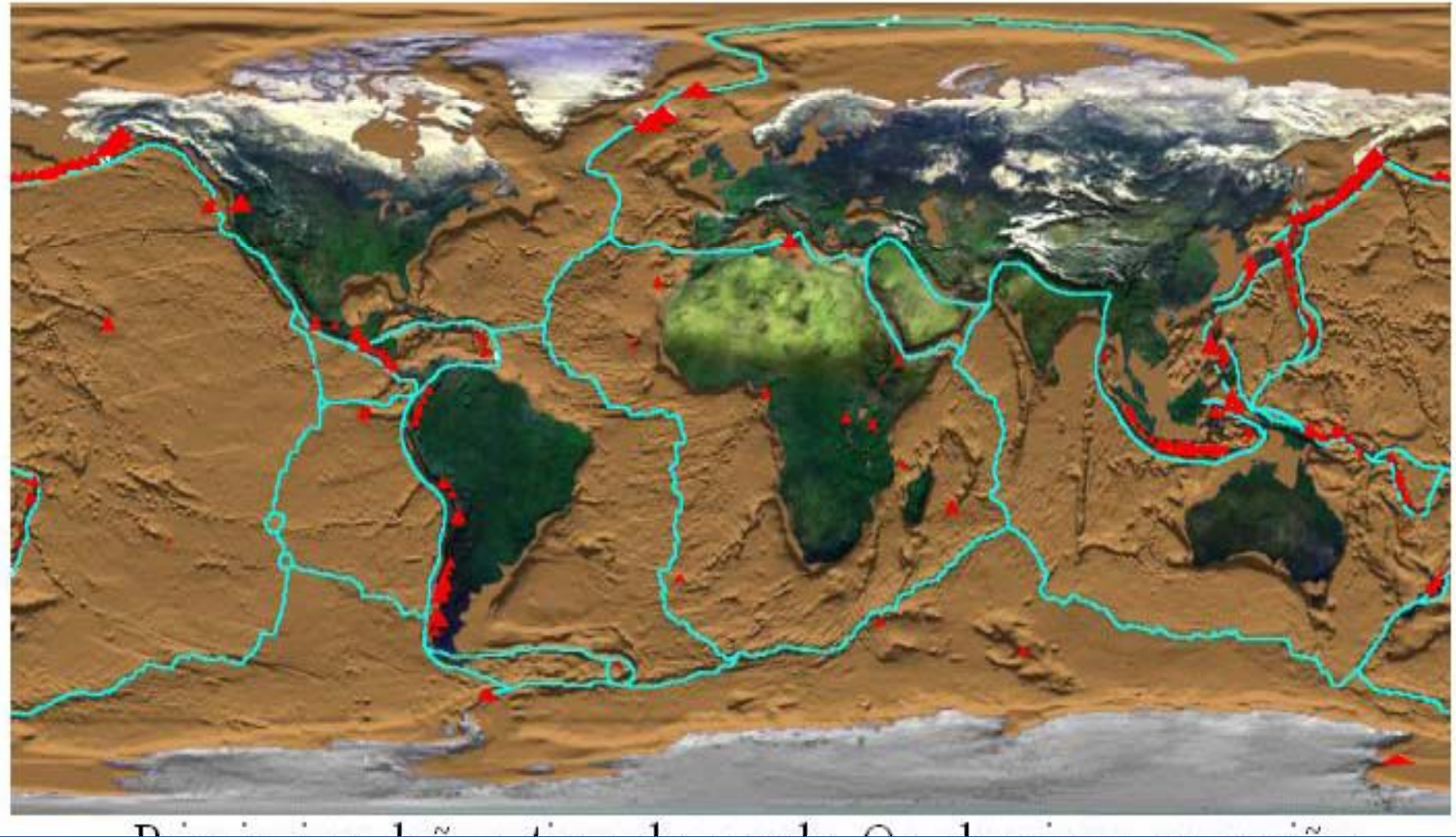


Seção esquemática em áreas com domos e bacias





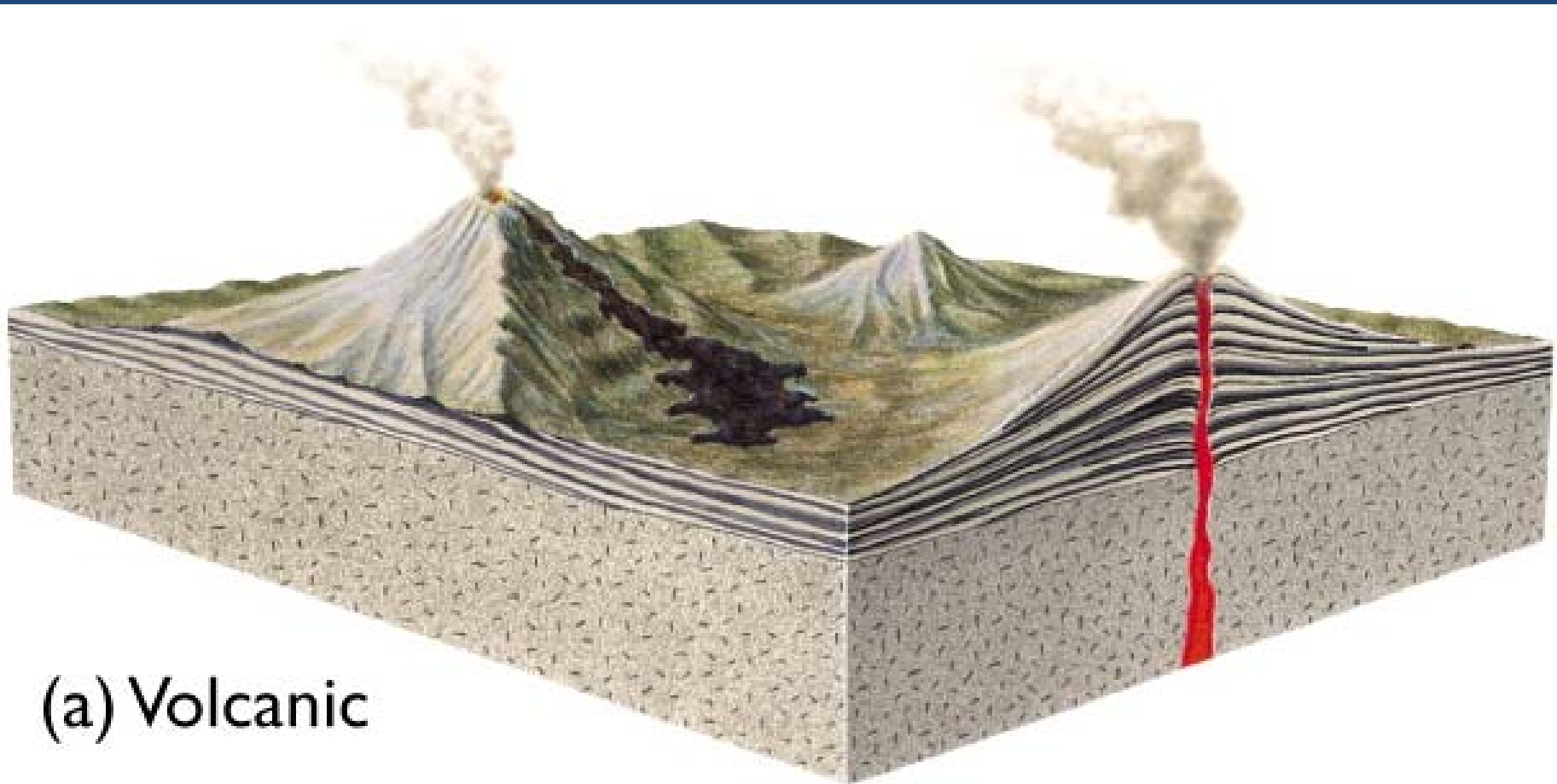
Plumas mantélicas atuais podem gerar domos que, na superfície, controlam grandes bacia de drenagem, gerando-as ou as reorientando. O padrão de drenagem, neste caso, é um indício da existência de tais plumas



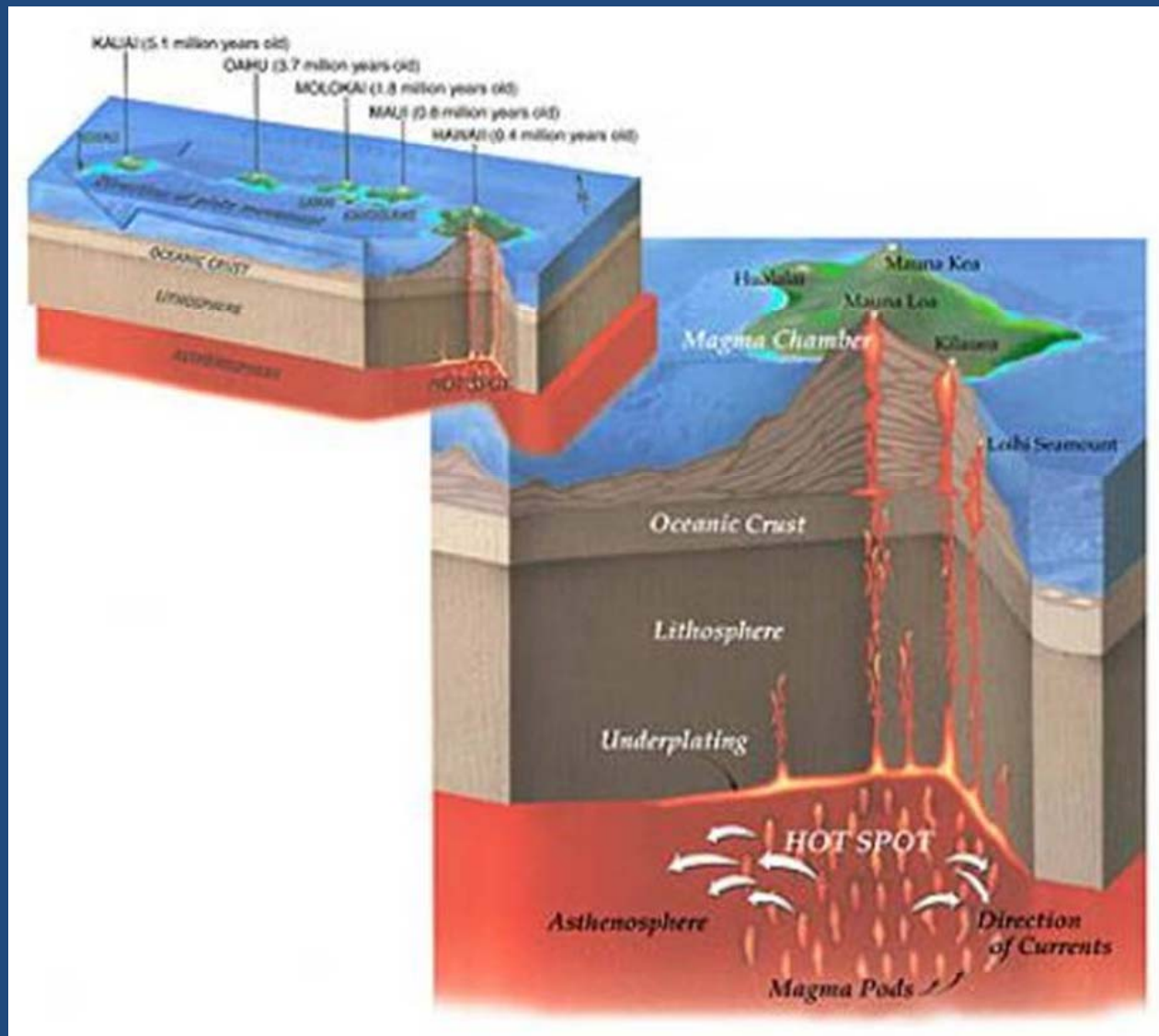
Principais vulcões ativos no mundo, que representam, cada um, pequena área de deformação da crosta, com mudança morfoestrutural local, ou seja, tanto do ponto de vista geomorfológico quanto estrutural.

Deformação de origem vulcânica (ex. Cascadians)

A elevação do edifício orogenético se dá em boa parte pela ascensão de cones vulcânicos sendo o mesmo processo de orogênese ao longo da cadeia como um todo.

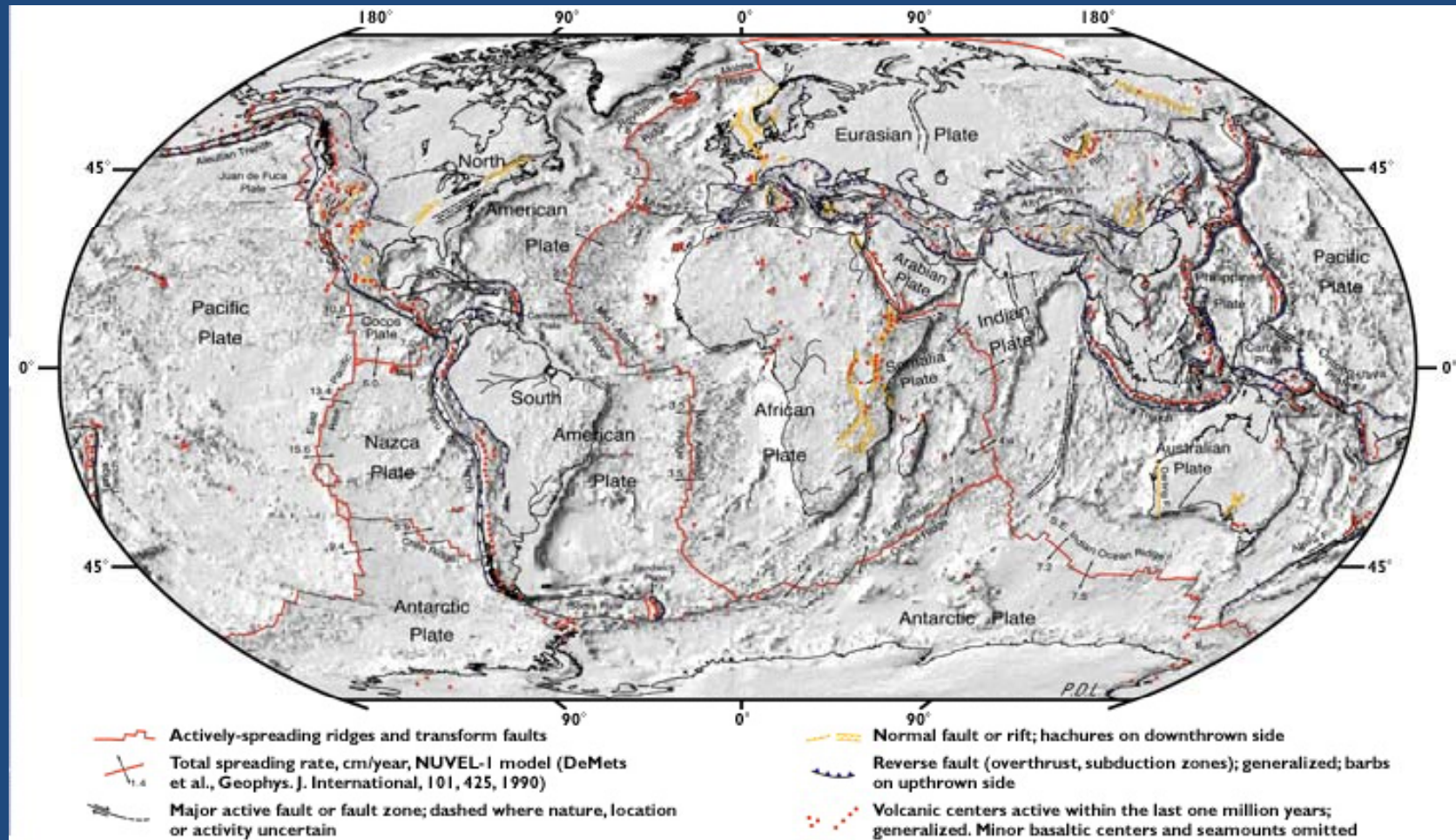


(a) Volcanic



A deformação na crosta oceânica pode ser gerada a partir da formação de ilhas devido à ascensão mantélica em locais onde há hot-spots ou onde estão ou estiveram presentes correntes de convecção.

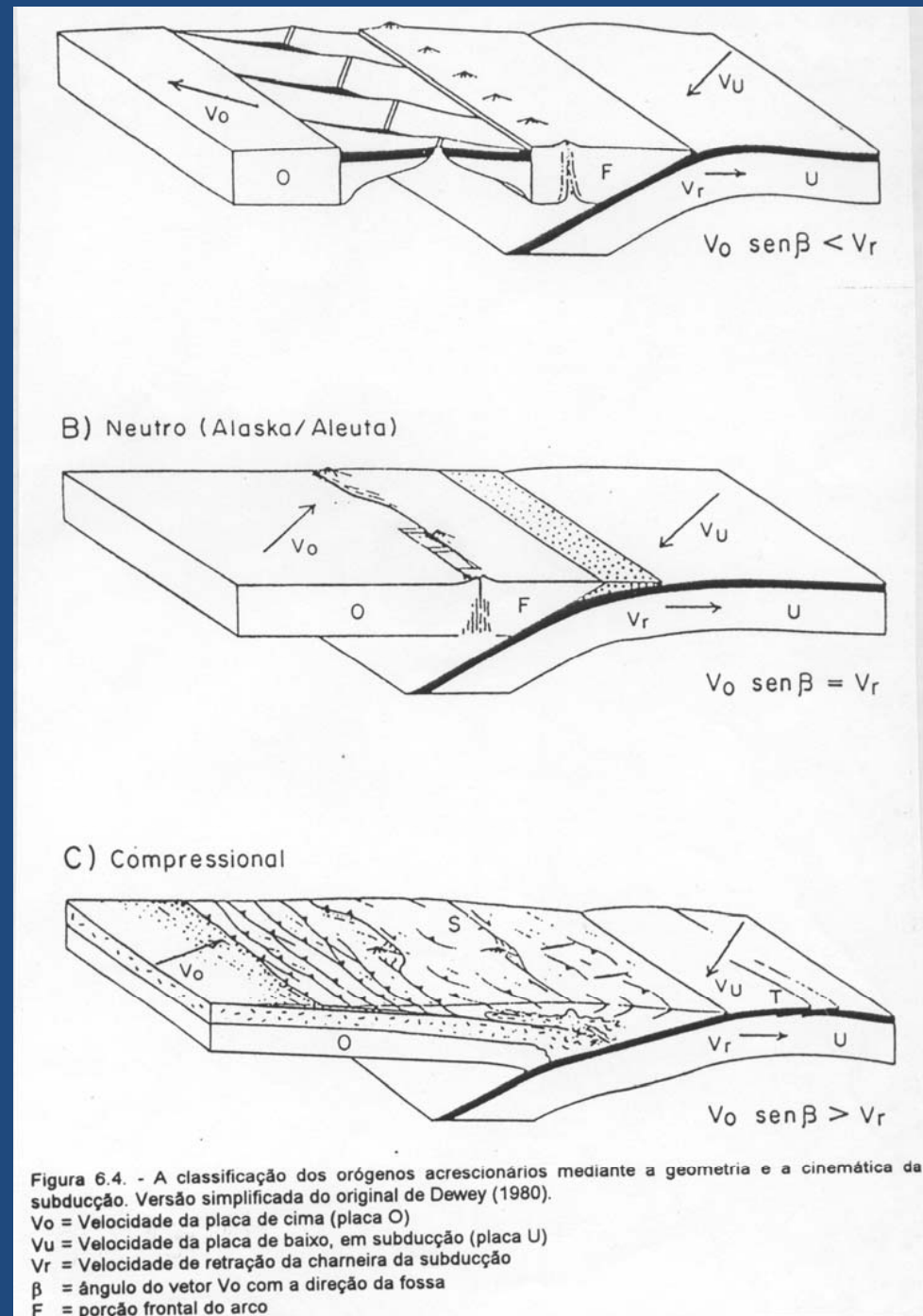
Estruturas tectônicas e deformação na crosta (continental e oceânica)



http://www.juntadeandalucia.es/averroes/manuales/tectonica_animada/tectonanim.htm

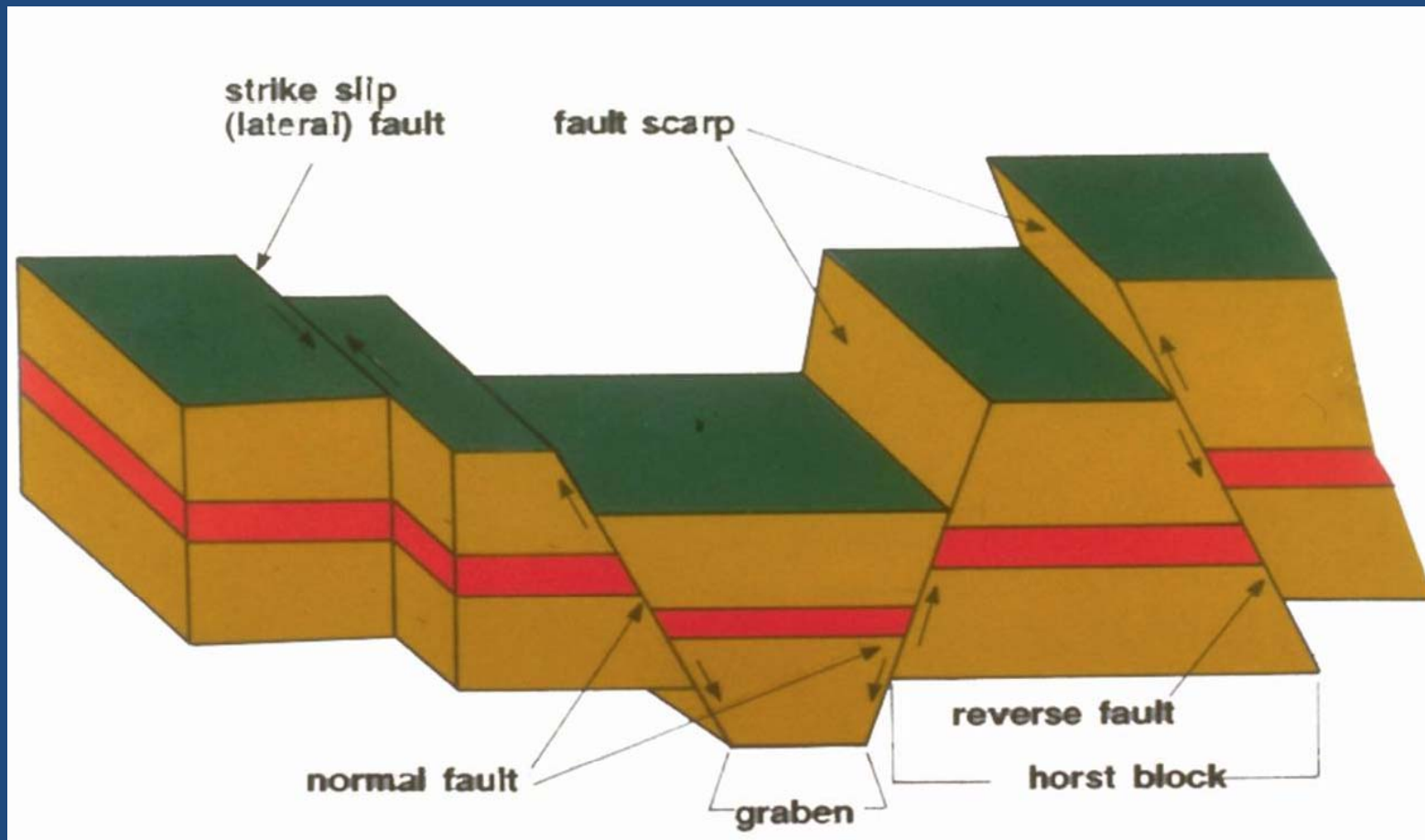
Sistemas de deformação em bordas das placas:

- (a) sistema extensional, onde se cria crosta a partir de um processo de rifteamento e geração de placa por meio da intrusão de magma mantélico tipo MORB;
- (b) Sistema neutro: neste caso há falhas do tipo transformante. Não há criação nem destruição de crosta, mas as falhas seccionam e deformam a crosta oceânica;
- (c) Sistema compressional: tanto a crosta oceânica e, principalmente a continental são afetada ou por sua destruição no primeiro caso quanto no processo de dobramento e falhamento (inverso, cavalgante) no segundo caso.

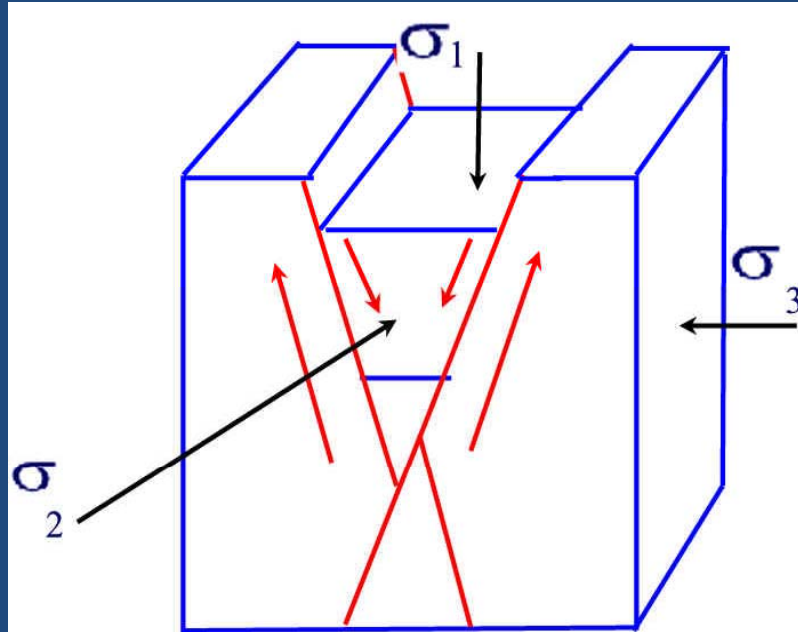


DEFORMAÇÃO POR FALHAS

Há três tipos fundamentais de falhas: normais, inversas e direcionais (transcorrentes na crosta continental e transformantes na crosta oceânica).



FALHAS NORMAIS

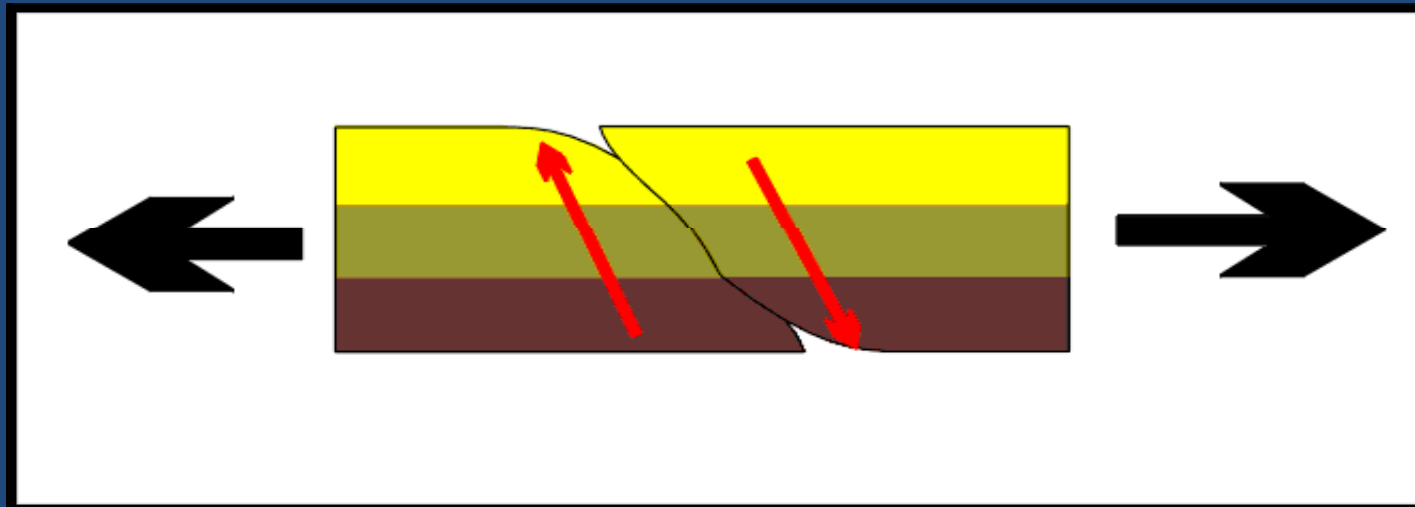


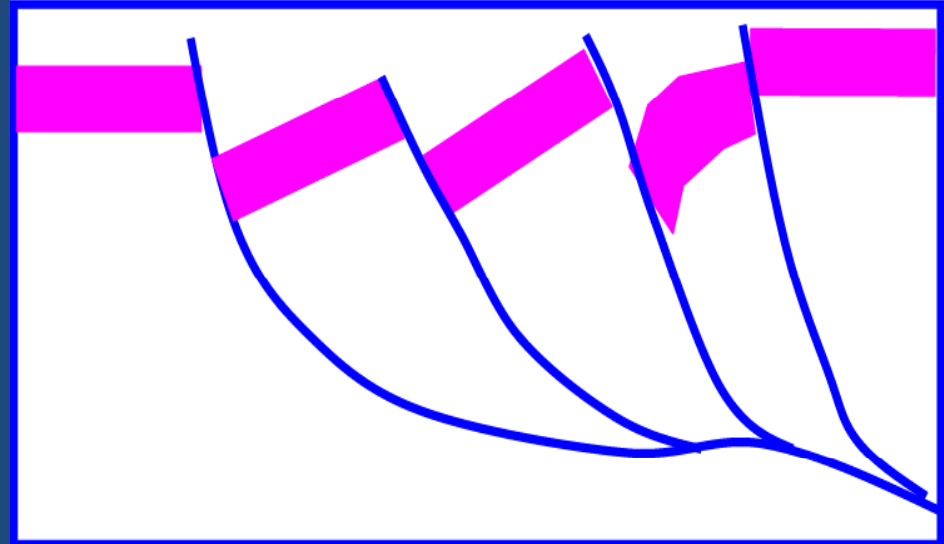
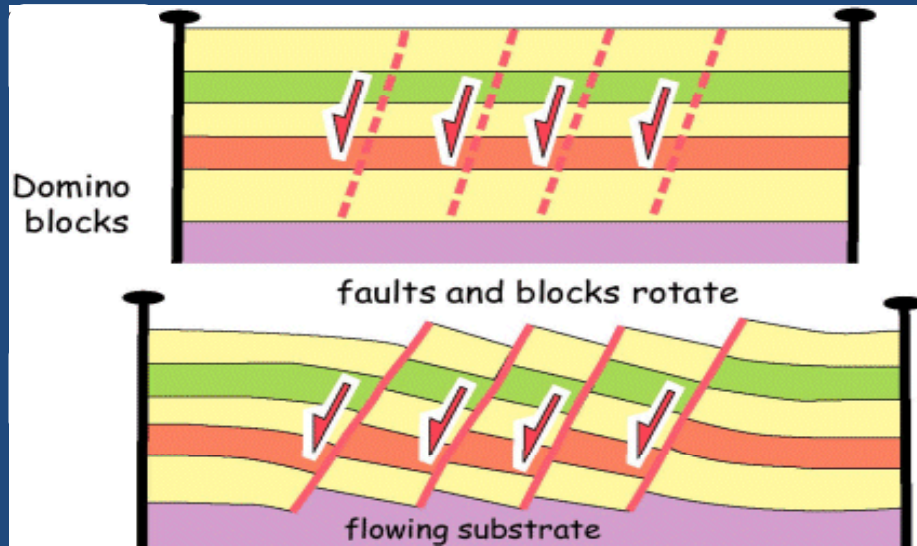
Posição dos eixos de tensão: σ_1 na vertical; σ_2 e σ_3 na horizontal

<http://www.uwsp.edu/geo/faculty/hefferan>



Falhas normais: mecanismo de extensão



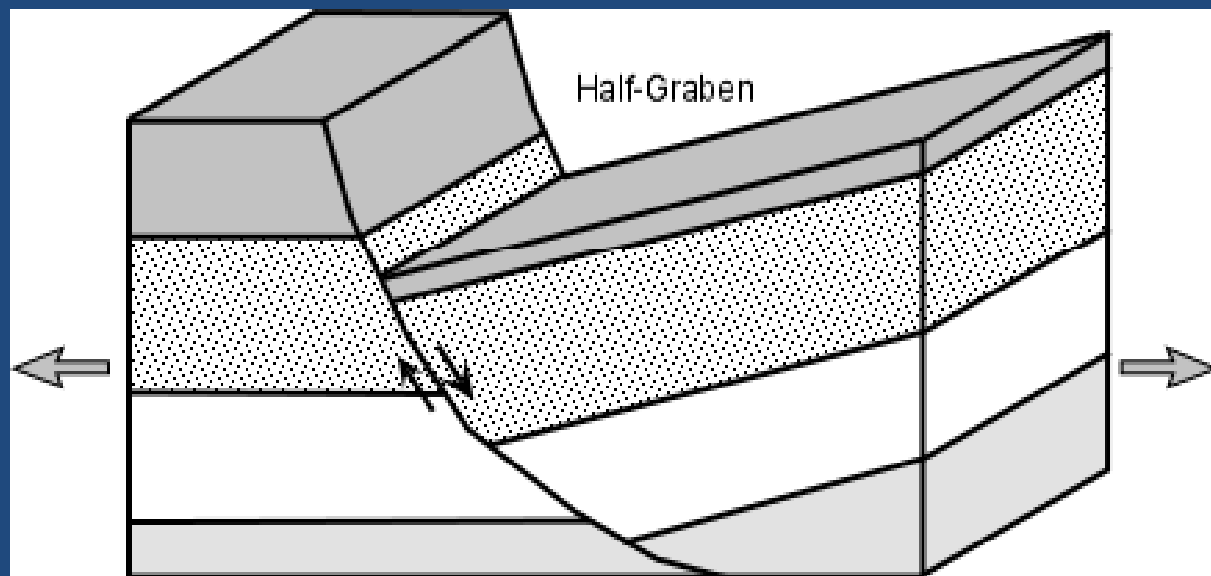
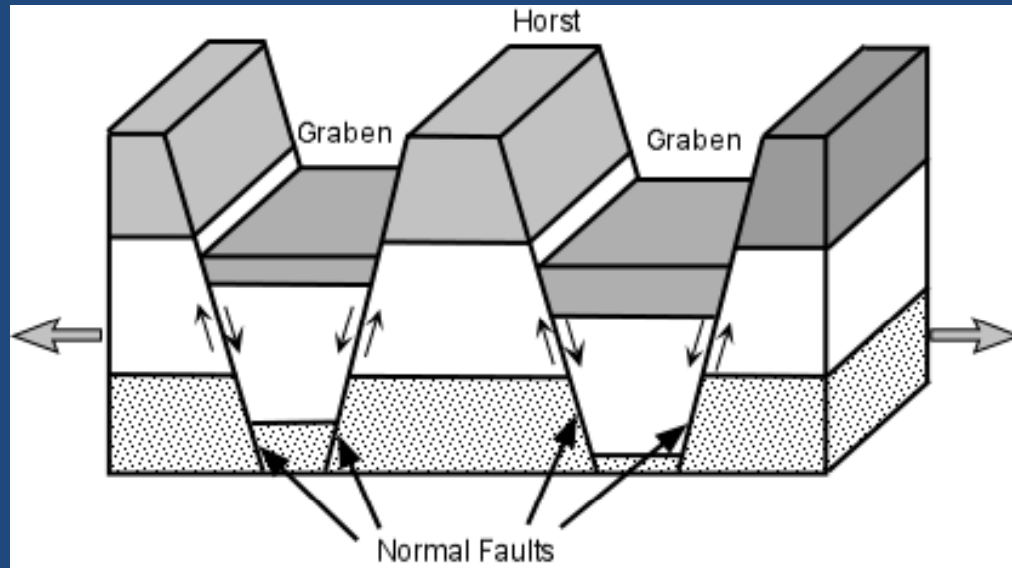


<http://www.uwsp.edu/geo/faculty>

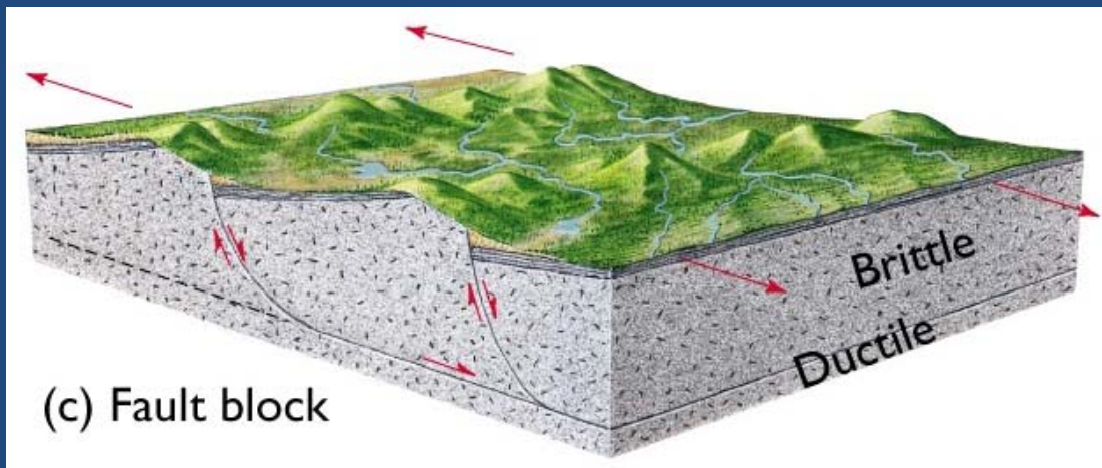


Tipos de falhas normais:
falhas em dominó e
lístricas, cujo desenho do
perfil é sugestiva de falhas
típicas de formação de
depressões importantes
na crosta.

Grabens, horstes e hemi-grabens são típicas estruturas regionais desenvolvidas em sistemas extensionais, que incluem falhas normais.

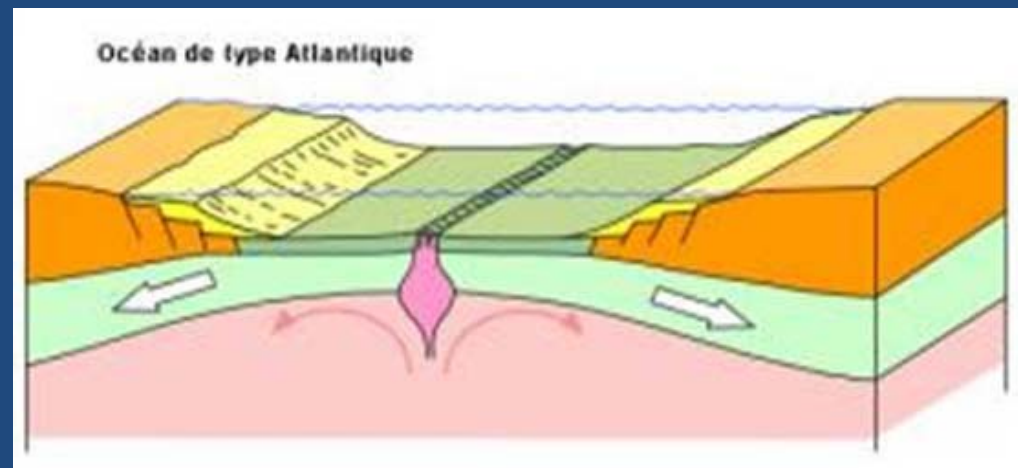
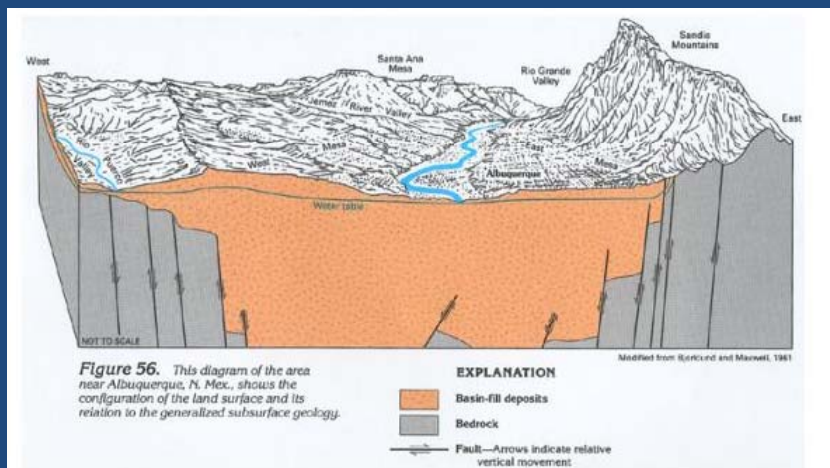


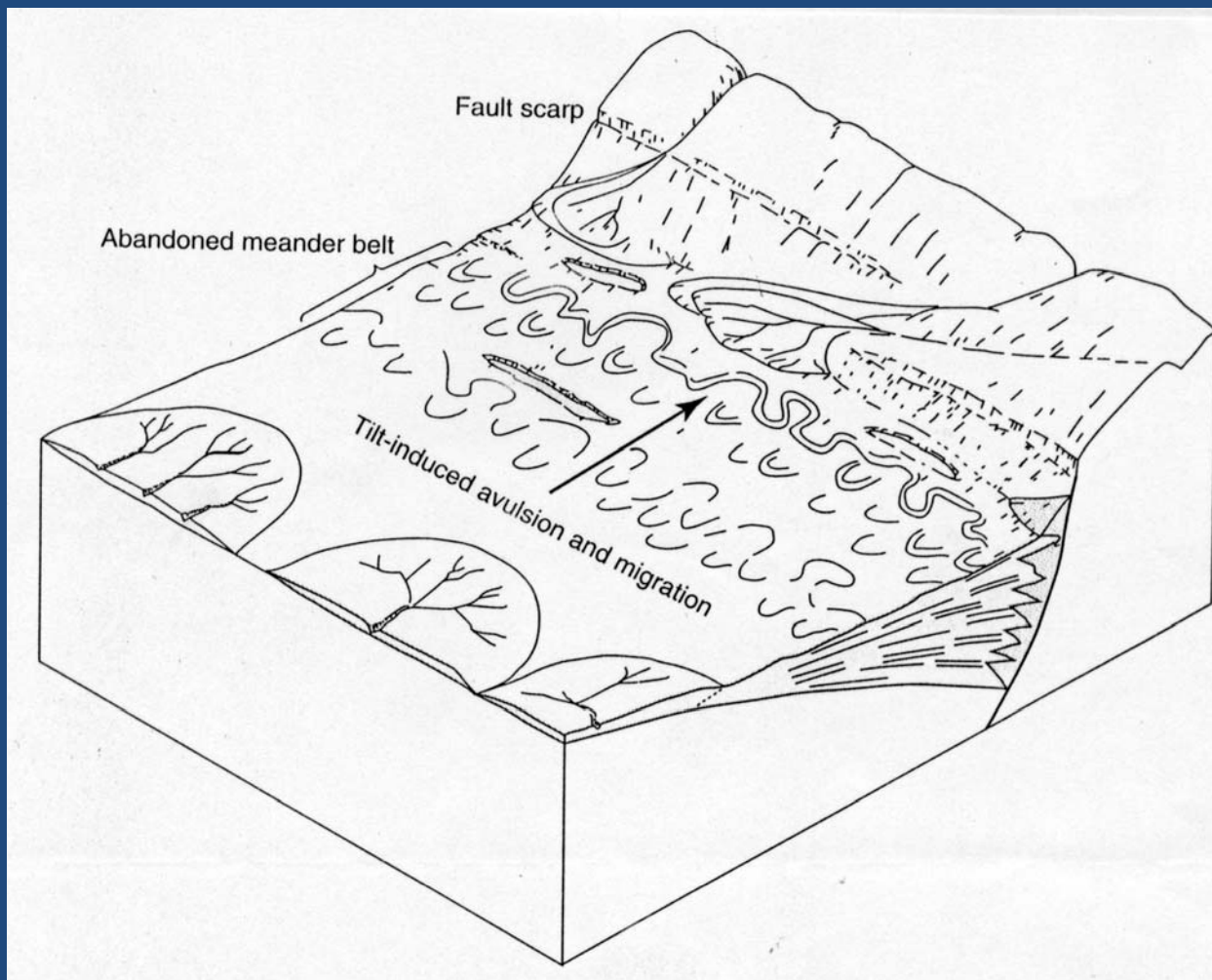
Falhas normais regionais geram grandes estruturas de alívio, provocando aberturas na crosta que são preenchidas por sedimentos e/ou por rochas ígneas, em geral básicas a intermediárias.



(c) Fault block

Morfologia típica da província “basin and range” no oeste americano



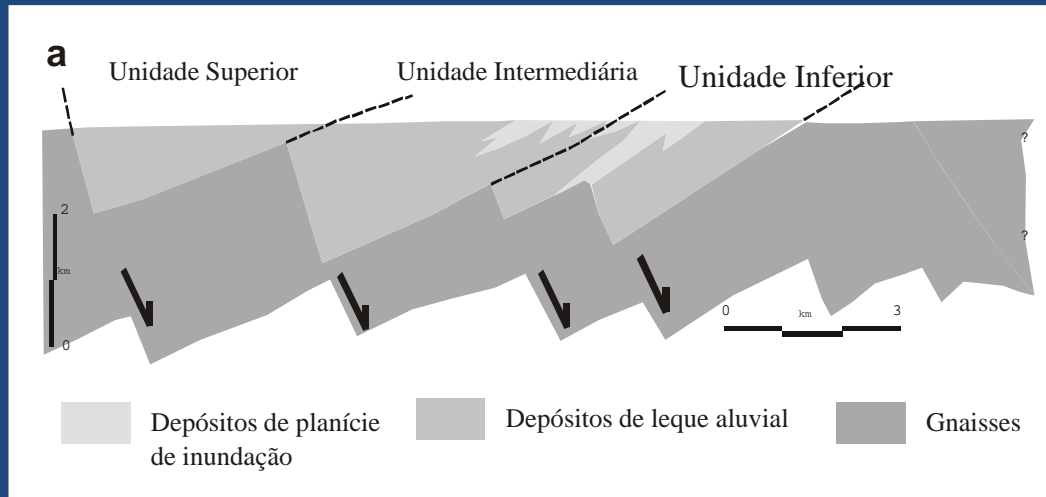


Em hemi-grabens, quando ativos é possível que canais de drenagens longitudinais migrem para a porção inferior do bloco basculado. Este aspecto constitui-se uma importante anomalia de drenagem

Fonte: Leeder e Gawthorpe (1987)

Morfoestruturas associadas a falhas normais: Escarpa de falha normal nos Andes. Milonitos gnaisses, representando a exposição do núcleo do embasamento. (Foto: Glenn Wallace)





Modelo de preenchimento de cunhas conglomeráticas em falhas normais lístricas

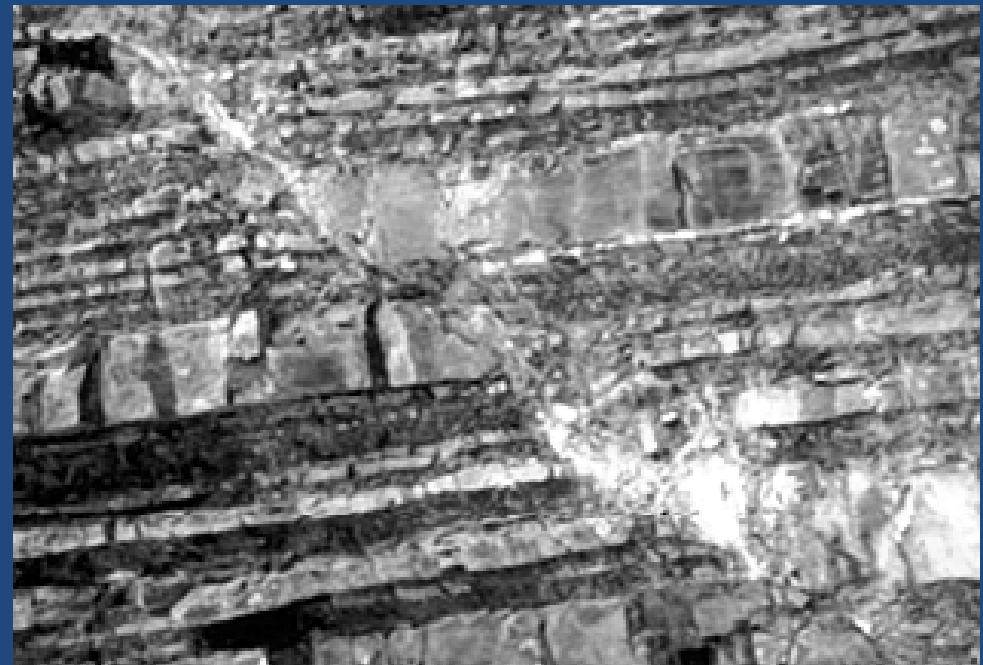
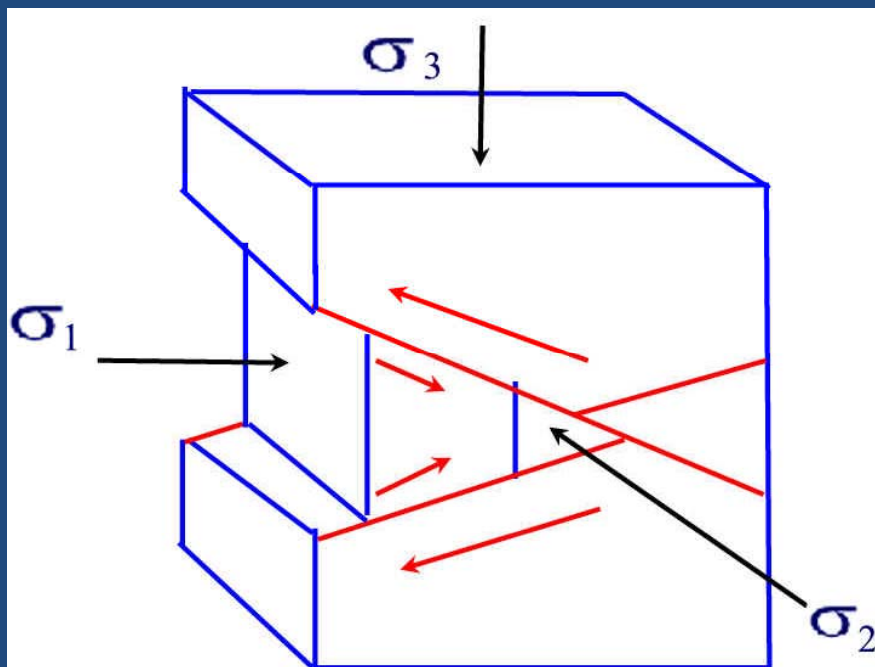


Sistema de falhas lístricas com atitude média de N80E e estrias com mergulho em torno de 45° para SE, em sedimentos Terciários da Bacia de Volta Redonda (A. Gontijo, 1999 – Tese de Doutorado)

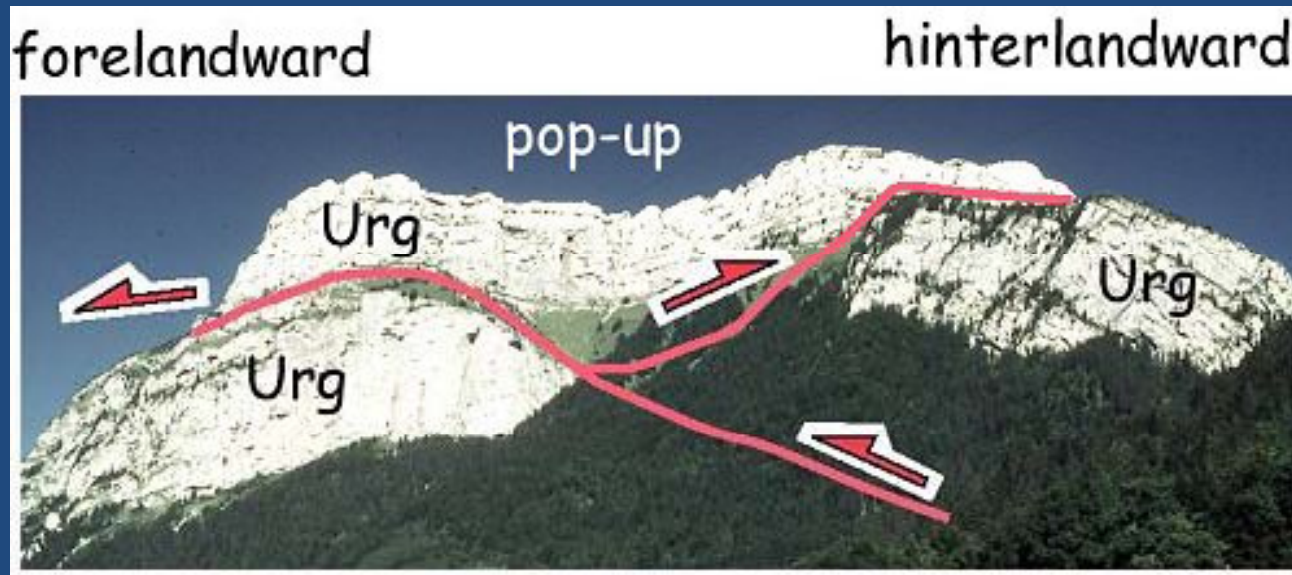
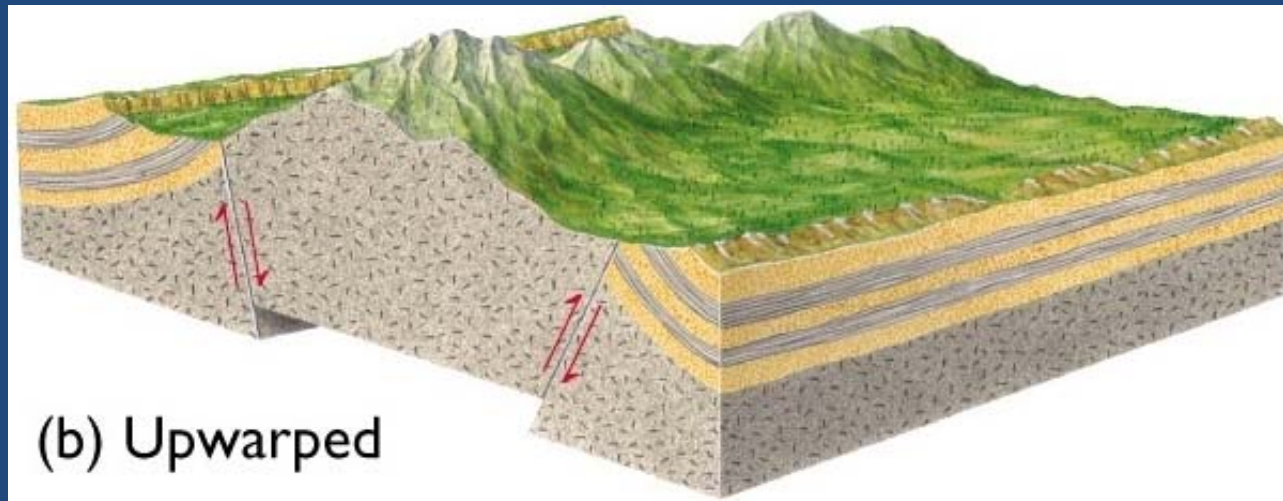
FALHAS INVERSAS

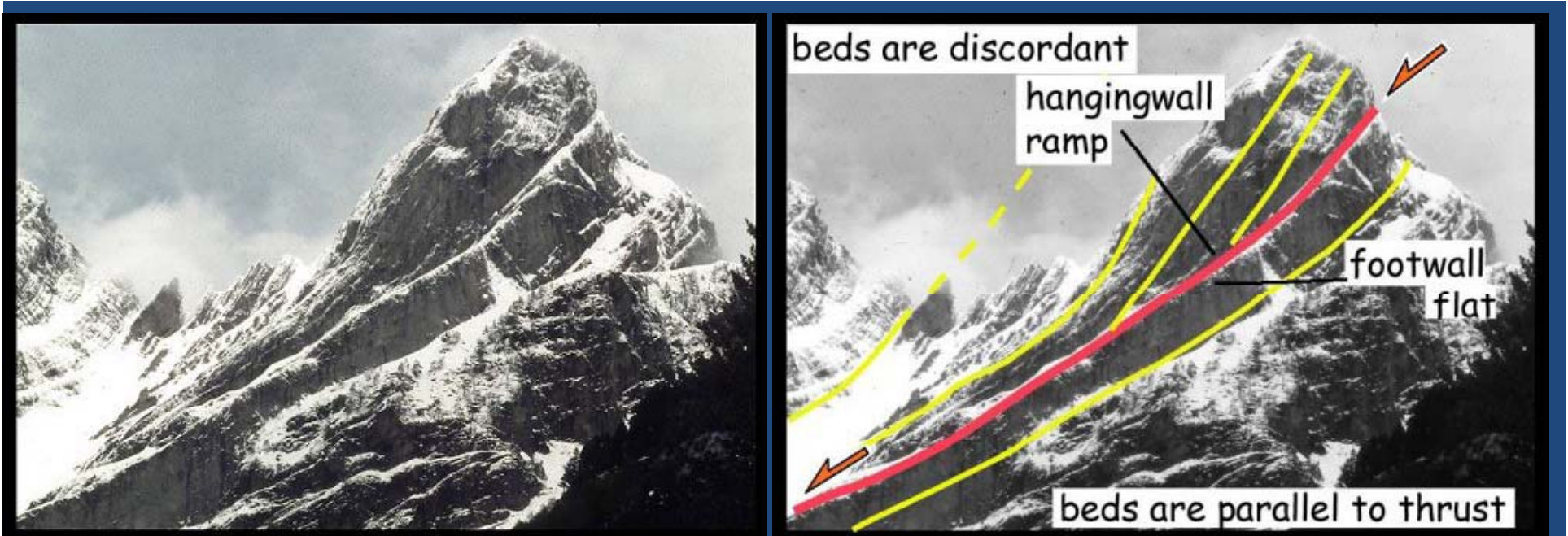
Posição dos eixos de tensão: σ_1 e σ_2 na horizontal e σ_3 na vertical (Anderson, 1942)

<http://www.uwsp.edu/geo/faculty/hefferan>



Estilos diferentes de falhas inversas (cavalgamento) gerando relevo positivo nas Montanhas Rochosas centrais e nos andes





Grandes lascas posicionadas no sentido estratigráfico inverso gerando relevo positivo de grande escala (Alpes)



Rampas frontais e o empurrão
<http://earth.leeds.ac.uk>

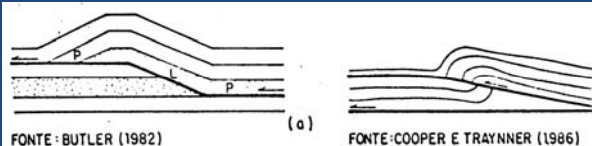


FIGURA 116 - DEFLEXÕES DAS ZONAS DE EMPURRÃO. EM (a), P- PATAI DEGRAU; L- LANÇO OU RAMPA; EM (b), ZONA DE CAVALGAMENTO SU- TE INCLINADA.

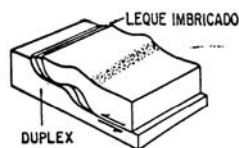


FIGURA 117- ESQUEMA DE UM SISTEMA DE CAVALGAMENTO EN- V UM LEQUE IMBRICADO E UM DUPLIX. O DUPLIX É ACOMODADO N- VEIS ACIMA, PODENDO ATÉ TER EXPRESSÃO TOPOGRÁFICA.

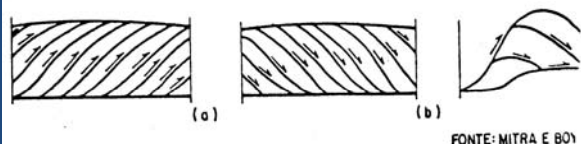
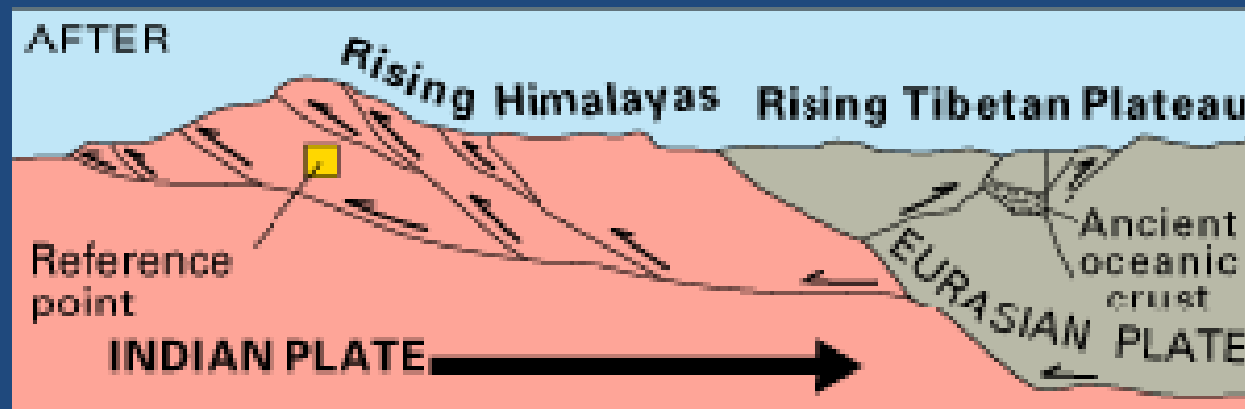
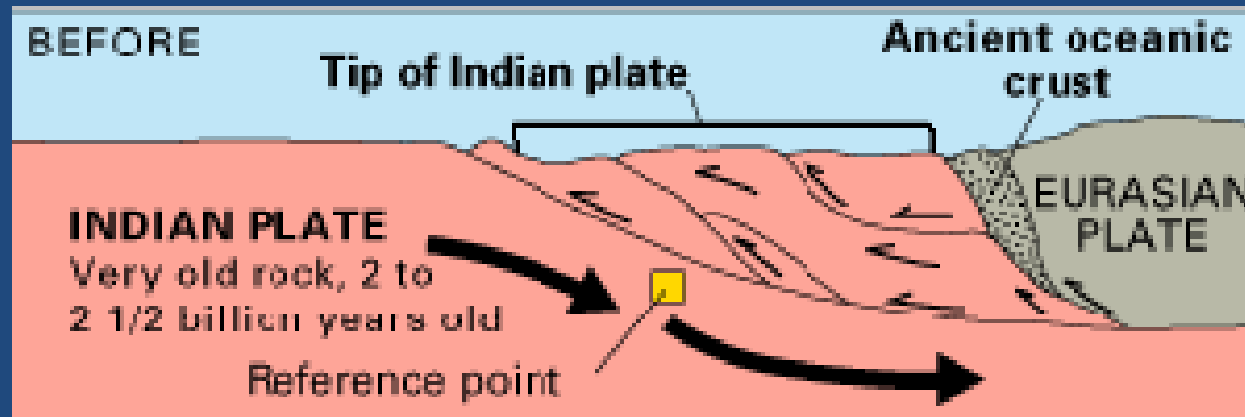


FIGURA 118- DUPLICES. EM (a), TIPO SINTÉTICO, COM AS LASCAS- LHANDO PARA A ZONA INTERNA (ESQUERDA); EM (b), TIPO ANTIT- AS LASCAS MERGULHANDO PARA A ZONA EXTERNA (DIREITA); LHA ANTIFORMAL.



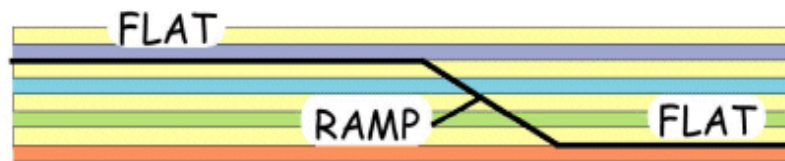
O Sistema Himalaiano é controlado principalmente por falhas inversas

Sistema de empurrão do tipo duplex: rampas e zonas planas pouco deformadas

Thrusts cut up-section - but rarely as planar faults.

Instead they cut a staircase

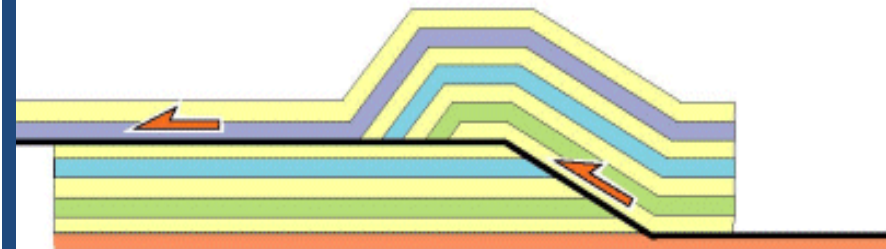
future
fault
trace



what happens
after movement?

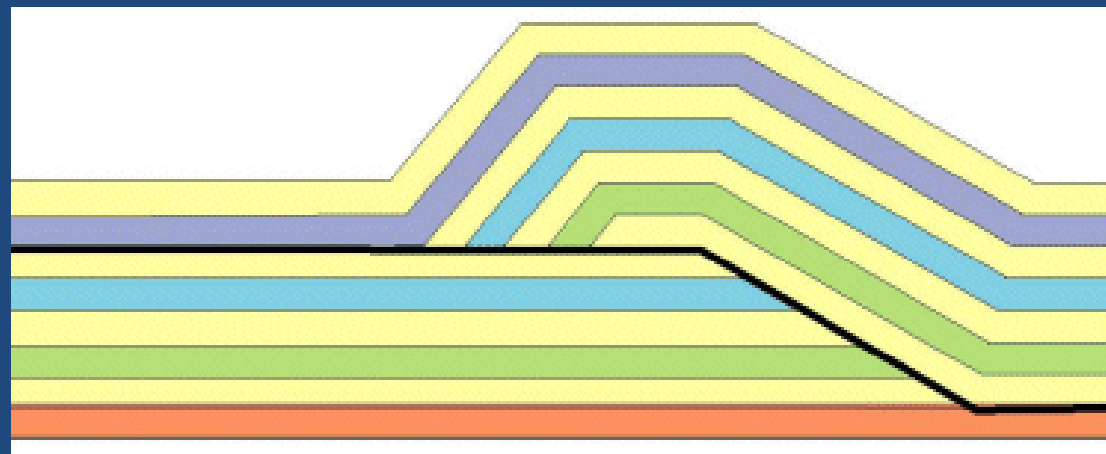
For originally horizontal rocks
FLAT - is parallel to bedding
RAMP - cuts across bedding
(ideally at less than 30 degrees)

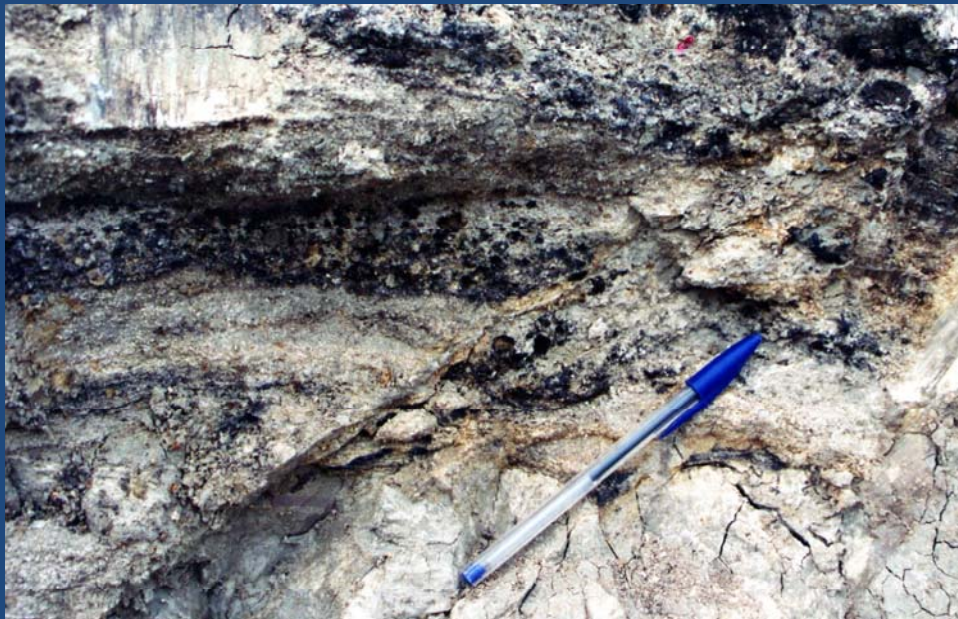
Fold created in hanging-wall



footwall remains undeformed

there are various relationships
created between bedding on
either side of the fault

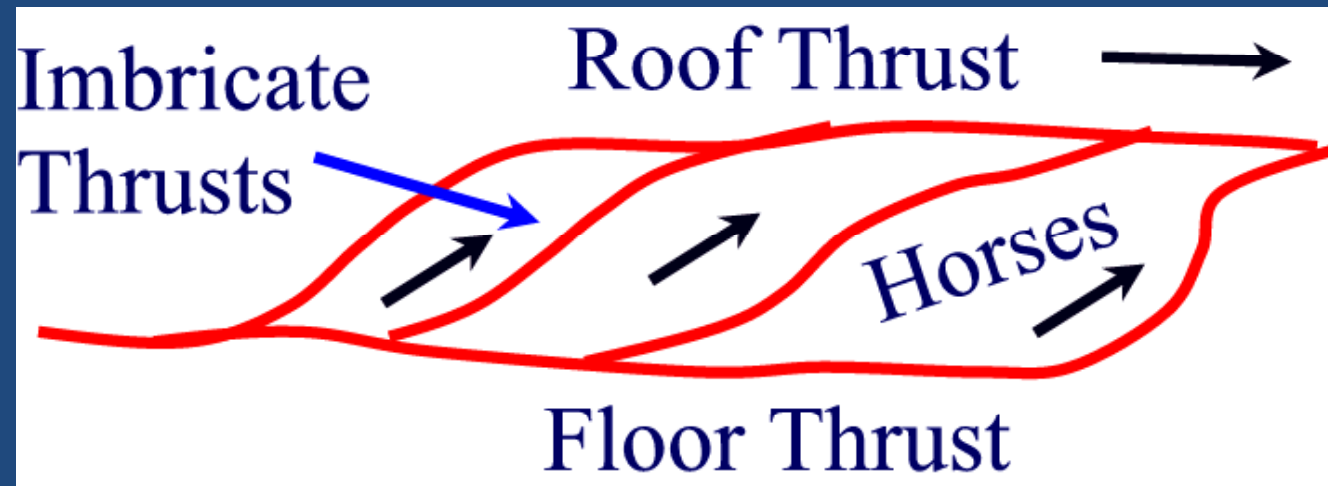




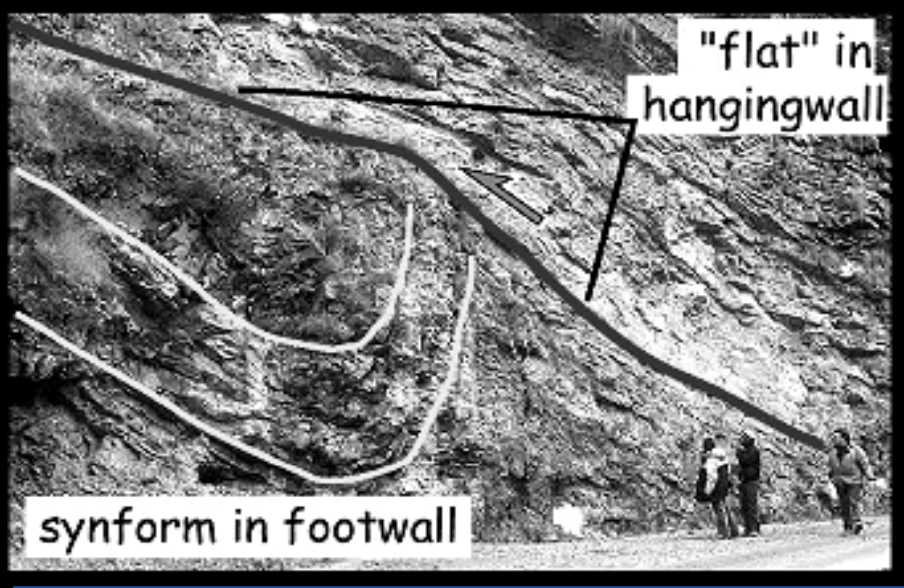
Exemplos de falhas inversas macroscópicas em rochas sedimentares da Formação Guabirotuba (tectônica pós Neógena, podendo estar associada, até com neotectônica)

Foto: E. Salamuni

Leques imbricados marcando falhas inversas

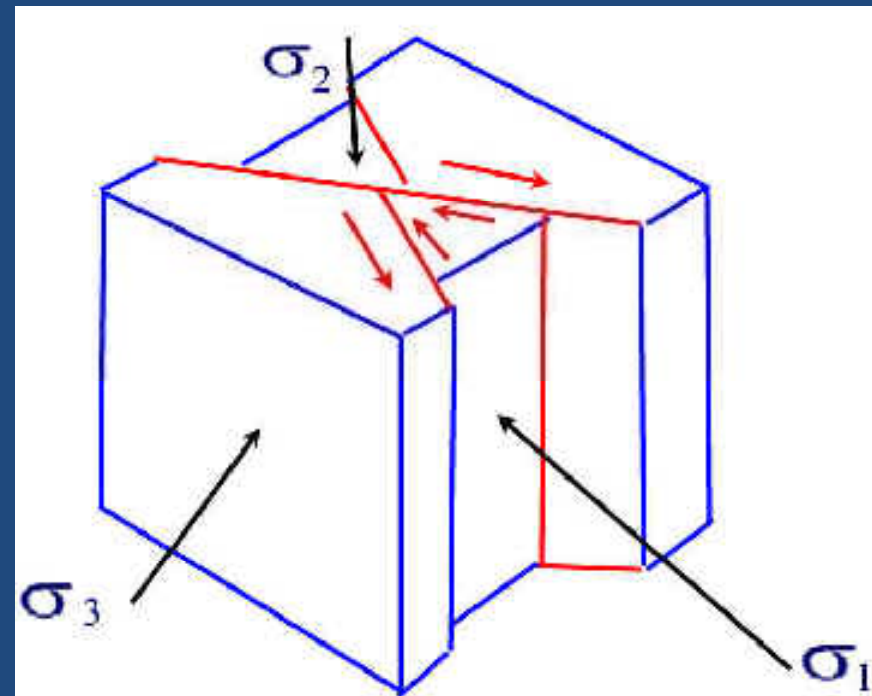
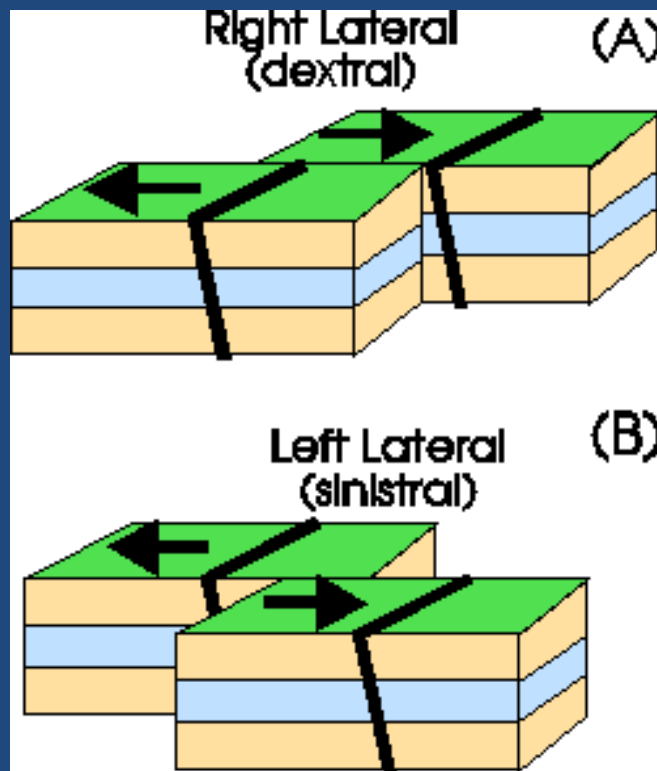


Formação de dobras com estilos diferenciados, em zonas de cavalgamento



FALHAS TRANCORRENTES

Posição dos eixos de tensão: σ_1 e σ_3 na horizontal e σ_2 na vertical

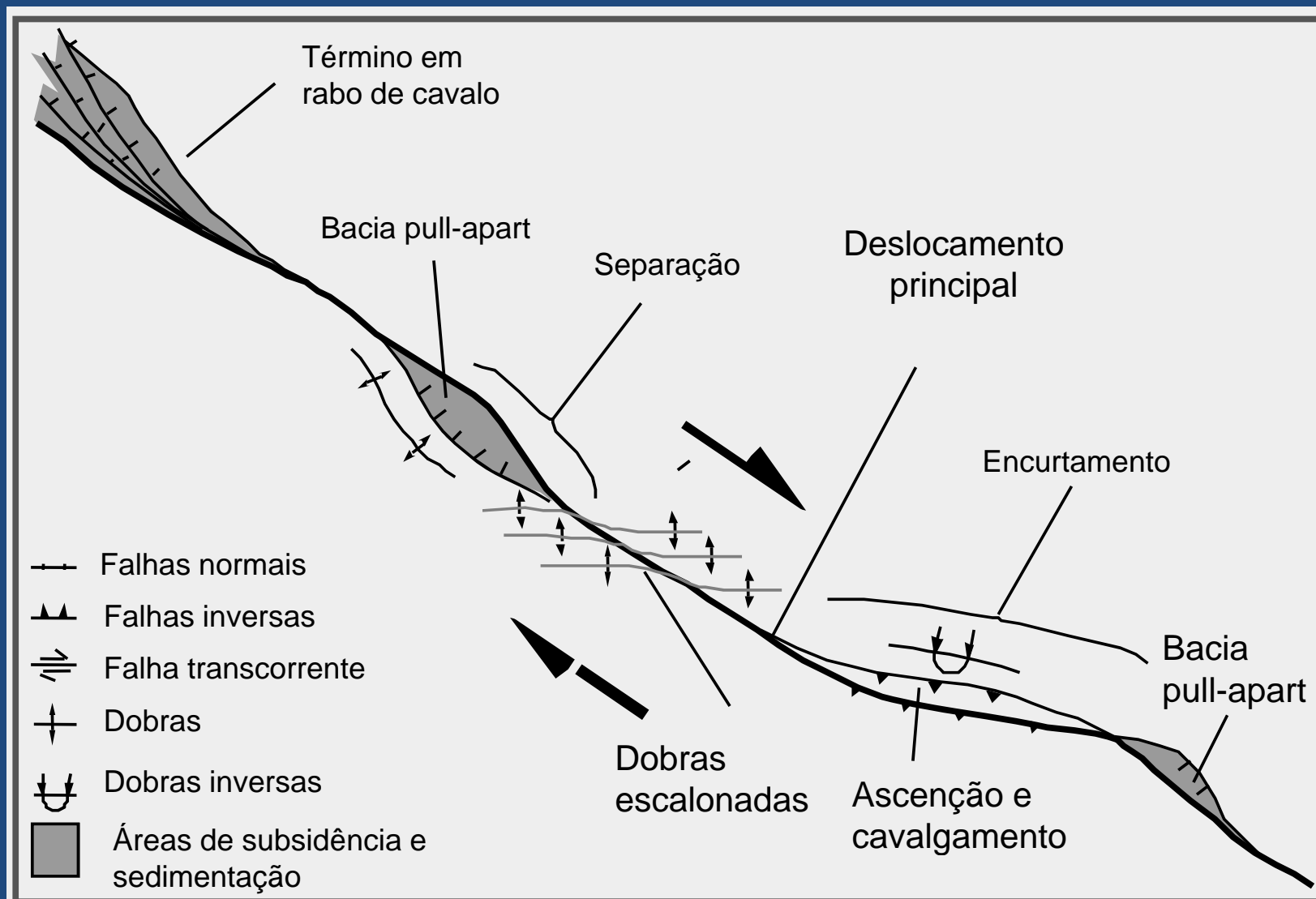


<http://www.uwsp.edu/geo/faculty/hefferan>



Movimento relativo entre os blocos adjacentes

Regime transcorrente e as estruturas geológicas em escala regional ao longo da zona de falha



Produtos gerados na zona de falha tais como deslocamento de camadas, planos de falhas e estrias de atrito (slickensides), demonstram o movimento dos blocos adjacentes.



Falhas com estrias e steps



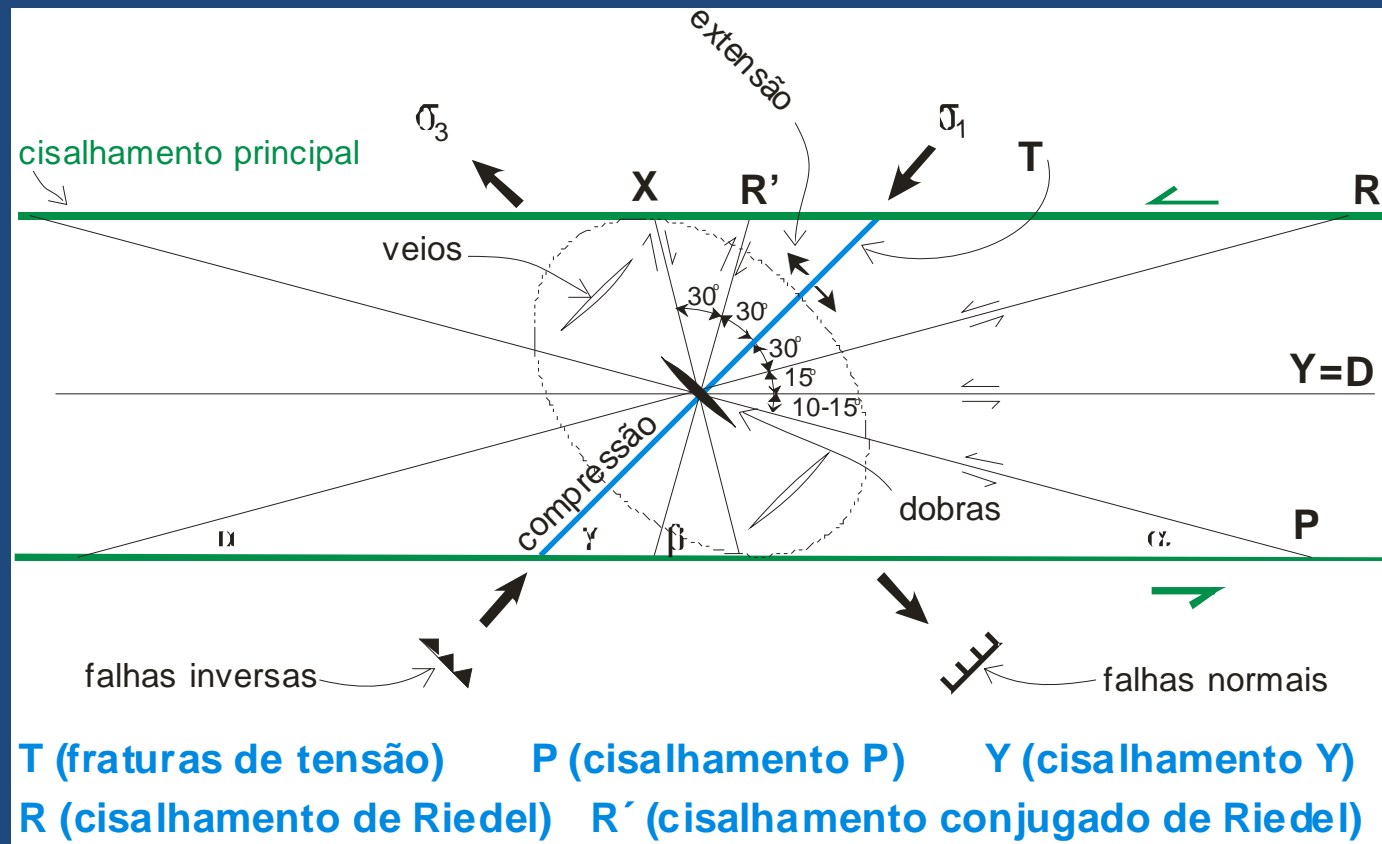


Estrutura em flor

Falhas preenchidas por caulim

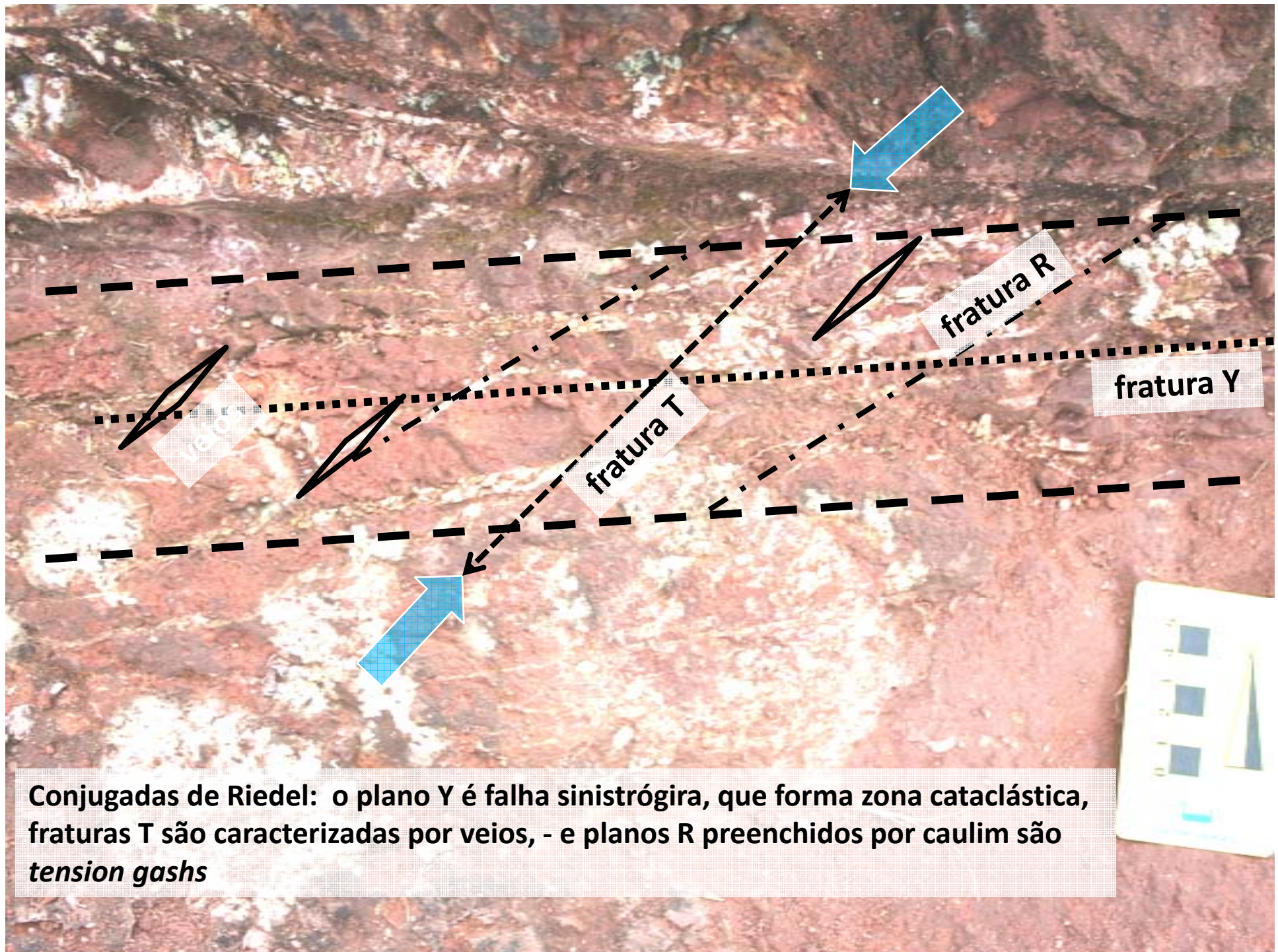
Estruturas de descontinuidade (fraturas) associadas

As zonas transcorrentes podem ser explicadas pelo modelo de *Riedel* ou de *Wilcox*. Dependendo do nível estrutural em que estão inseridas produzem fraturas sintéticas, antitéticas e até dobras escalonadas.



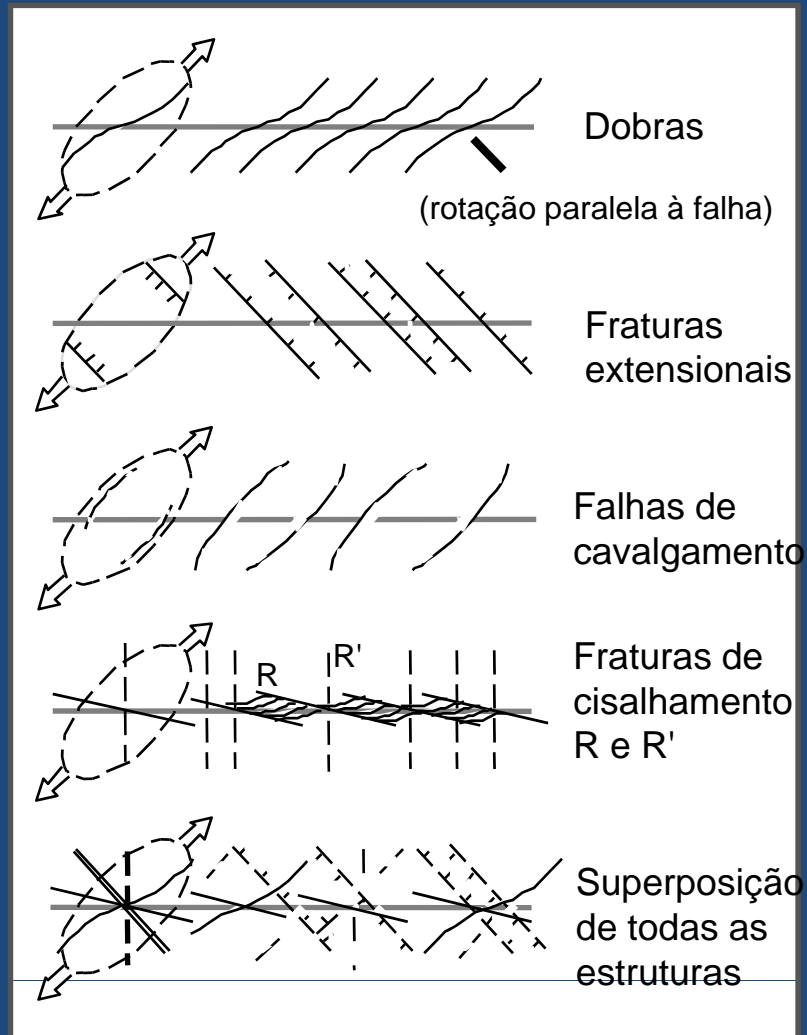


Riedel: falha sinistrógiira, plano Y em zona cataclástica e planos R preenchidos por caulim



Conjugadas de Riedel: o plano Y é falha sinistrógrica, que forma zona cataclástica, fraturas T são caracterizadas por veios, - e planos R preenchidos por caulim são *tension gashes*

Orientação de feições estruturais em resposta à zona de cisalhamento transcorrente. Modificado de Sylvester (1988).

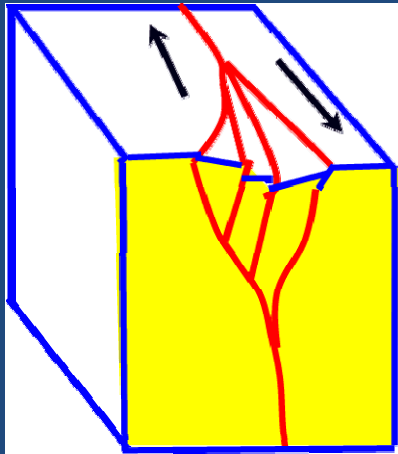
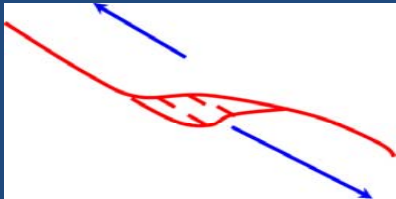


Zona de Cisalhamento: faixa definida de deformação (*strain*) que pode estar presente na consequência mecânica e/ou reológica tanto de falhas normais, quanto inversas e transcorrentes

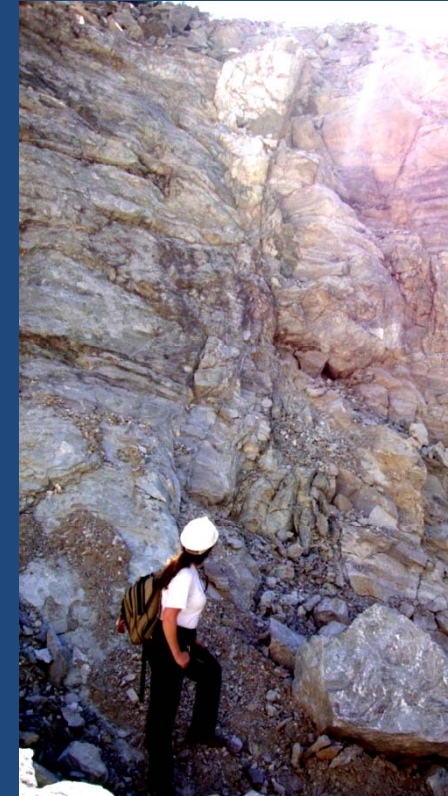
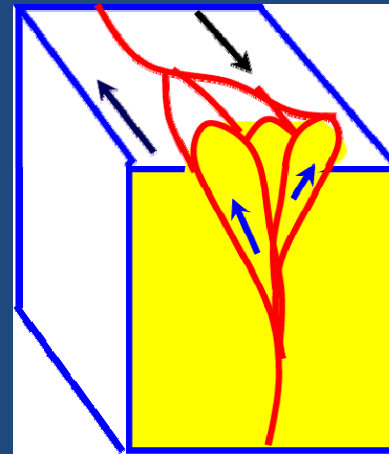
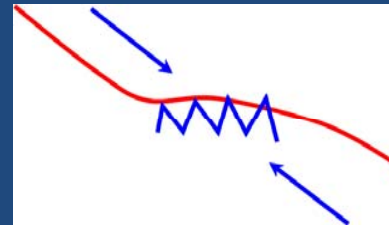
Dobras, falhas normais, de cavalgamento e escalonadas (en échelon).

Todas as estruturas apresentam ângulo em relação à zona principal de deslocamento

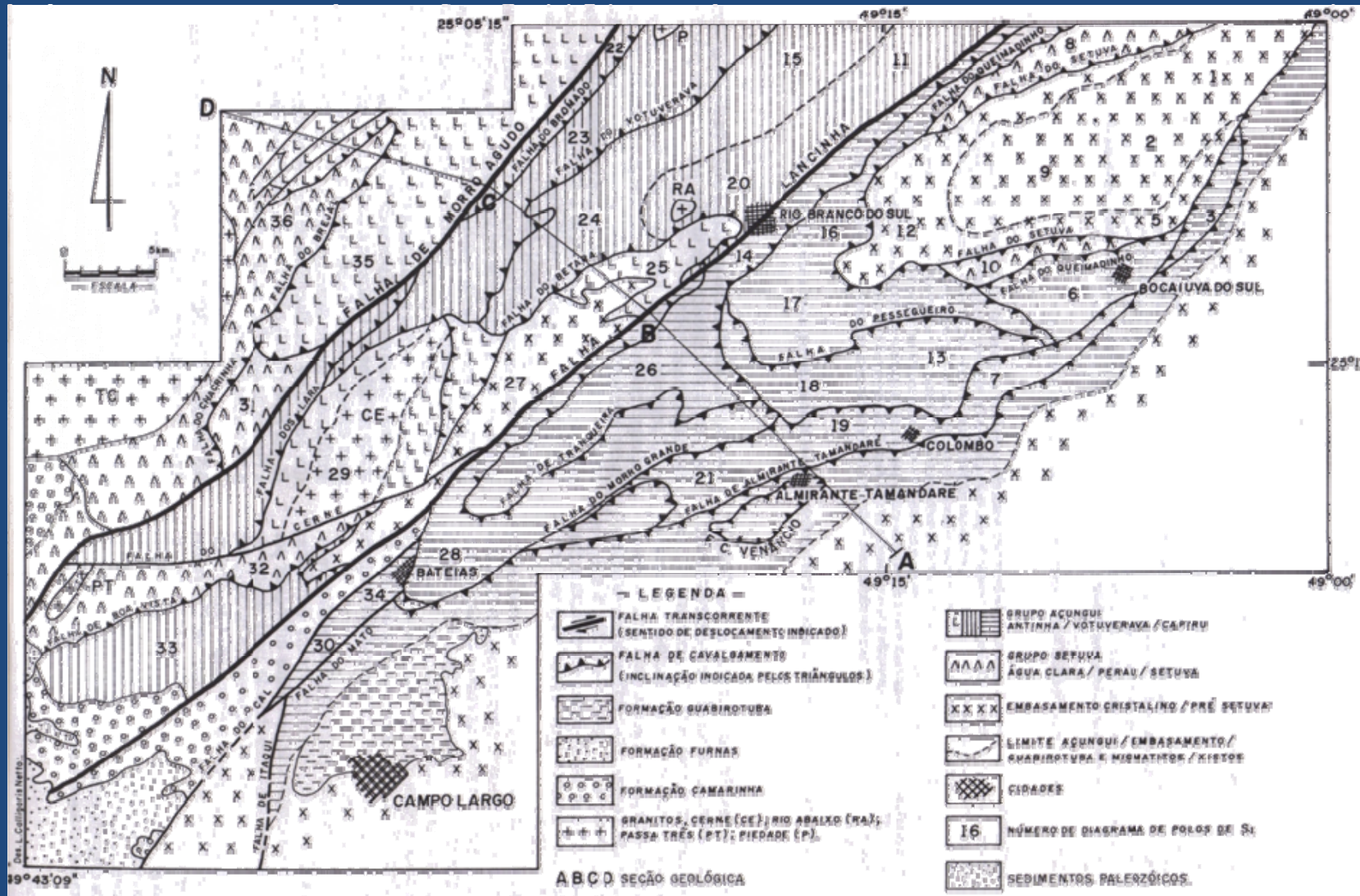
Sistema transcorrente
transtensional (bacia *pull-apart*)



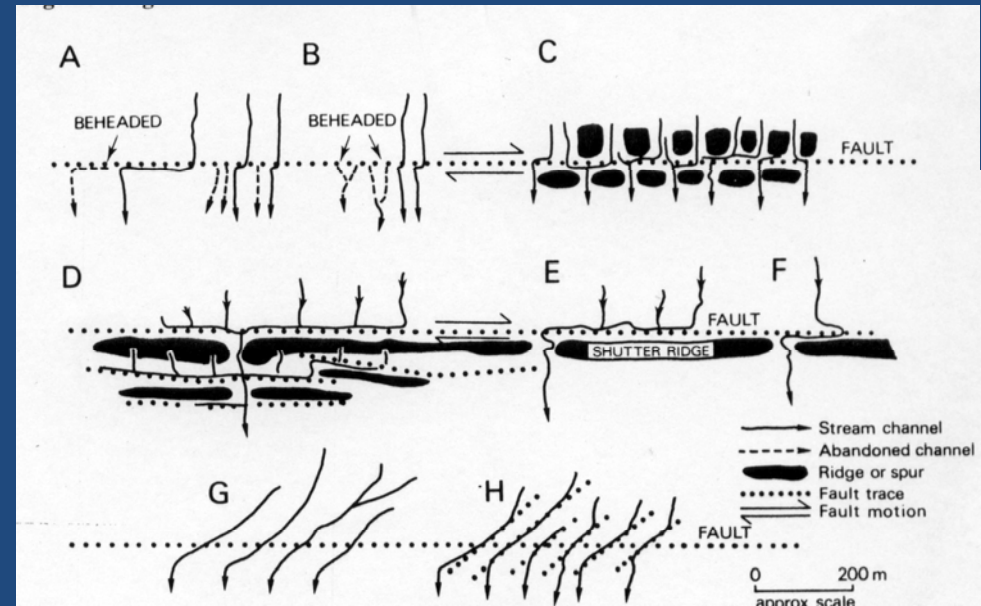
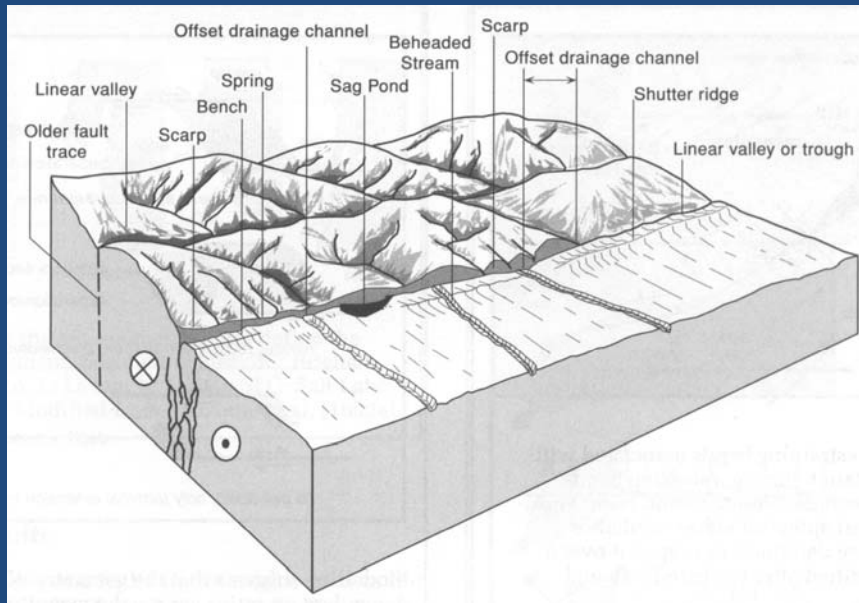
Sistema transcorrente
transpressional (ejeção ou *push-up*)



Expressão cartográfica em zona de falha transcorrente (Falha da Lancinha, que recorta o escudo paranaense).



Feições geomorfológicas geradas em zonas transcorrentes

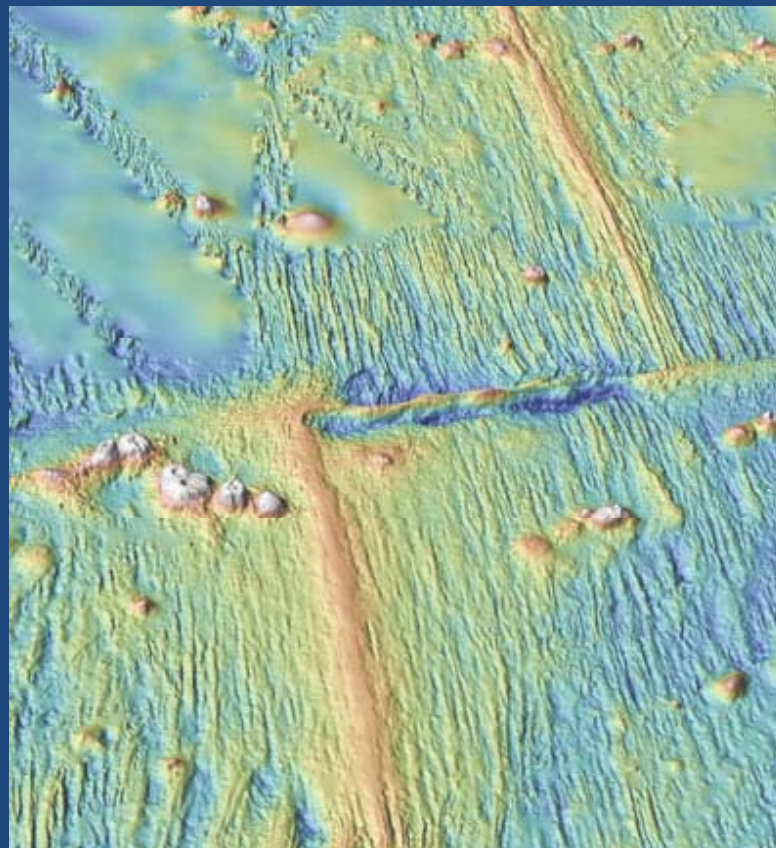
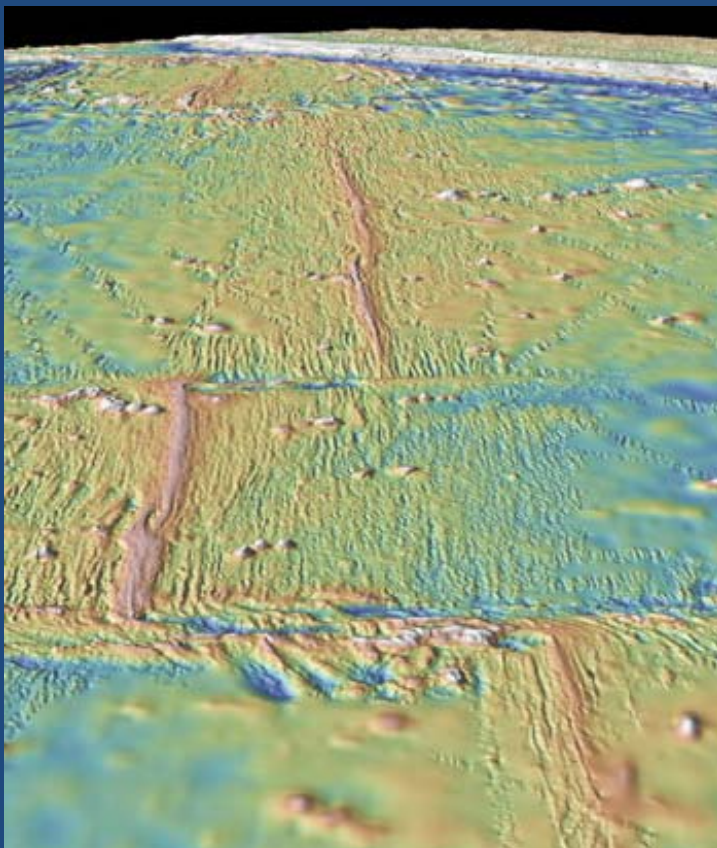


Wesson et al. (1975)

FALHAS TRANSFORMANTES

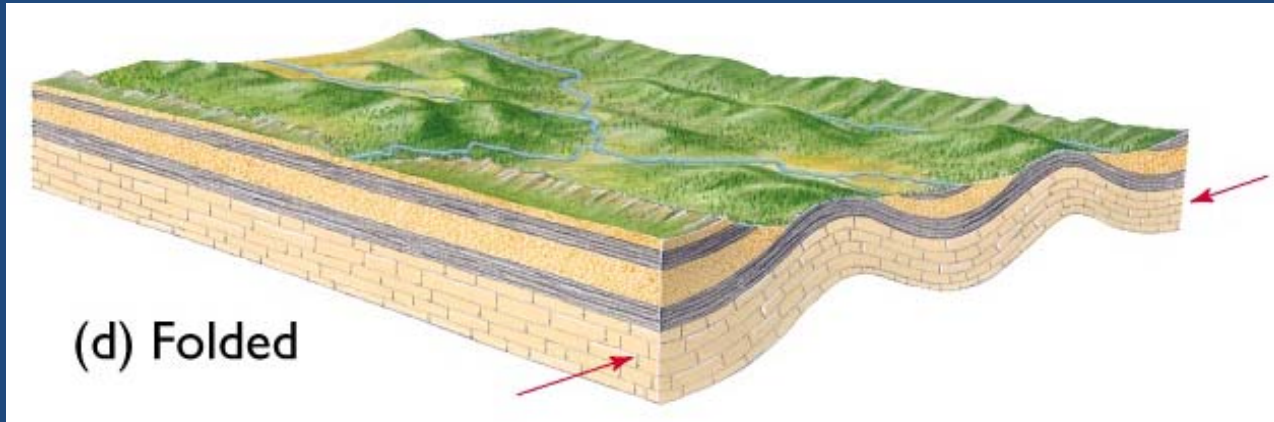
São análogas às falhas transcorrentes; todavia, com a diferença de que o sistema comporta falhas cujo sentido de deslocamento pode ser discrepante.

Ocorrem unicamente na crosta oceânica. Caso coloquem blocos continentais lado a lado, automaticamente são consideradas falhas transcorrentes típicas.



Crédito da
Imagem: Bill
Haxby

DEFORMAÇÃO POR DOBRAS



Sistemas de
dobras: vales e
cristas



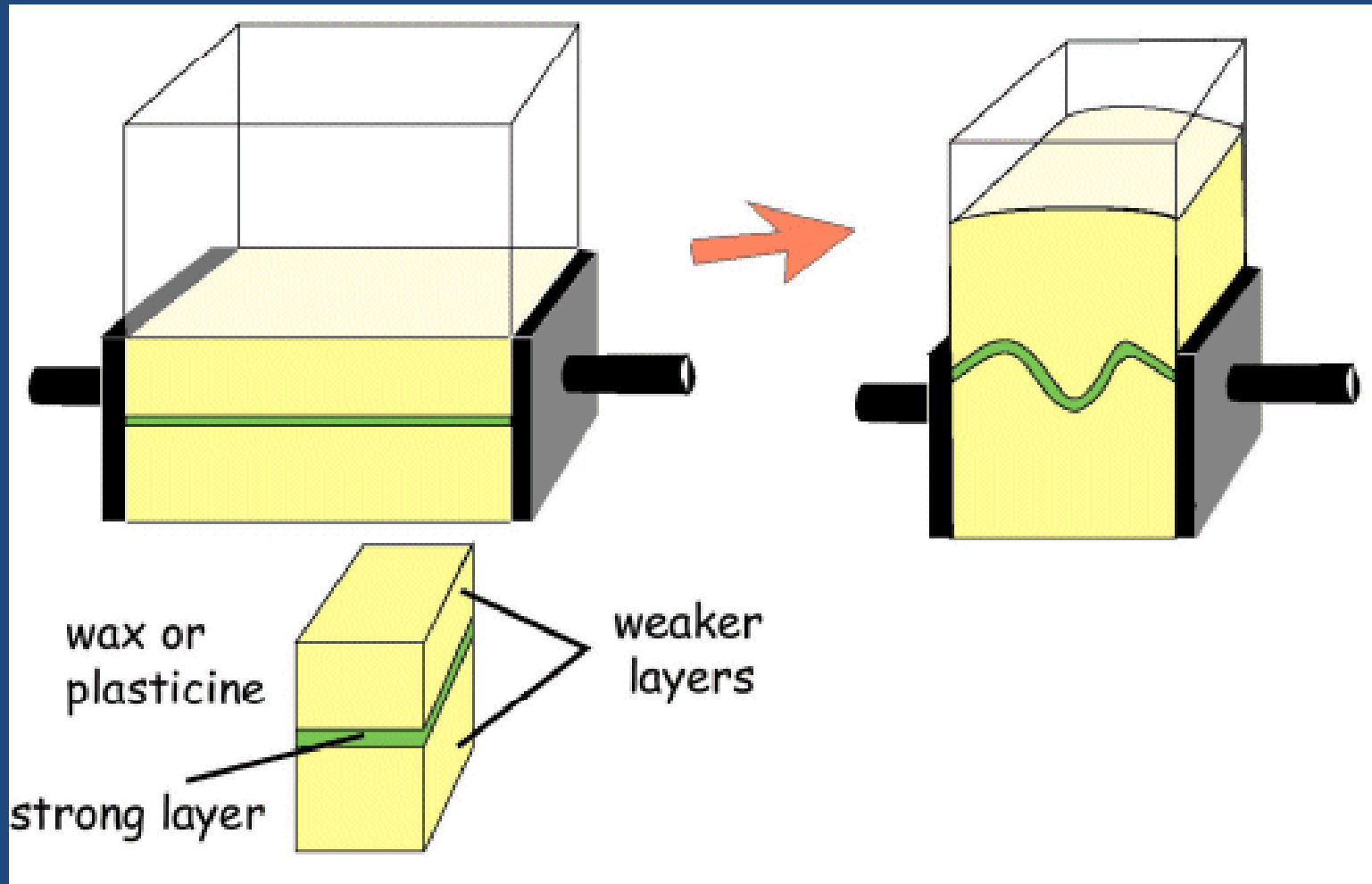
MECANISMOS DE DOBRAMENTOS

- As forças que atuam em um corpo são denominadas de *stress*, causando deformações elásticas denominadas de *strain*. No caso de dobramentos o *strain* é materializado das seguintes maneiras.
- Flexão

Quando há um encurtamento no interior da camada competente, os esforços produzem uma instabilidade que dá lugar a um *buckling* ou *flambagem* que dobra a estrutura. A flambagem do banco é a ação elástica responsável por uma ondulação do banco competente, gerando uma dobra paralela (isópaca ou flexural).

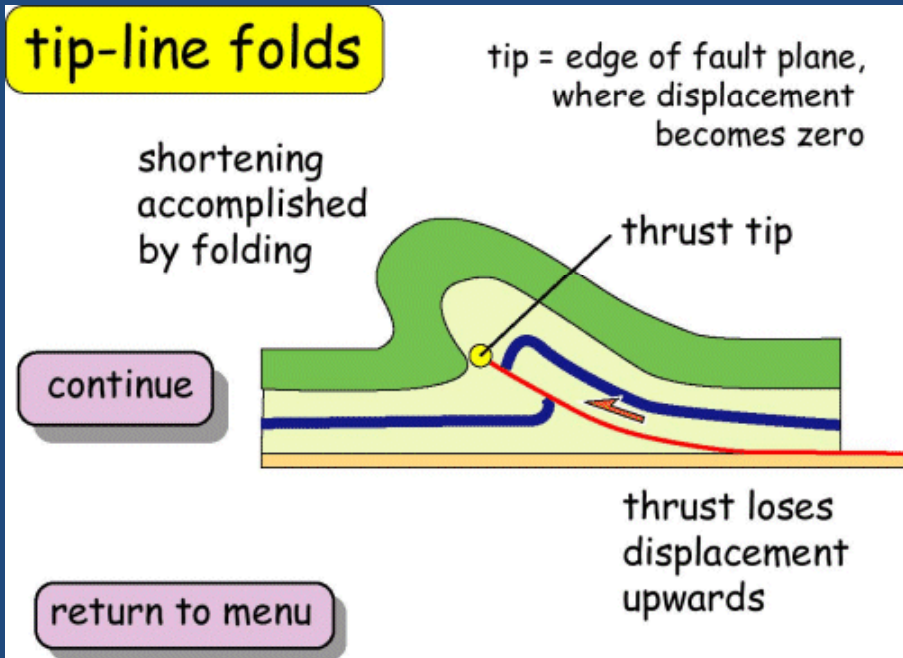
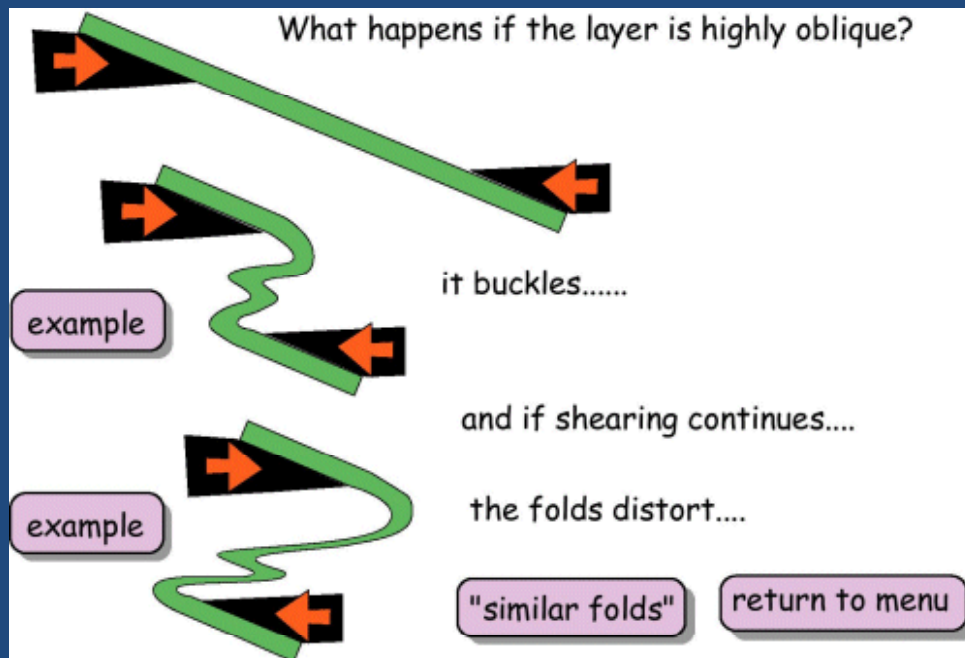
As dobras por *buckling* podem gerar: fraturas de tensão no arco externo que são preenchidos por minerais, boudins, dobras de arrasto, estrias de atrito, microdobras e falhas (inversas no núcleo da dobra) ou até xistosidade.

Dobra por flexão



Cisalhamento (shear folds, dobras passivas, slip folds)

São dobras similares (Classe 2 de Ramsay) e formam-se em zonas profundas da crosta, estando as rochas em estado dúctil ou dúctil-rúptil. Podem se formar por meio de processos de cisalhamento simples, cuja deformação pode ser progressiva, heterogênea ou homogênea. A superfície ou o plano axial é sempre paralelo ao plano de cisalhamento.





<http://earth.leeds.ac.uk/folds>



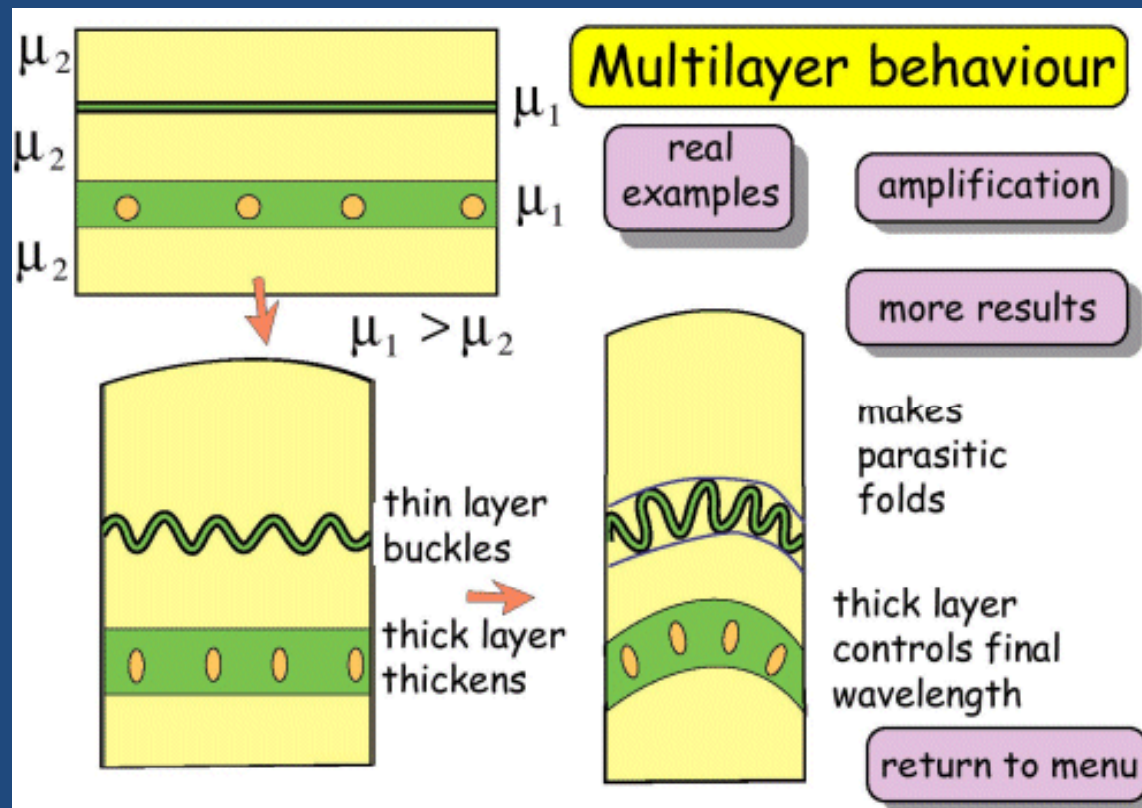
Filito da Formação Votuverava.
Itaperuçú (PR).
Foto E. Salamuni



Gnaiss da Pré-Cordilheira andina.
Santa-Fé (AR).
Foto E. Salamuni

Achatamento (flattening)

Há cálculos que uma barra pode dobrar até 36% pelo processo de deformação. Depois deste valor ocorre achatamento no qual há adelgaçamento no flanco da dobra e um espessamento na zona apical (fluxo plástico do material dos flancos da dobra para o ápice da mesma).



Fluxo

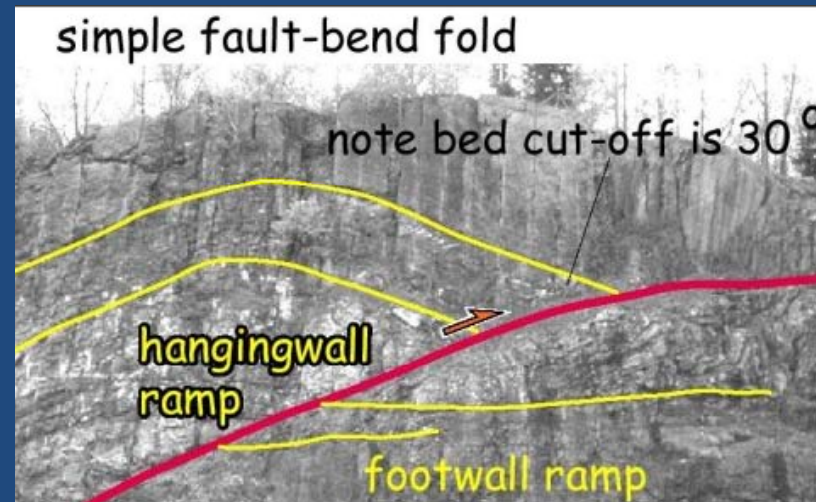
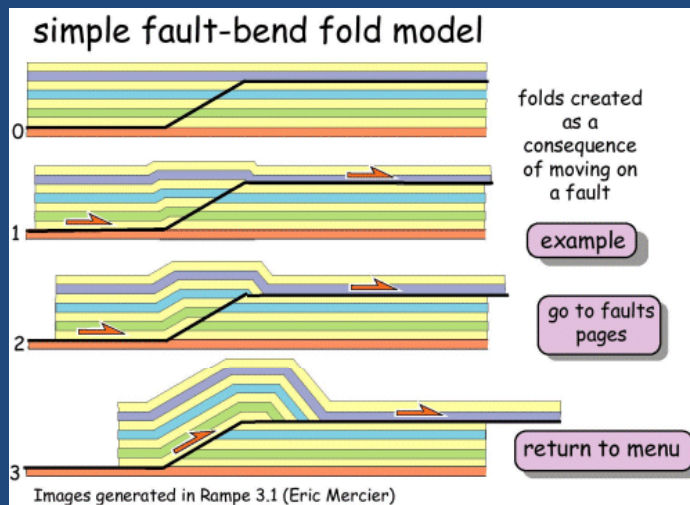
Ocorre em condições de metamorfismo muito elevado, estando a rocha num estado extremamente plástico e normalmente causam dobras irregulares. Apresenta as seguintes características

- inconstância do eixo
- padrão geométrico extremamente irregular
- características de alto grau metamórfico



Dobras de fluxo em migmatito do embasamento do Rio de Janeiro.
Foto: E. Salamuni

Dobras relacionadas a falhas inversas

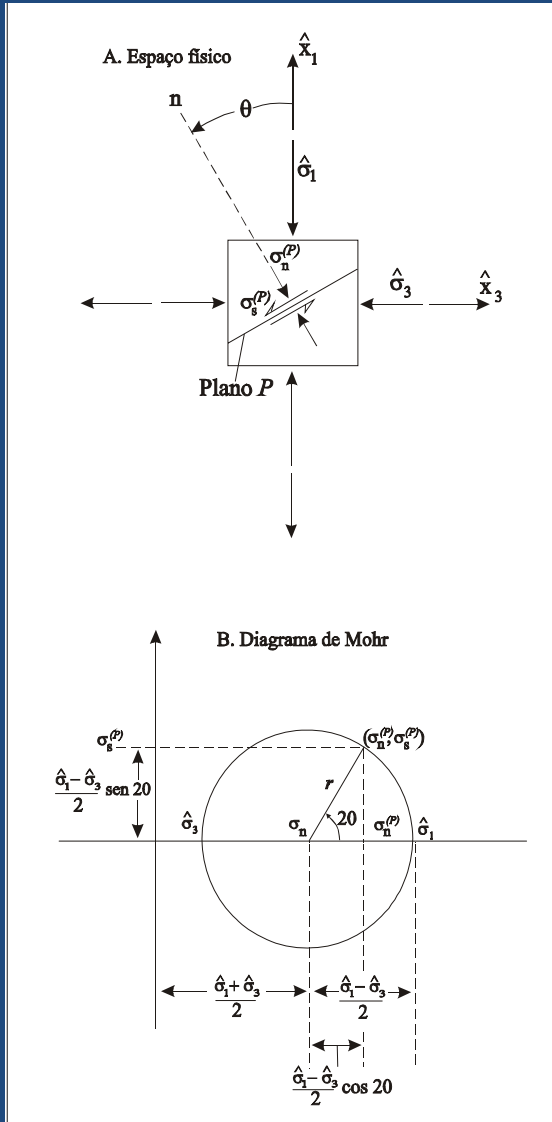
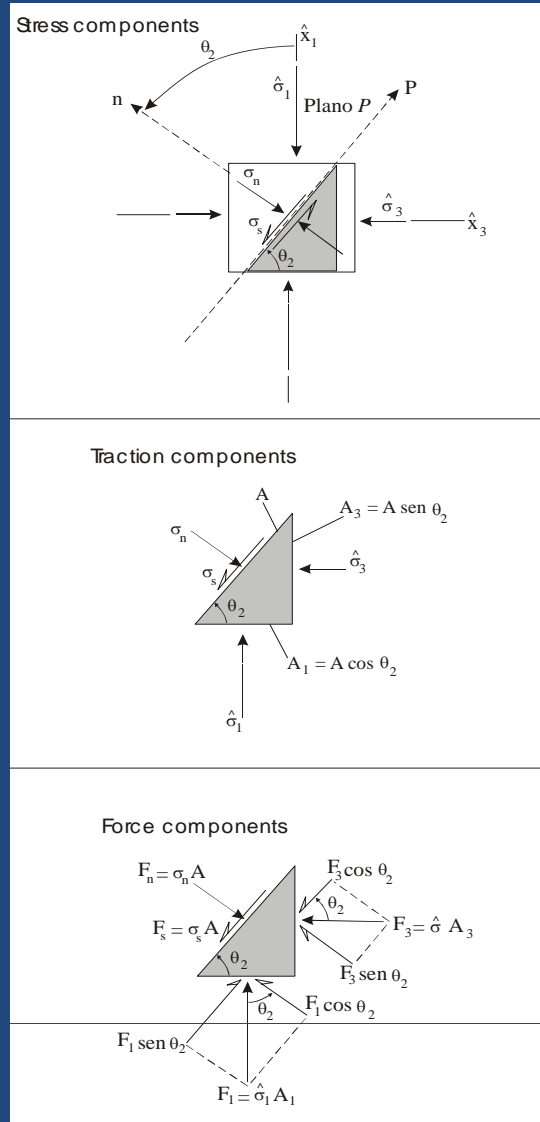
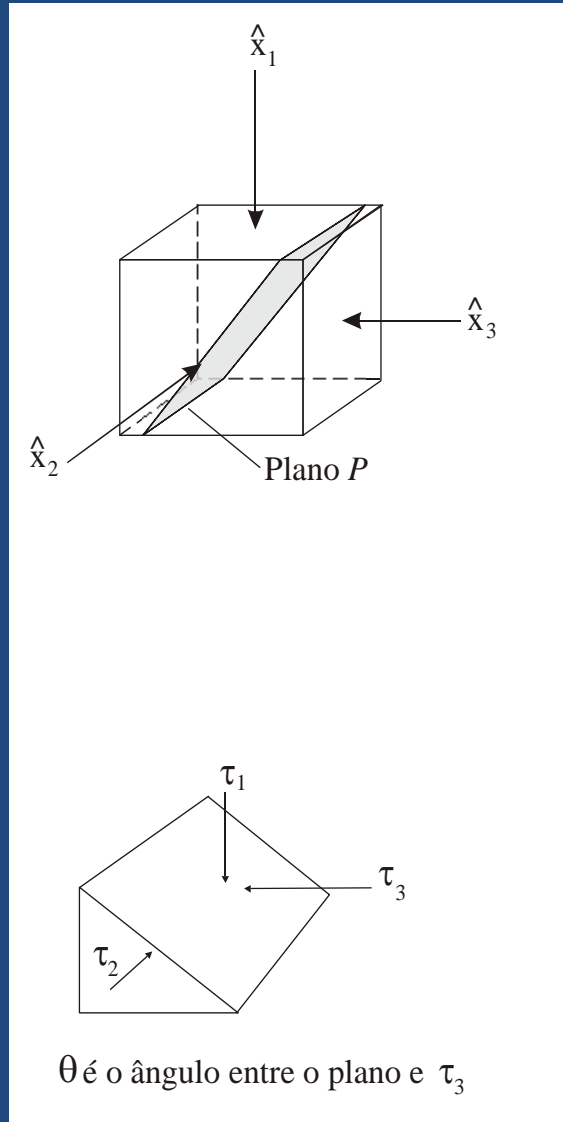


<http://earth.leeds.ac.uk/folds>

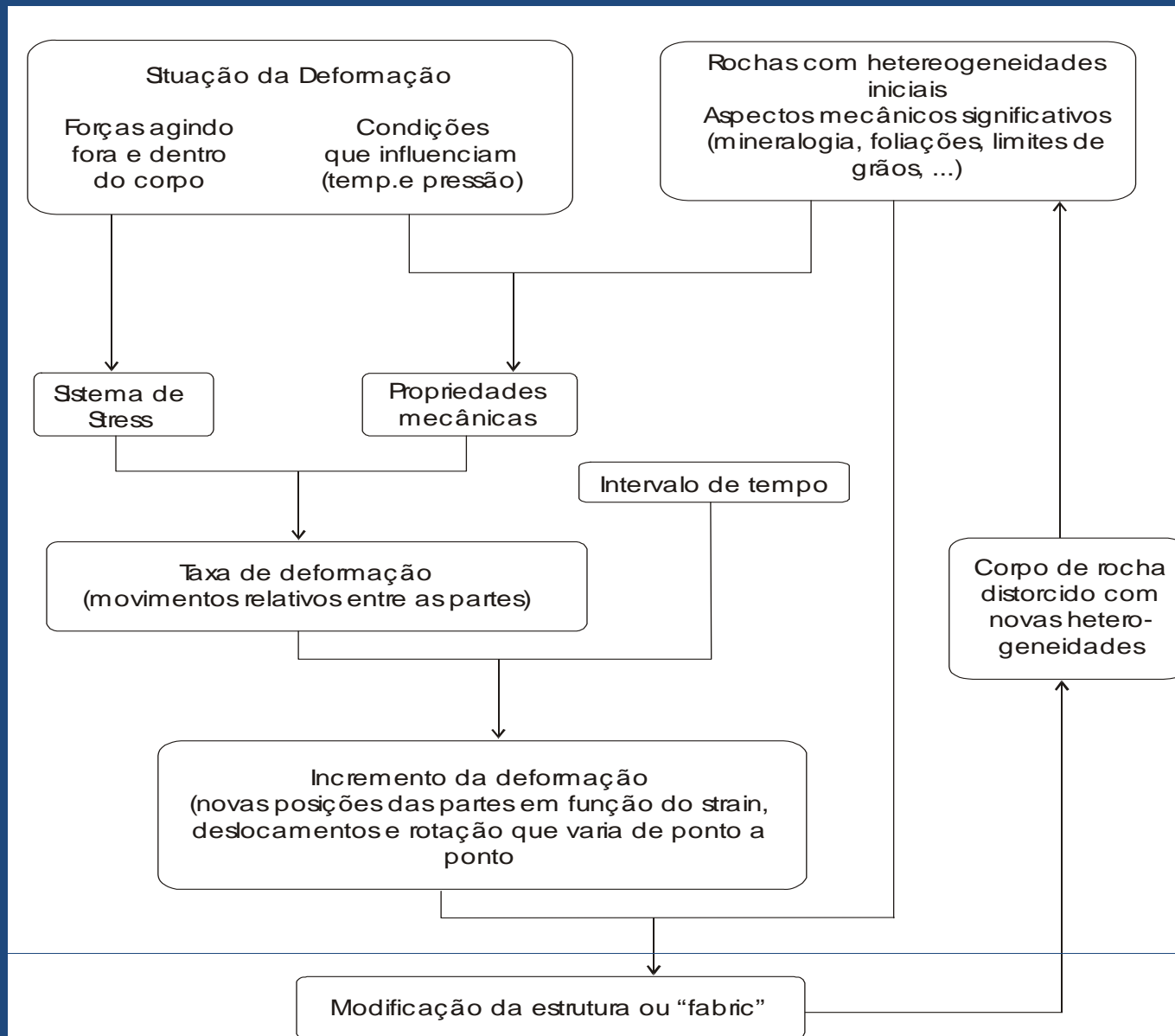


Dobras de cavalgamento em paragnaisses da Formação Betara (Paraná). Foto: E. Salamuni

FÍSICA DA DEFORMAÇÃO



Quadro do “caminho” da deformação



Problemas Reológicos

- **Reologia** é o estudo do comportamento físico das rochas, mediante a aplicação de forças e tensões (*stress*). O conhecimento da mecânica das rochas é útil em função de que a maioria das propriedades observáveis da rocha reflete aspectos das forças e movimentos que os corpos experimentaram.
- A lógica da mecânica de rochas admite que as rochas possuam propriedades **elásticas** e **plásticas** concomitantes. Um e outro conjunto de propriedades se manifestará de acordo com o valor das solicitações e conforme as condições do meio.

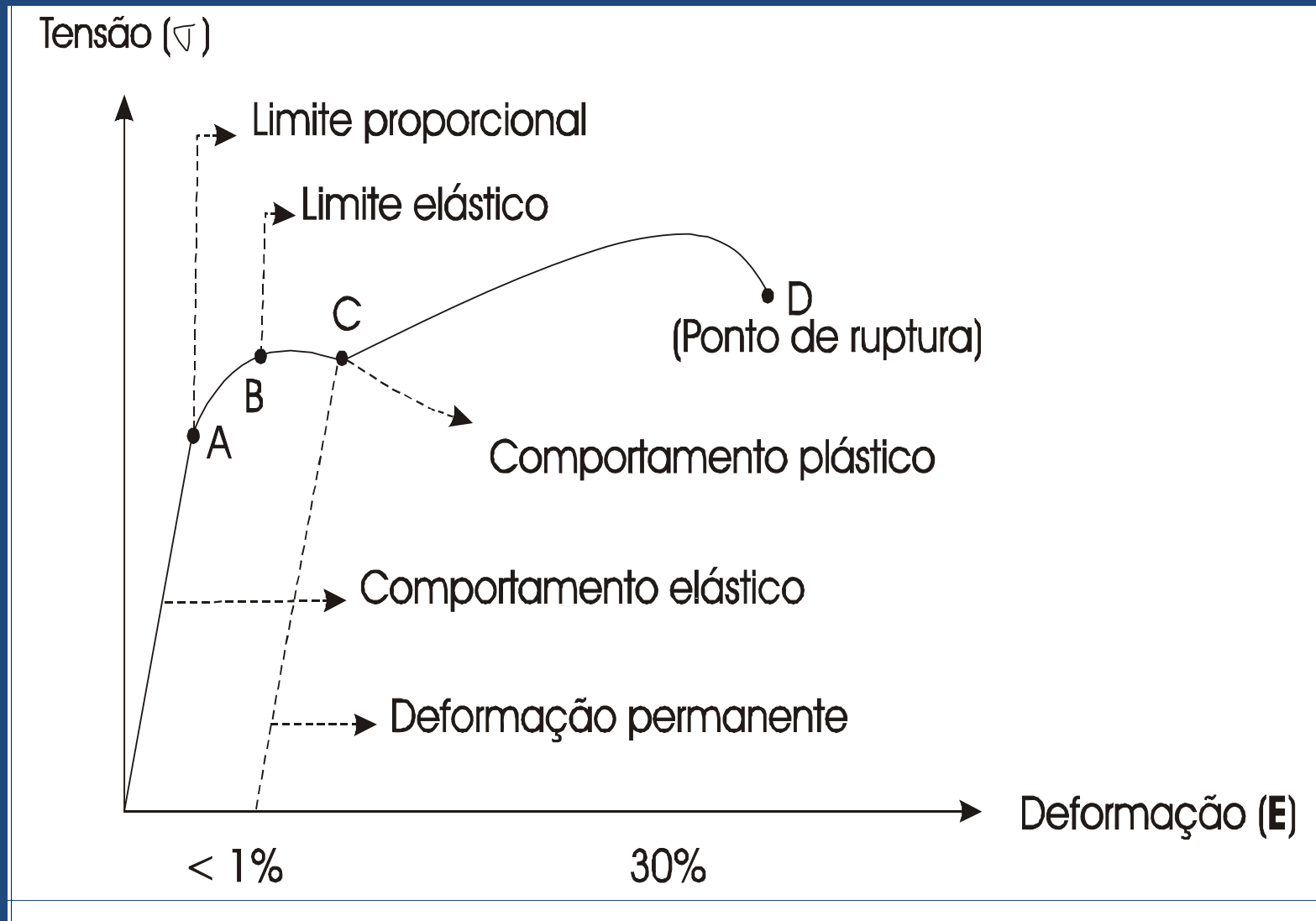
Fatores Extrínsecos influentes no comportamento rochoso

- **Pressão confinante**: materiais friáveis tornam-se mais dúcteis, quanto maior a pressão confinante (PC). Os limites de elasticidade, resistência e esforço máximo se elevam com o aumento da PC, isto significa que a maiores profundidades maiores esforços são necessários para produzir a mesma deformação. O ângulo dos planos de cisalhamento, em relação ao eixo do corpo de prova, aumenta com a PC. Isto demonstra que o ângulo de atrito interno diminui na medida em que se aproxima da superfície da crosta.
- **Temperatura**: a temperatura facilita a deformação, tornando os materiais mais dúcteis. Neste caso a pressão confinante e a temperatura somam seus efeitos. O limite da resistência, o esforço máximo e o limite de elasticidade, diminuem com o aumento de temperatura, isto significa que a mesma deformação é causada por esforços, tanto menores, quanto maior for a temperatura. A temperatura age contrariamente em relação à pressão confinante.
- **Tempo de Aplicação do Esforço**: a aplicação de esforços se faz lentamente e com pausas - fenômeno comum na natureza – através de acréscimos infinitesimais. Quanto maior o tempo de aplicação do esforço mais dúctil será a deformação.

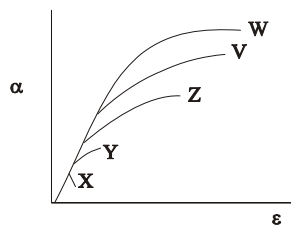
Fatores Intrínsecos influentes no comportamento rochoso

- **Presença de Flúidos**: diferentes soluções produzem efeitos deformacionais diferentes. O limite de plasticidade, o limite de resistência e o esforço máximo, diminuem com a presença das soluções, ou seja, uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções. Os efeitos das soluções somam-se aos efeitos da elevação de temperatura e da pressão confinante.
- **Anisotropia Estrutural**: corpos de provas, cortados paralelamente e perpendicularmente à xistosidade, mostram comportamentos diferentes, concluindo-se que a orientação da anisotropia estrutural influi na deformação. Ensaio de compressão e tração são diferentes: as rochas são mais resistentes à tração que à compressão.
- **Heterogeneidade litológica**: Willis (1932) introduziu o conceito de **competência**: rochas competentes são aquelas que se deformam sem se romperem e transmitem os esforços por distâncias maiores. Já a definição de **incompetência** é relacionada à deformação concomitante, com absorção de esforços em curtas distâncias.

Gráfico Tensão x Deformação

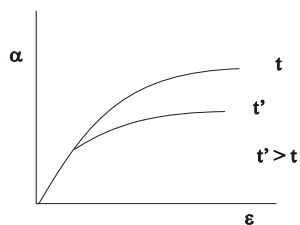


Fatores que influem no comportamento dos corpos rochosos



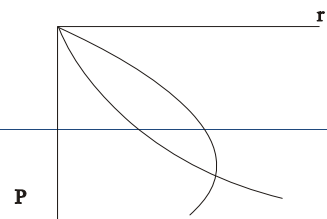
Pressão confinante
 $W > V > Z > Y > X$

- A) Materiais frágeis tornam-se dúcteis;
- B) Aumenta o limite de elasticidade limite de resistência e esforço máximo;
- C) Aumenta o ângulo de cisalhamento com o eixo do corpo de prova.



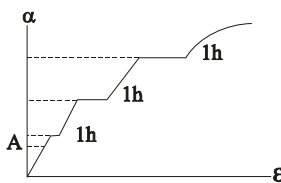
Temperatura

- A) Facilita a deformação;
- B) Diminui o limite de resistência, o esforço máximo e o limite de elasticidade.

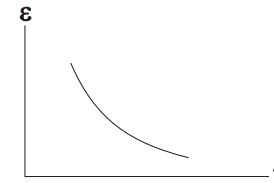


Varição da resistência (r) com a profundidade (P)

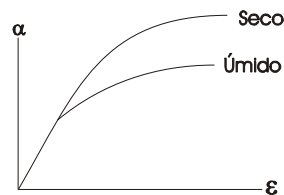
Tempo de aplicação do esforço



Aplicação do esforço com pausas de 1 hora

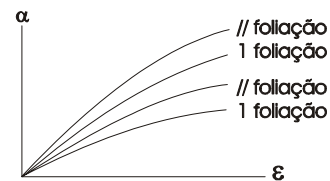


A deformação diminui exponencialmente com o tempo



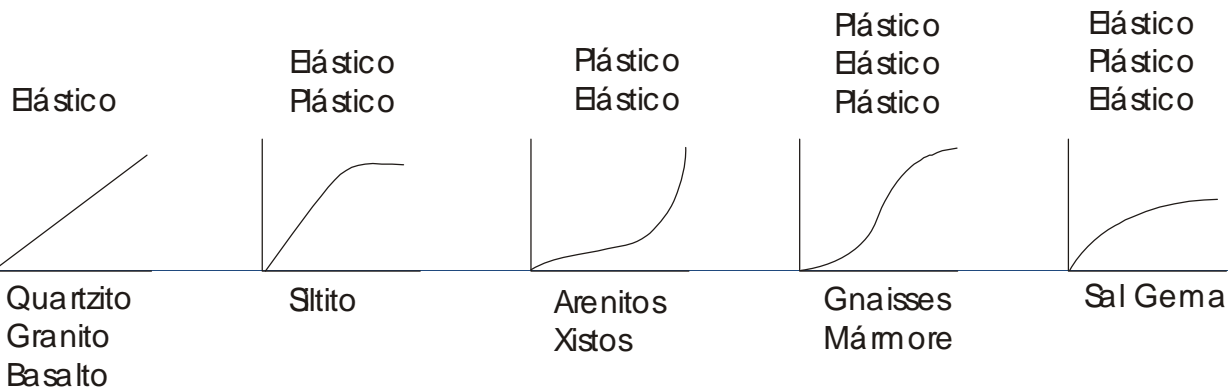
Influência da presença de líquidos

- a) Diminui o limite de resistência, de elasticidade e o esforço máximo;
- b) Uma mesma deformação exige esforços menores se a rocha portar soluções;
- c) Diferentes soluções produzem efeitos diferentes.



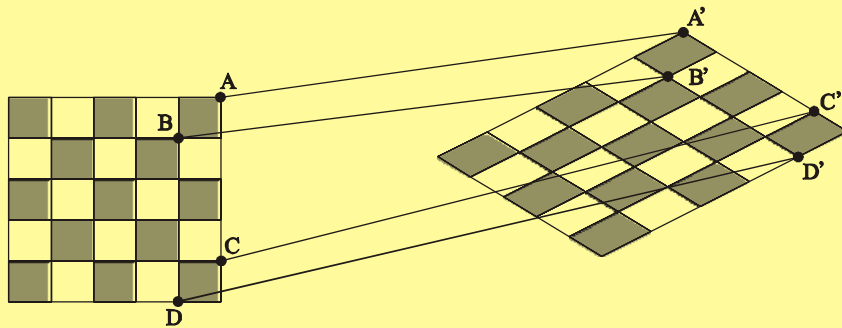
Anisotropia estrutural

Comportamento

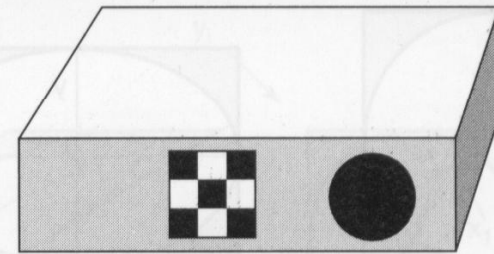
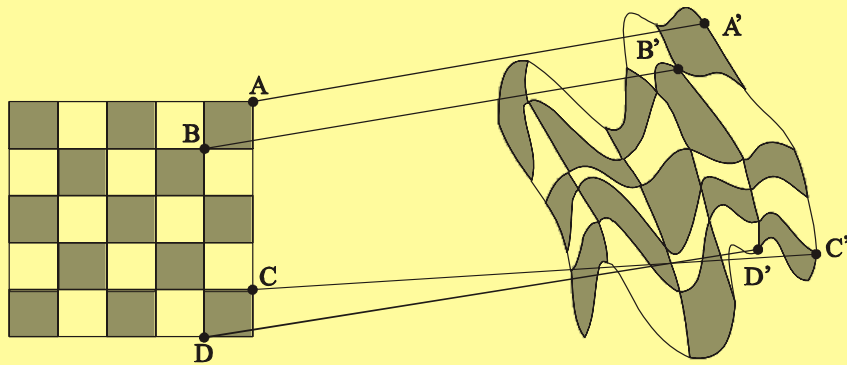


Tipos e Processos de Deformação

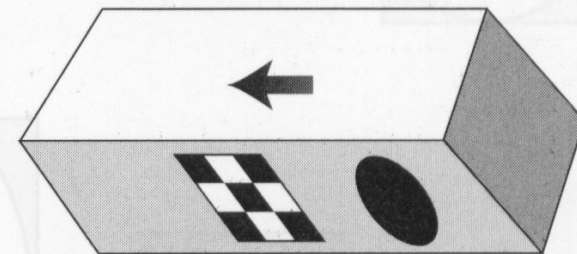
Deformação Homogênea



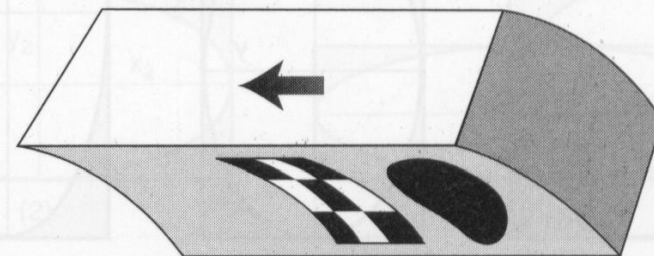
Deformação Heterogênea



(a)



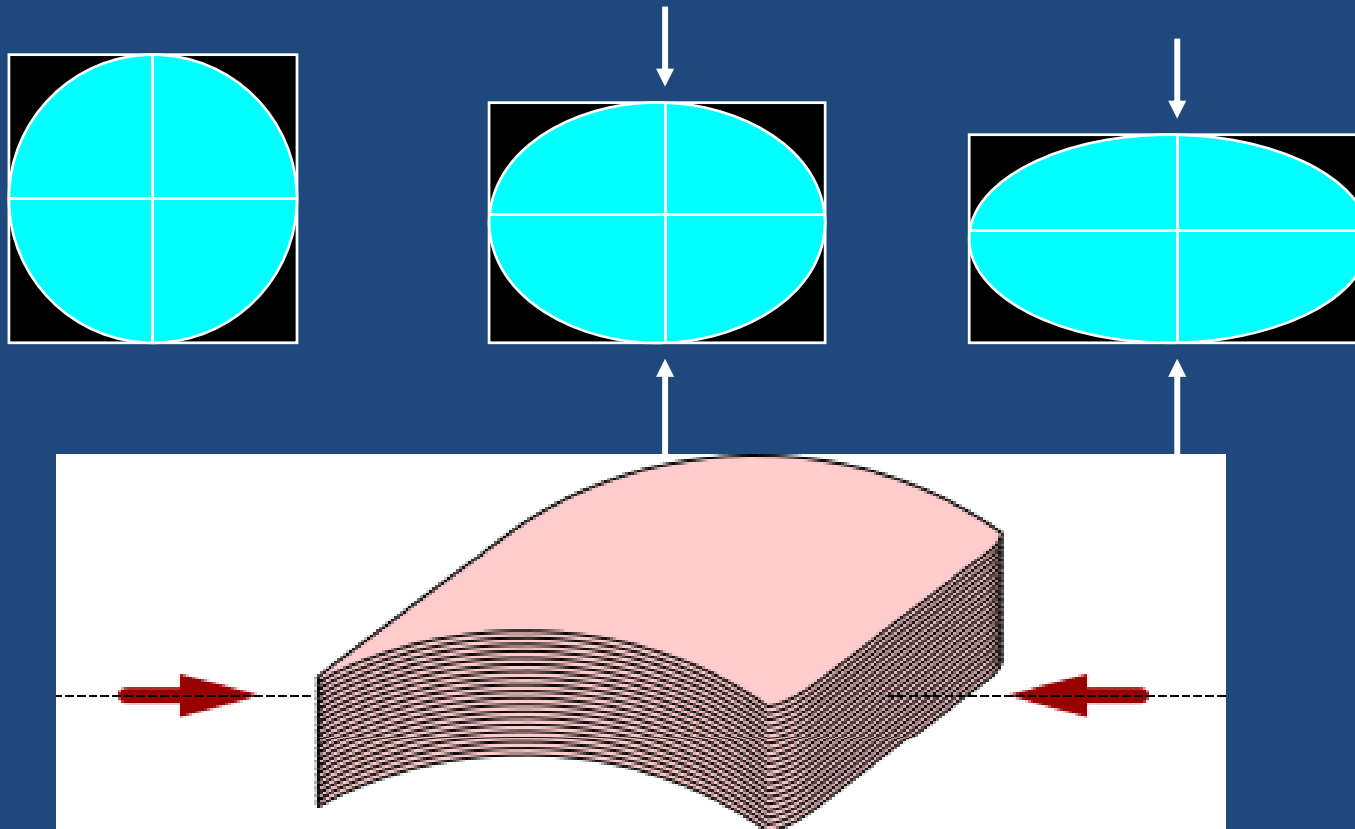
(b)



(c)

Deformação coaxial (ou cisalhamento puro ou deformação não-rotacional)

Estes termos são sinônimos entre si e caracterizam processos de deformação gerados por tensões que se apresentam no mesmo eixo de incidência (coaxial), porém com sentidos opostos.



Deformação não-coaxial (ou cisalhamento simples ou deformação rotacional)

Estes termos também são sinônimos entre si e significam deformação gerada por tensões que se apresentam em diferentes eixos de incidência (não-coaxial), e com sentidos opostos. Este tipo de deformação envolve frequentemente rotação da massa rochosa.

