

GEOLOGIA ESTRUTURAL

Aulas 6

FALHAS: NORMAIS E INVERSAS

Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

FALHAS NORMAIS

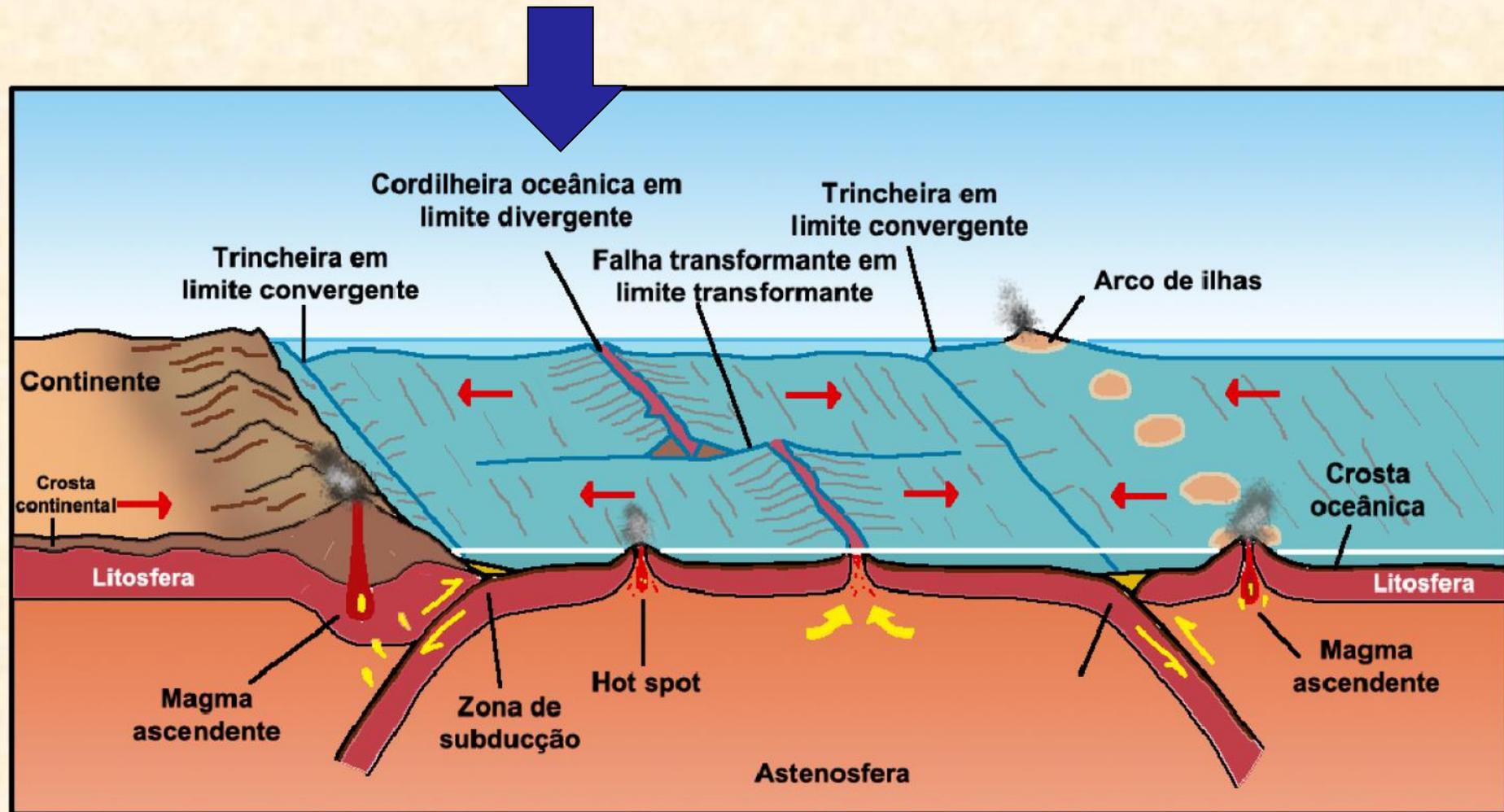
Sistemas Extensionais

INTRODUÇÃO

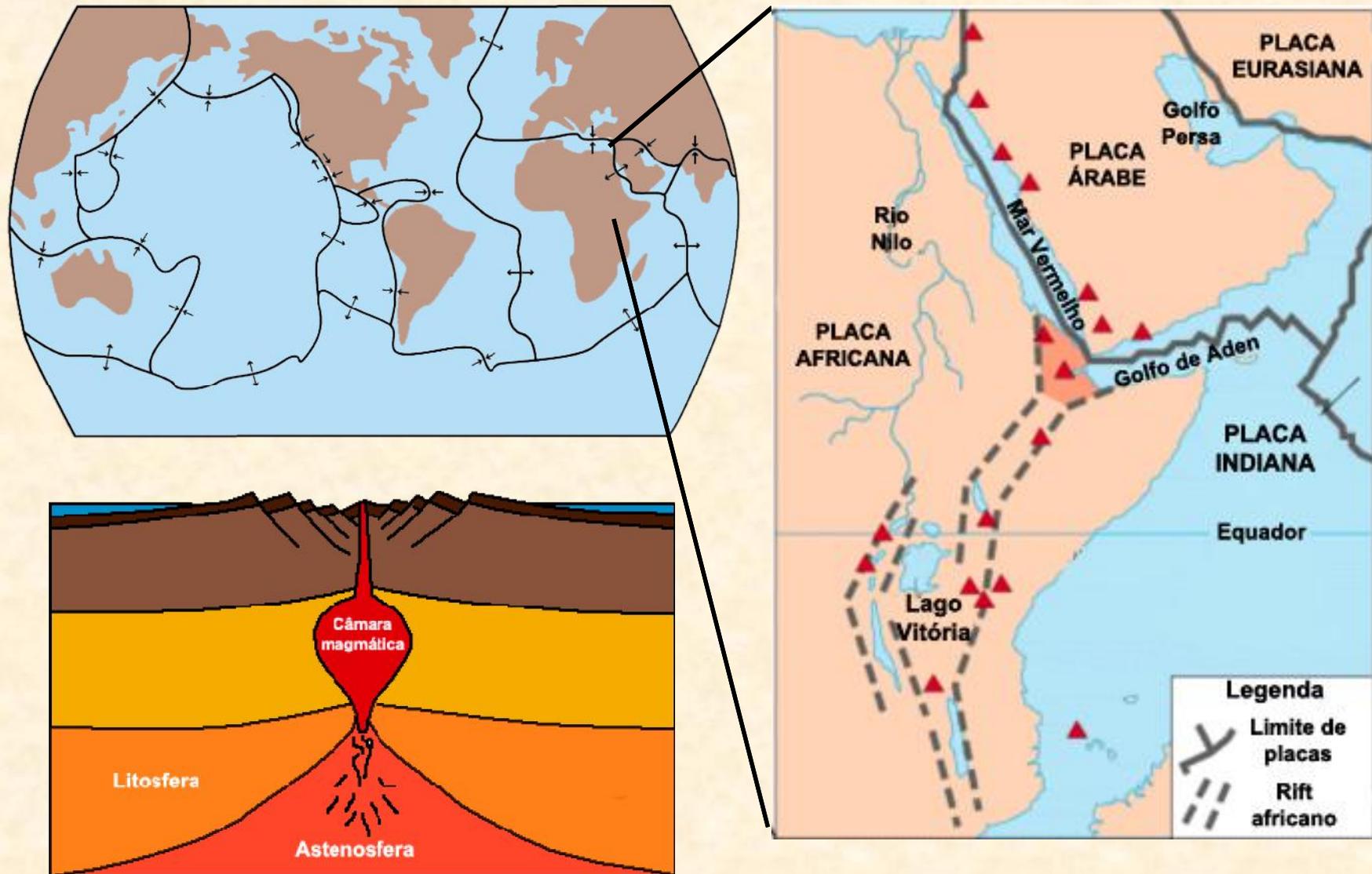
Definições

- As falhas normais geralmente estão inseridas em zonas onde há alívios das tensões, resultando abatimento de blocos. Também podem ocorrer em sistemas transtracionais.
- A existência de um sistema normal pode ser explicada pela reativação de zonas de fraqueza pré-existentes.
- Em geral os mergulhos são médios e podem se estender a profundidades de cerca de 15 ou 20 km, podendo adentrar o domínio dúctil, onde se tornam mais largas.
- Geometricamente um sistema normal pode se encurvar, até tornar-se uma falha única caracterizada como uma zona de descolamento.

Localização de sistemas extensionais (ou tracionais) na crosta:
podem estar em crosta oceânica...



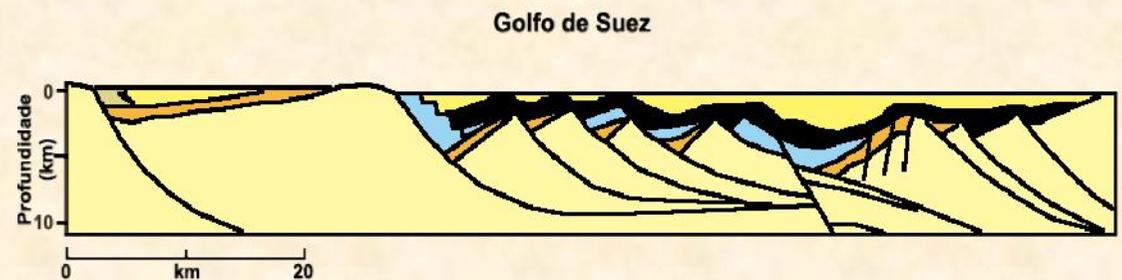
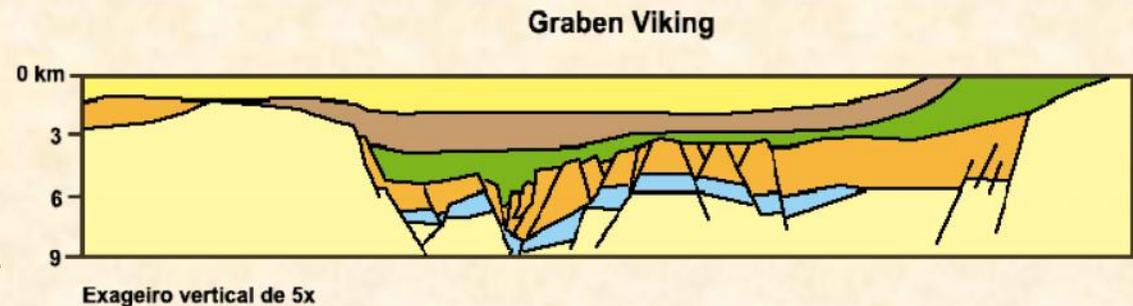
...ou crosta continental (grande rifte do leste da África).



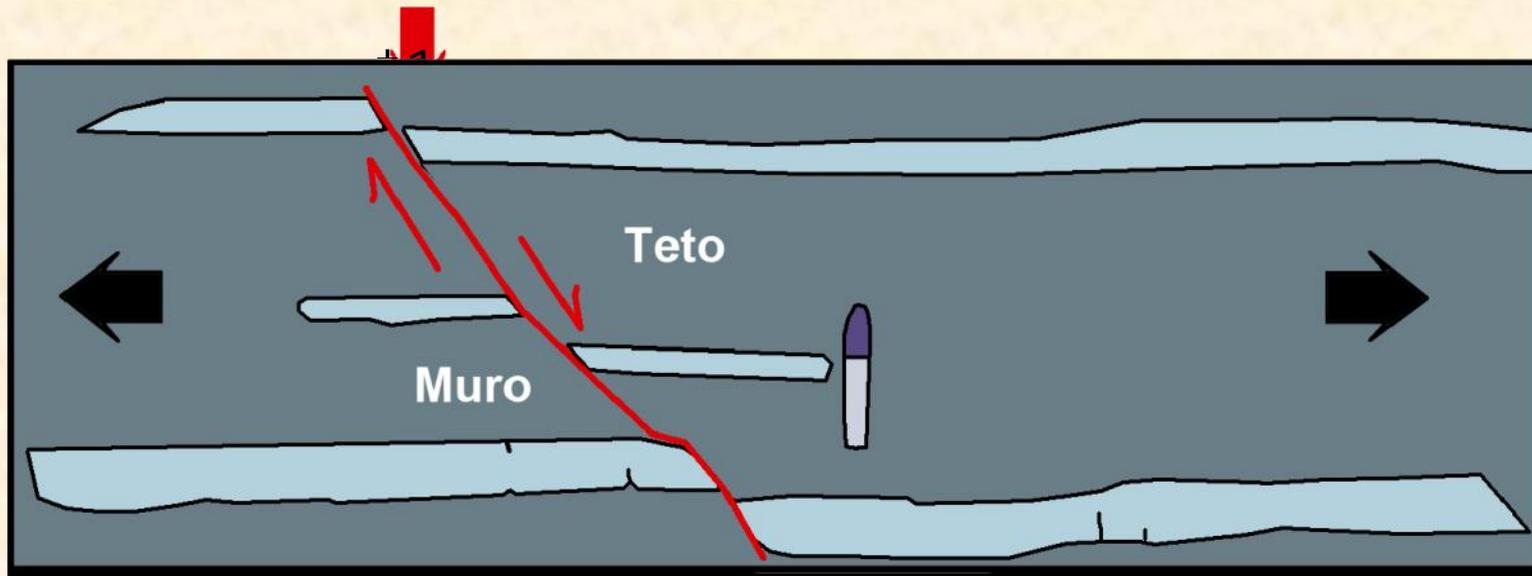
Modificado de: <http://www.uwsp.edu/geo/faculty>

Modos de ocorrência

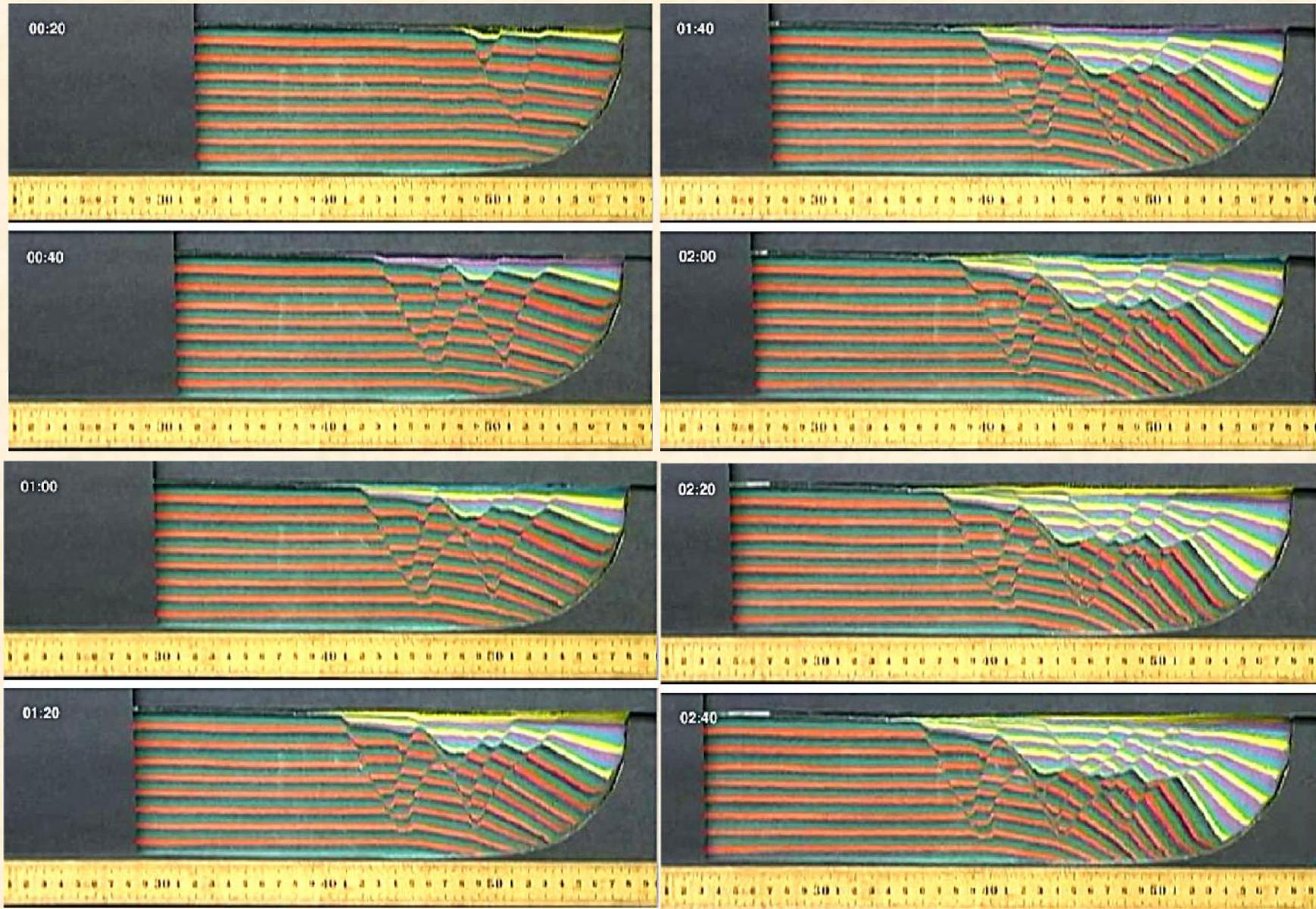
- Falhas normais geralmente ocorrem onde a litosfera está estirada ou afinada.
- São as principais componentes estruturais de muitas das bacias riftes, onde possuem maior significado para a exploração de hidrocarbonetos, p. ex.
- Também podem ocorrer em deltas ou em porções das cadeias onde há grandes escorregamentos ou slumps.

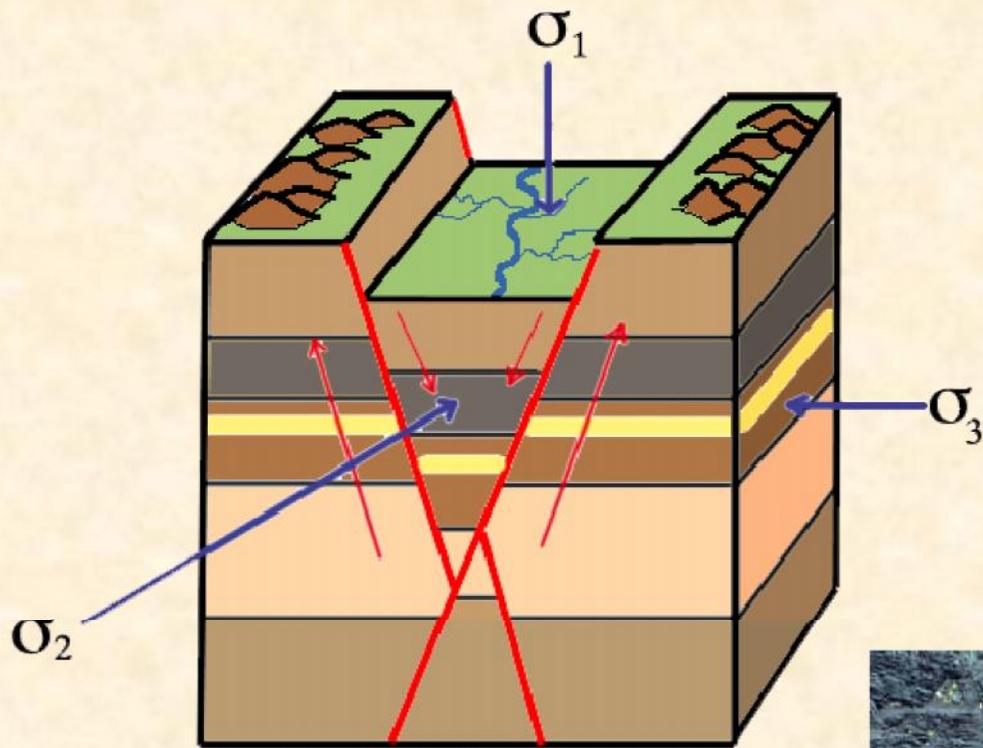


MECANISMO DE EXTENSÃO



Ensaio laboratorial em modelo reduzido, simulando a formação de hemi-graben





Posição dos eixos de tensão
(modelo andersoniano)

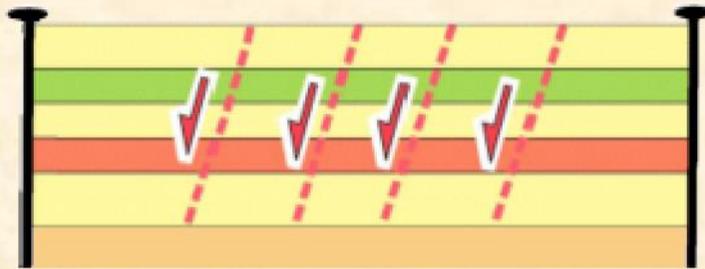


ARRANJOS GEOMÉTRICOS

- O arranjo das zonas normais separa cunhas, lascas ou escamas acunhadas e encurvadas na base. Esse arranjo é chamado de lístrico e as cunhas compõem o denominado leque imbricado distensivo, quando ultrapassa alguns quilômetros de profundidade.
- Se a profundidade da falha é pequena, pode ocorrer o padrão trapezoidal, ou a geometria em dominó, ou então falhas rotacionais, comuns na distensão.
- É comum a ocorrência de horsts e grabens como estruturas associadas às zonas distensivas (ou transtrativas), bem como a variação típica de hemi-grabens, que podem ser controlados como falhas lístricas.

Falhas em dominó

Falhas normais



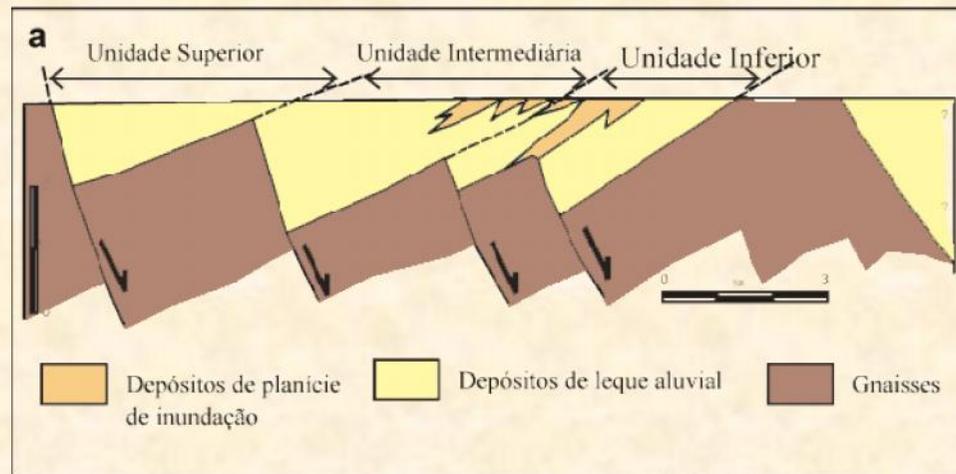
Efeito
Dominó

falhas e blocos rotacionam



Modificado de: <http://earth.leeds.ac.uk>

Metassedimentos falhados - Elba
(Itália). Foto: L.Chavez-Kus



Modelo de preenchimento de cunhas conglomeráticas em falhas normais lístricas



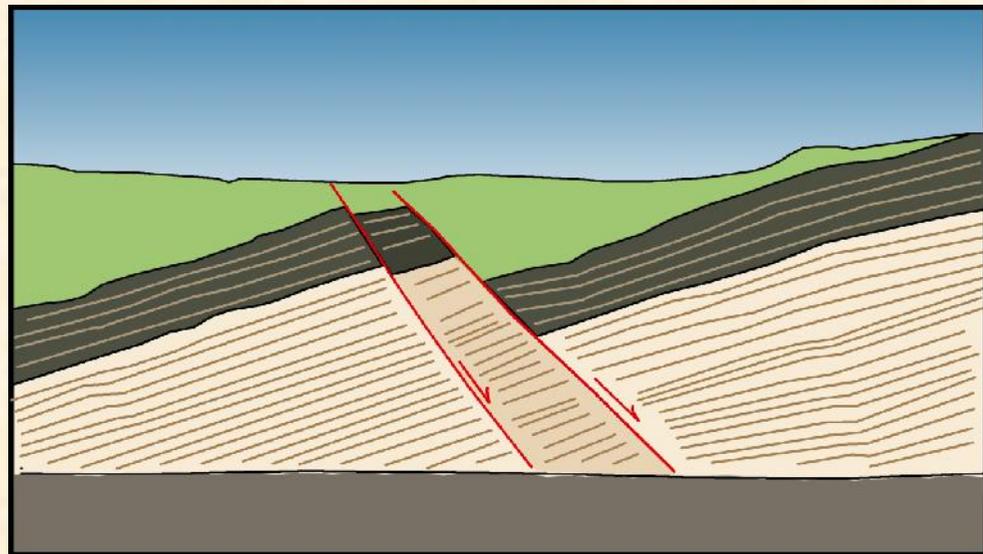
Sistema de falhas em dominó com atitude média de N80E e estrias com mergulho em torno de 45° para SE, em sedimentos Terciários da Bacia de Volta Redonda.
(Fonte: A. Gontijo, 1999 – Tese de Doutorado)

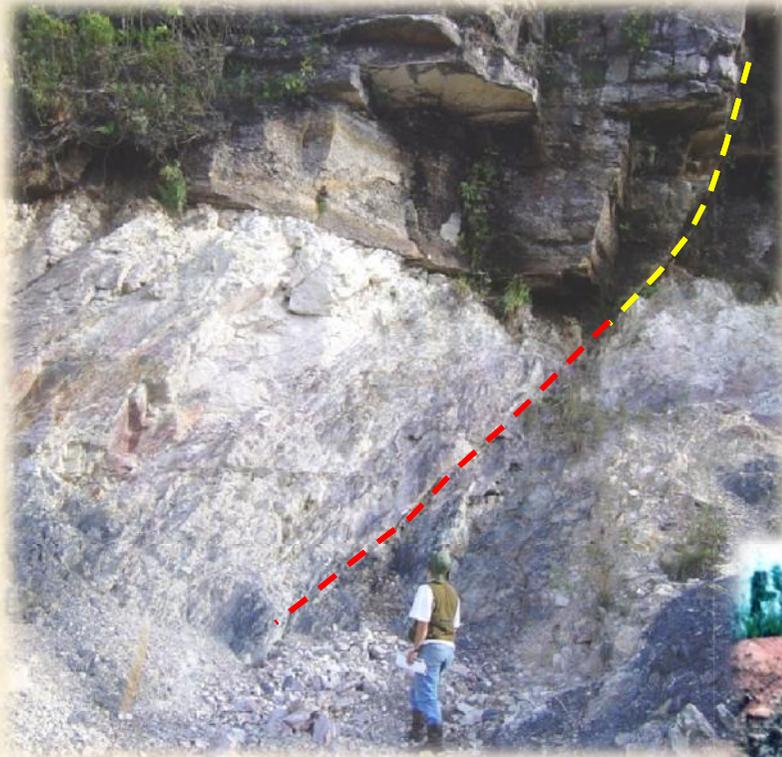


Metassedimentos dos Apeninos - Vieste (IT). Foto: L. Chavez-Kus

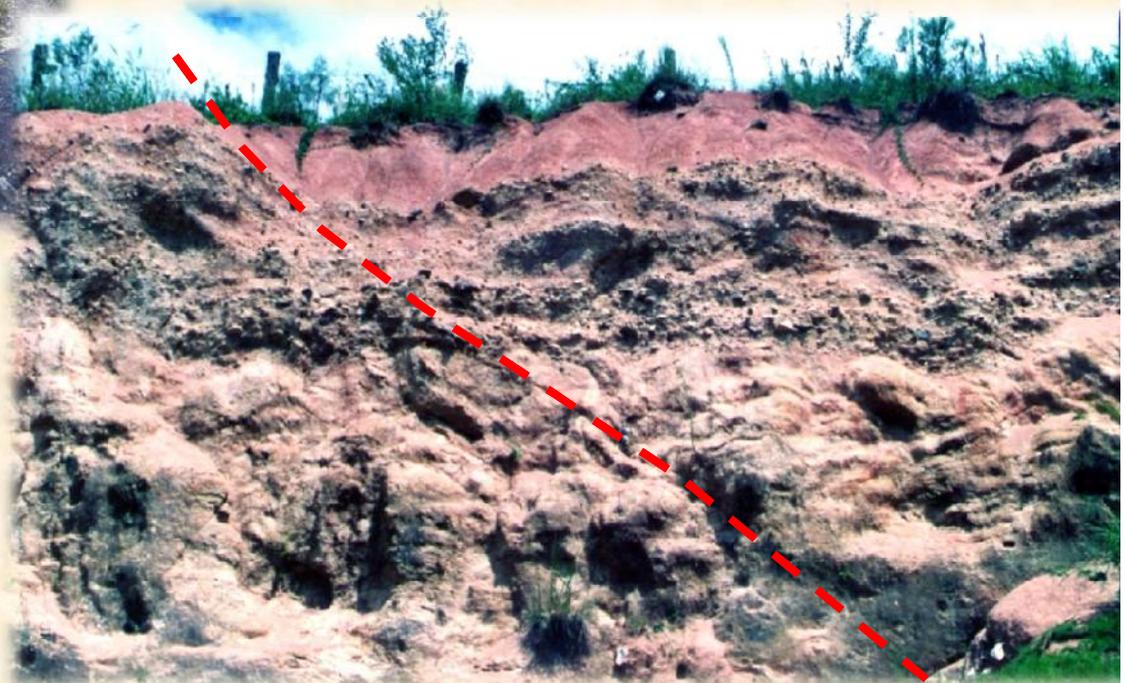


Metassedimentos da Formação Capiru , Grupo Açungui – Rio Branco do Sul (PR). Foto: E. Salamuni



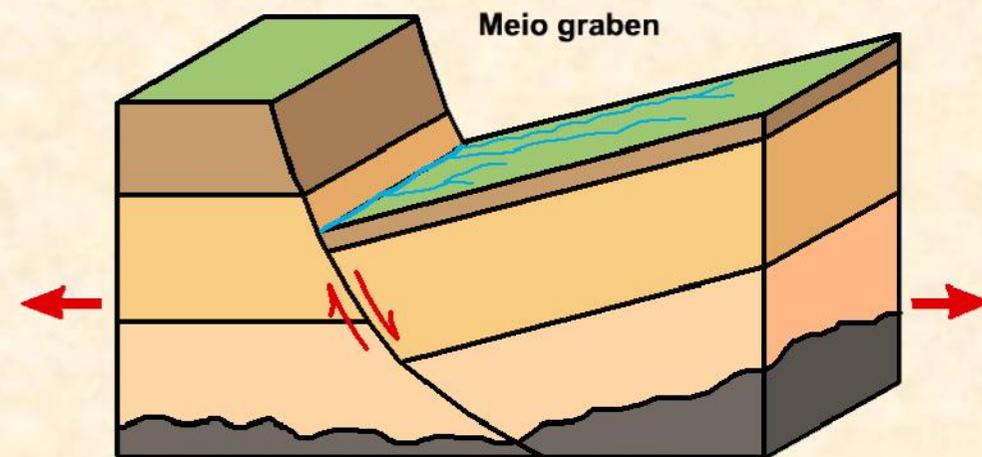
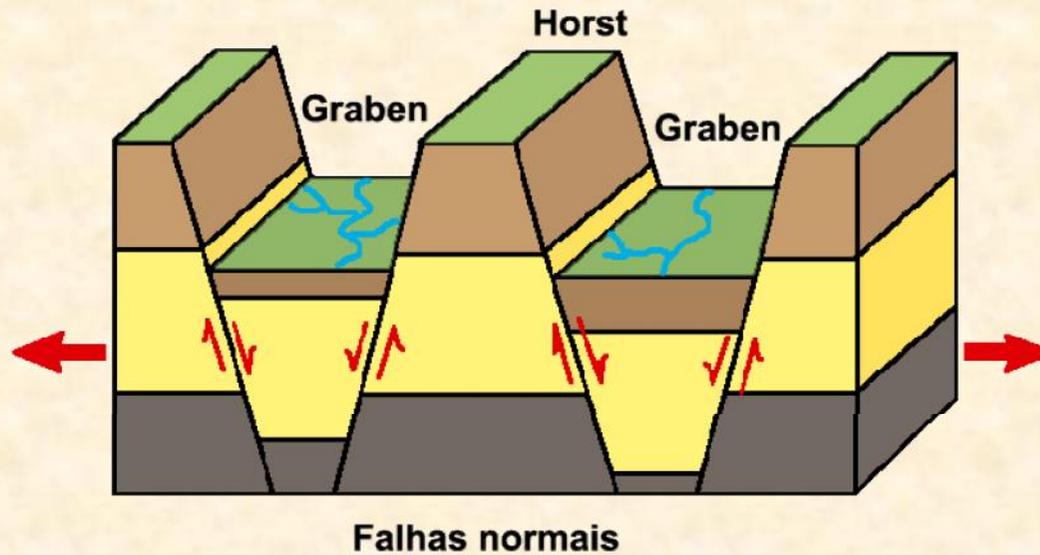


Arenito da Formação Furnas
sobreposto a metassedimentos da
Formação Capiru - Campo Largo
(PR). Foto: E. Salamuni



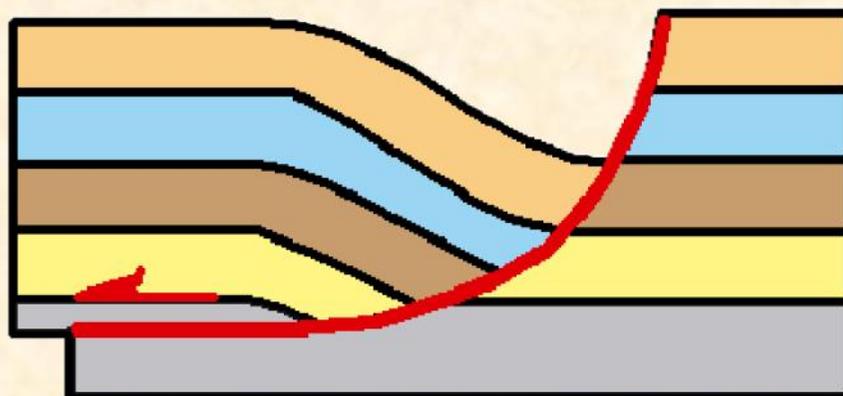
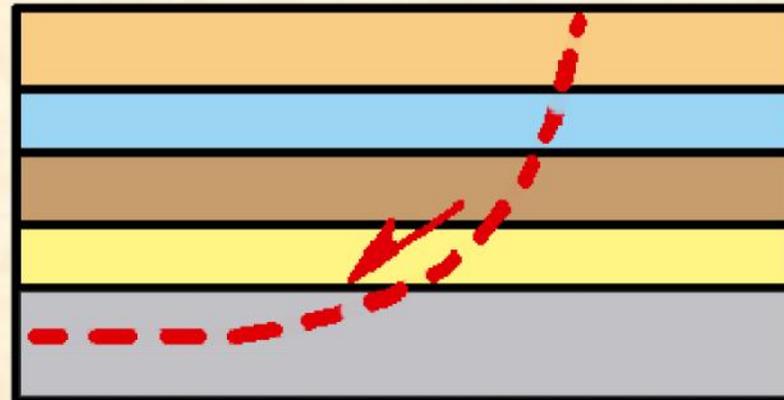
Formação Guabirota –
Curitiba (PR). Foto: E.
Salamuni

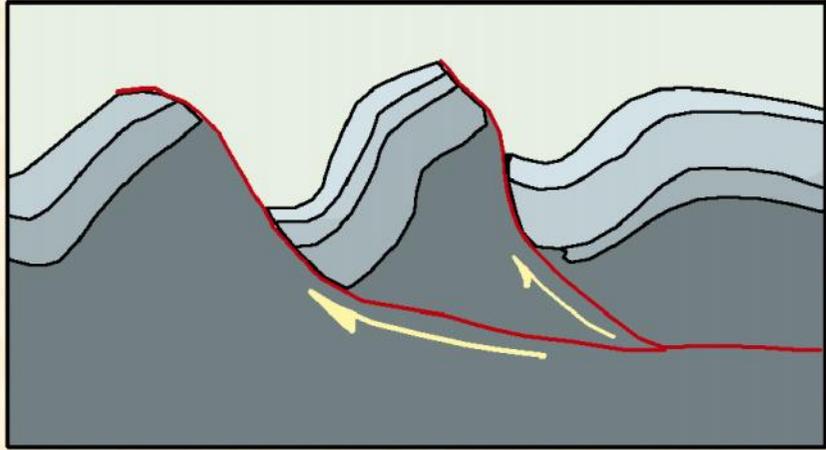
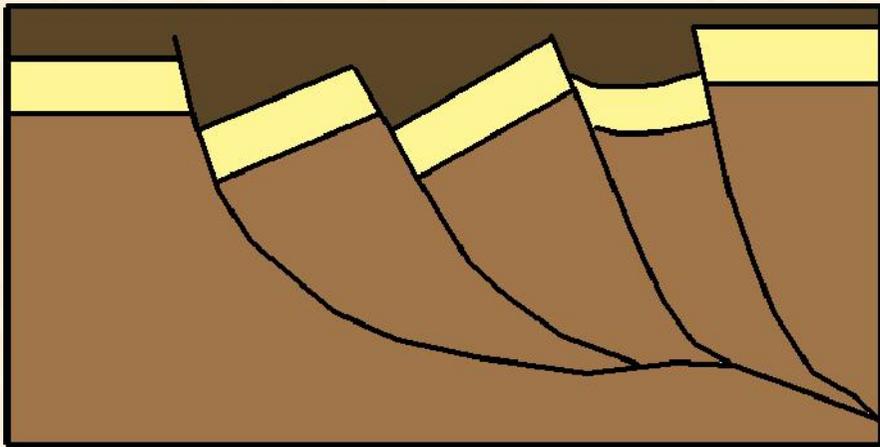
Grabens, horsts e hemi-grabens são típicas estruturas regionais desenvolvidas em sistemas extensionais (ou tracionais), que incluem também falhas normais rotacionais.



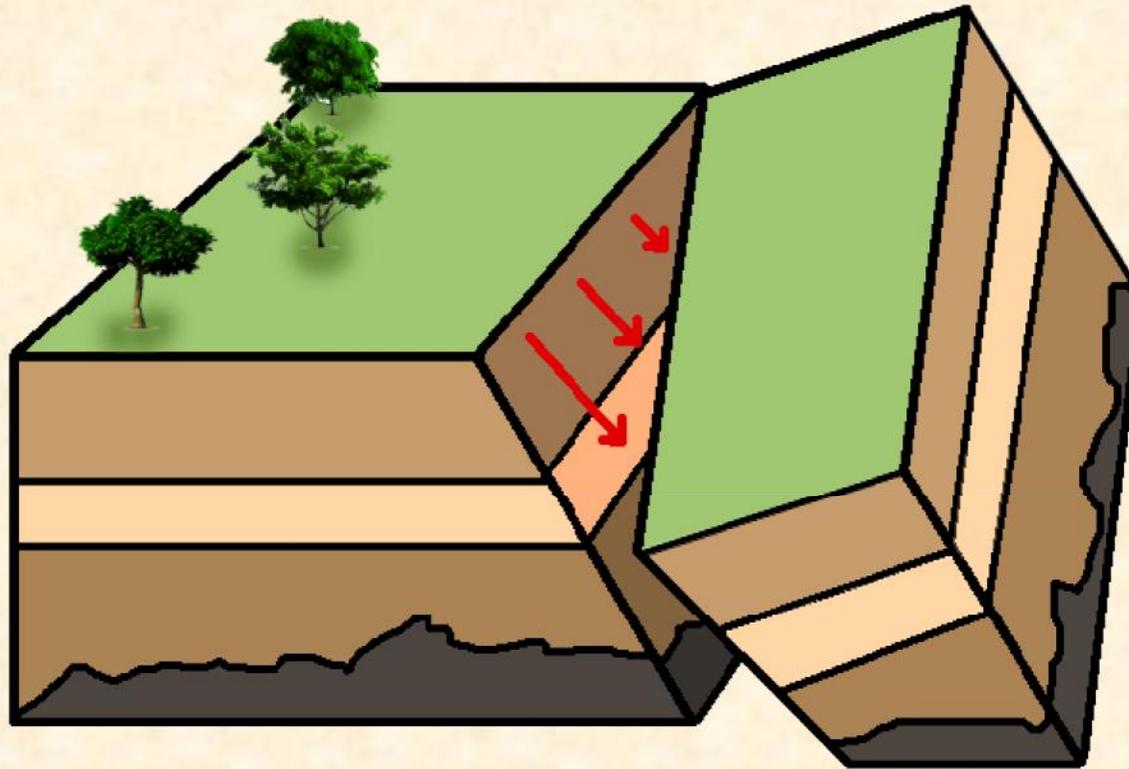
Falhas lítricas

Lítrico
=
"forma de colher"





Falhas Rotacionais



Falhas normais rotacionais são muito comuns em sistemas geológicos que envolvem a extensão (tração). Em geral envolvem movimentos direcional subsidiário

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

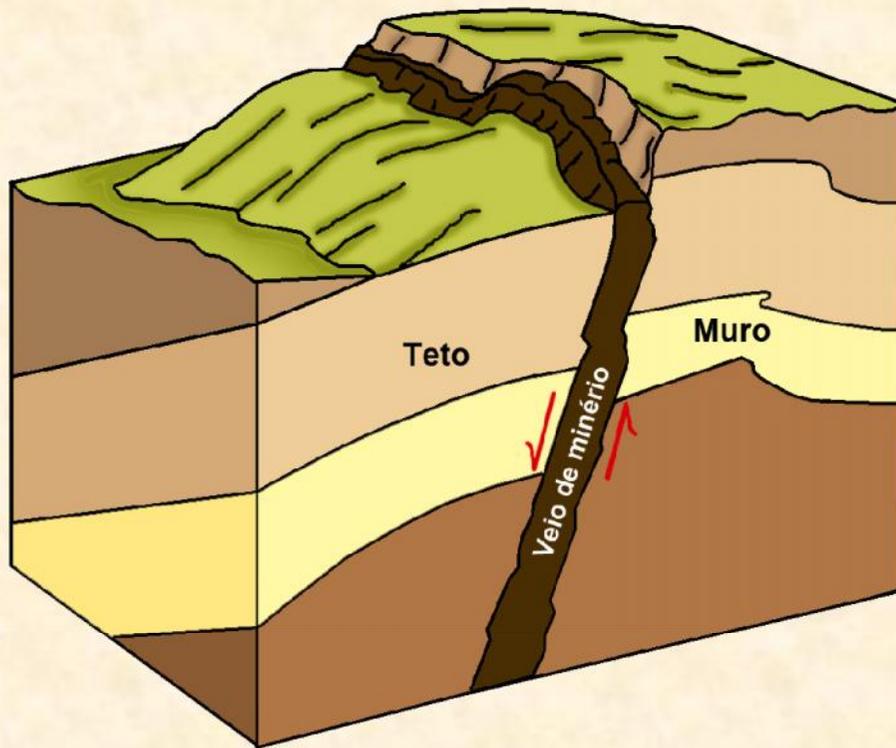
- Em escala local, nas zonas de falhas normais, é possível a ocorrência de brechas, gouges e cataclasitos, já que comumente os sistemas normais estão no nível estrutural superior e até atingem a superfície. Há possibilidade, contudo, que ocorram protomilonitos e milonitos, onde a falha de descolamento atinge níveis estruturais inferiores. Pseudotaquilitos também são observados neste tipo de regime.
- São frequentemente caracterizar-se como descolamentos (detachments), apesar do termo ser um tanto vago. Os descolamentos podem expor rochas de alto grau metamórfico na sua base (muro).
- Falhas normais podem ser importantes caminhos para a exposição atual de rochas de núcleos sedimentares.

ESTRUTURAS GEOLÓGICAS ASSOCIADAS



- Devido a ocorrência de um conjunto de falhas normais há desenvolvimento de bacias sedimentares de pequeno e grande porte, por exemplo, em um ambiente rifte, onde a sedimentação é variada em termos composicionais.

(Baseado em Leeder & Gawthorpe, 1987 in Coward, M.P. et al. (eds) Continental Extensional Tectonics, Geological Society Special Publications, 28)



- Possibilidade de desenvolvimento de estruturas e veios mineralizados

- Desenvolvimento de espelhos de falha de grande porte (superfícies lisa, retilíneas ou onduladas)



MORFOESTRUTURAS ASSOCIADAS

Escarpa de falha normal nos Andes. Neste caso há exposição de milonito-gnaisses do núcleo do embasamento.



Deslocamentos de serras e ou cristas



(Foto: autoria anônima)

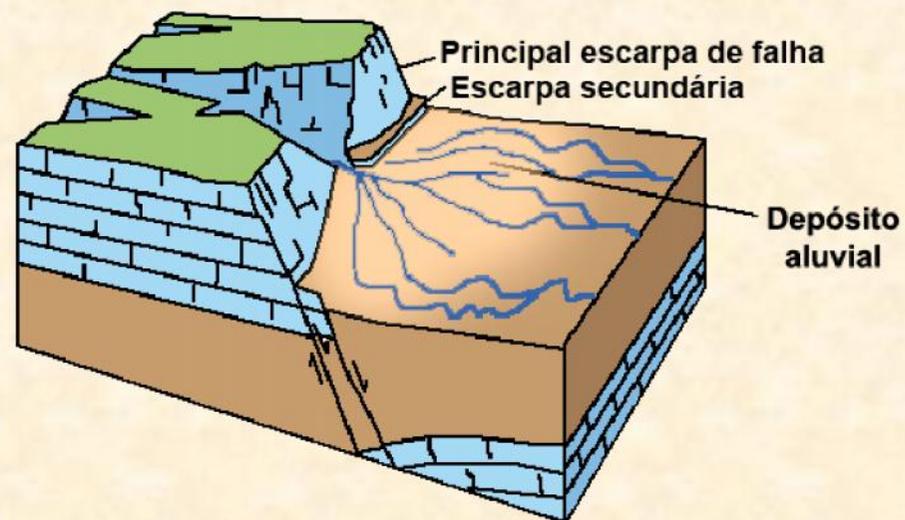
Presença e evolução de escarpas



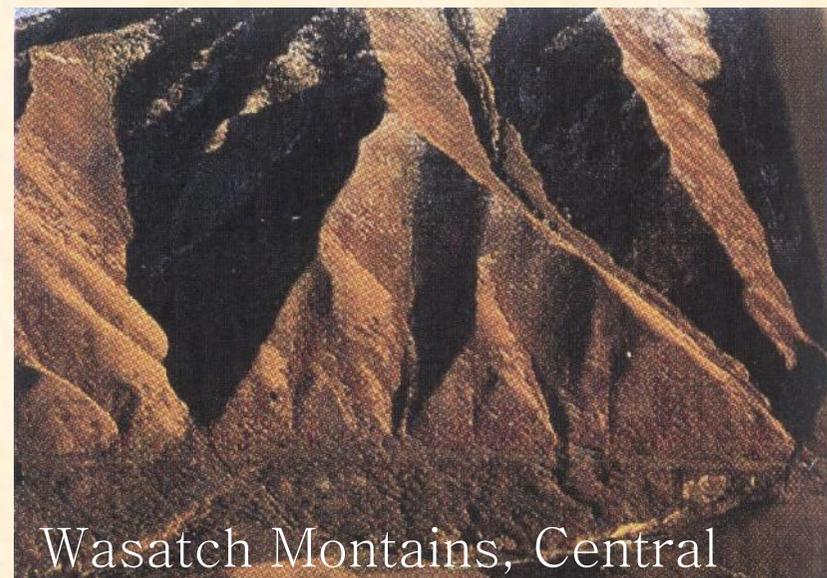
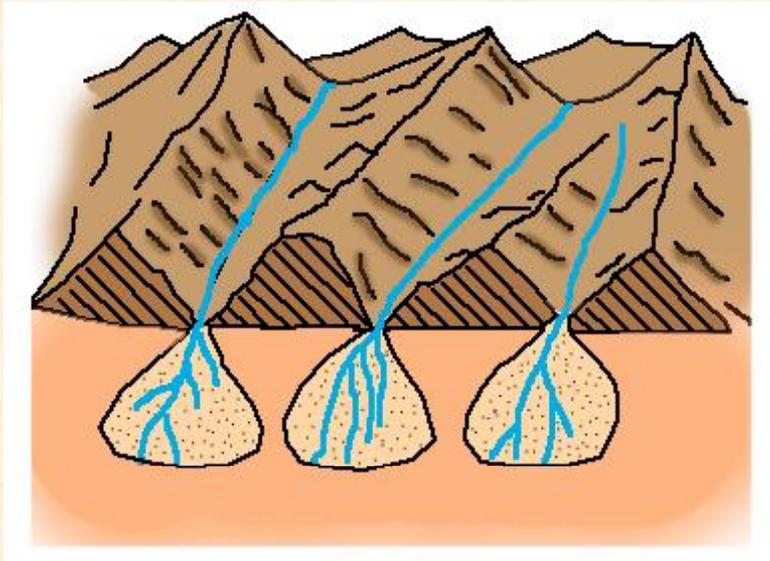
(Foto: XXXXX)



(Foto: autoria anônima)

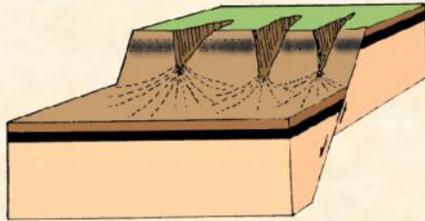


Facetas triangulares e/ou trapezoidais

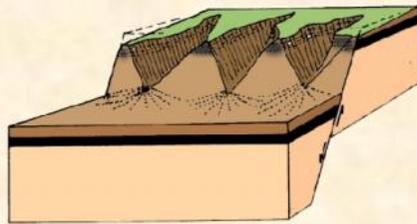


Wasatch Montains, Central
Utah

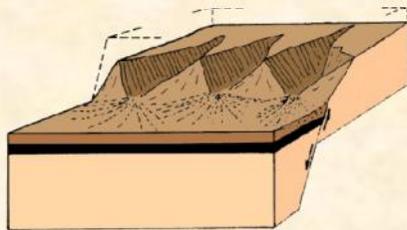
Bloco diagrama mostrando a evolução de facetas trapezoidais e triangulares



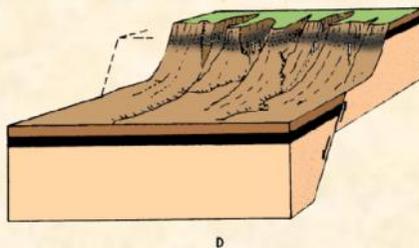
Escarpa de falha original (primitiva) parcialmente dissecada, com facetas trapezoidais



Dissecação mais avançada, as facetas tornam-se triangulares



Escarpa recua e as facetas ficam menos íngremes



Recuo pronunciado da escarpa e destruição avançada das facetas

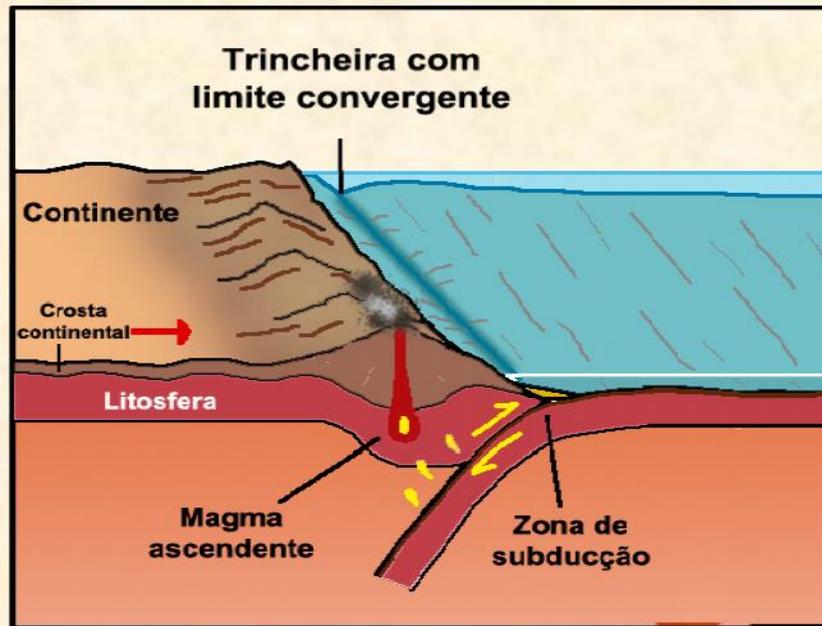
(Baseado em Loczy & Ladeira, 1980; Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica)

FALHAS INVERSAS

Sistemas de Empurrão ou Cavalgamentos (Thrusts System)

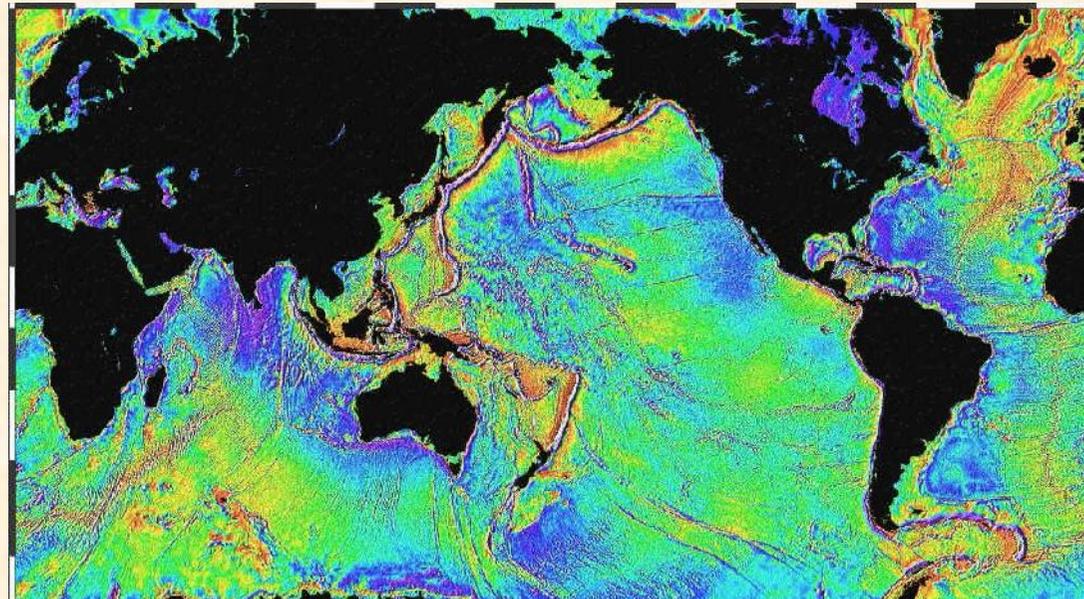
INTRODUÇÃO

- Empurrões e cavalgamentos (thrust belts) são definidos por superposição vertical de duas séries de estratos cuja sucessão não é normal. Portanto há contato inverso, onde estratos mais novos podem recobrir os mais antigos ou então o horizonte de um estrato qualquer pode estar justaposto a si próprio:
 - (a) No caso de rochas sedimentares, se tratará de uma sucessão que não se encontra conforme as leis da estratigrafia: a série superior está formada por rochas mais antigas que a série inferior.
 - (b) No caso de rochas cristalinas, como o diagnóstico é mais difícil já que a sucessão normal dos tipos de rochas é complexa, depende frequentemente das hipóteses existentes a respeito de sua gênese.



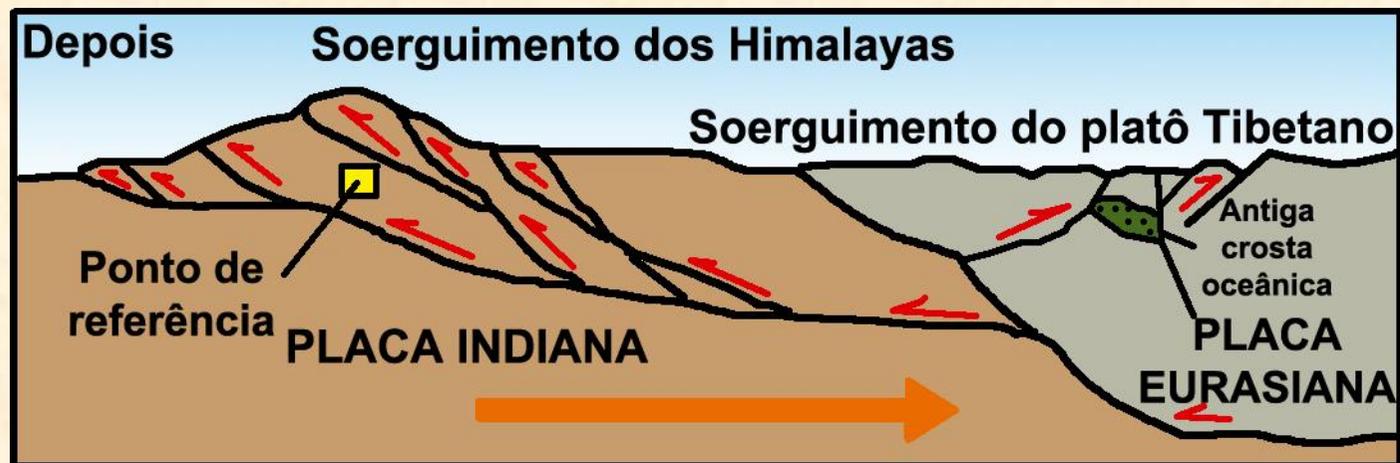
Sistemas compressivos geram grandes faixas ou cinturões de cavalgamento nos zonas orogenéticas.

Falhas inversas e nappes são comuns em cadeias de montanhas nas bordas de placas convergentes.

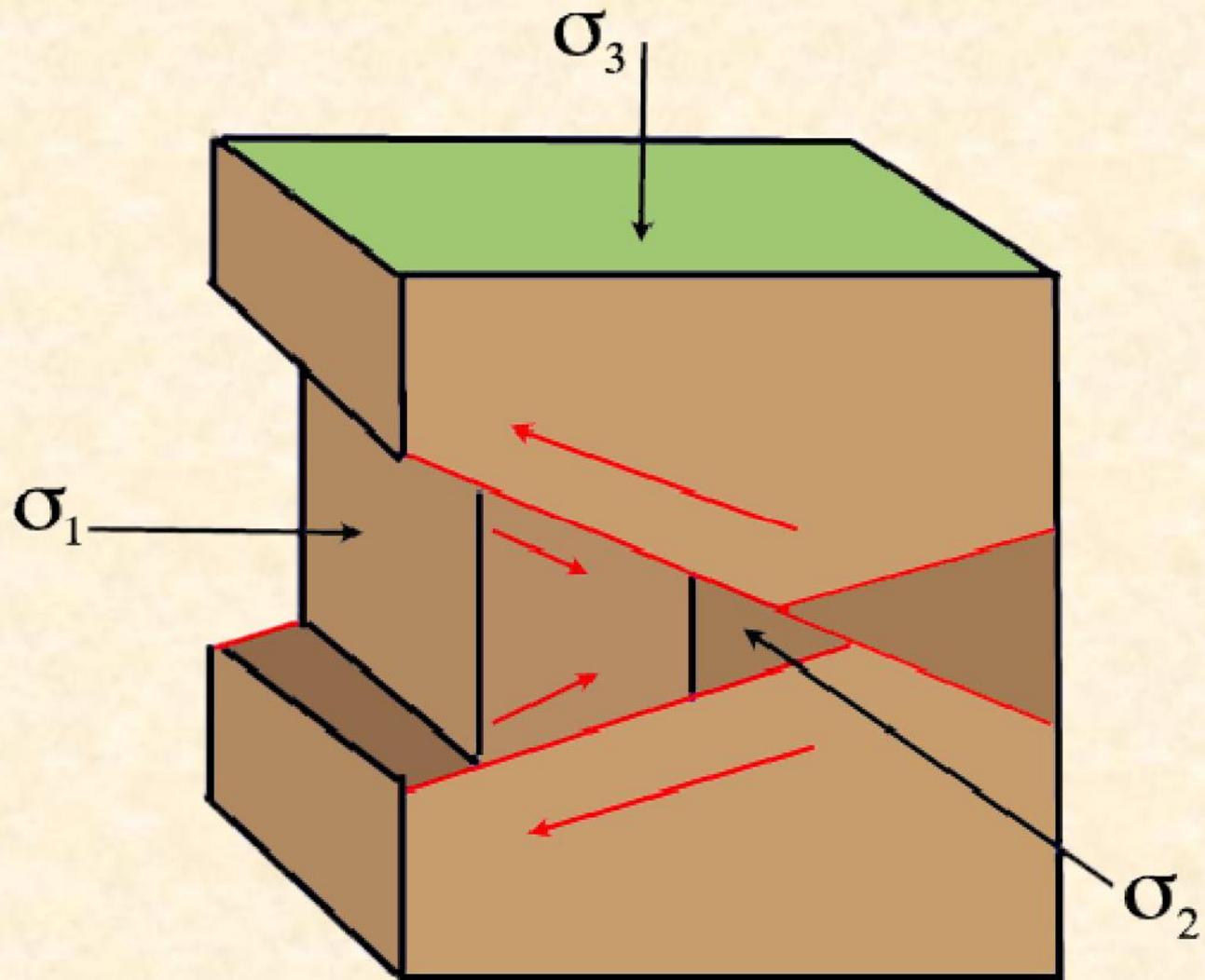


-
- Falhas inversas (empurrão) ou de cavalgamento são formadas em função de um stress compressivo horizontal e causam encurtamento e espessamento da crosta.
 - Em função do teto deslocar-se, em movimento relativo para cima do muro, a maior parte das falhas mostra rochas mais velhas sobre as mais novas.
 - Falhas de cavalgamento apresentam, tipicamente, baixos ângulos (entre 10° e 40°). Todavia, podem seccionar a estratigrafia na forma de rampas, com mergulhos consideravelmente variáveis, até altos ângulos.
 - Falhas associadas a dobramentos podem gerar falhas inversas de baixo ângulo.

Exemplo da cadeia himalaiana



Posicionamento
dos eixos de
tensão em
modelo de
falhas inversas
(Anderson,
1942)



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



Exemplos em rochas sedimentares e metassedimentares



Sedimentos da Formação Guabirotuba.
Fotos: E. Salamuni



Metasedimento. Fotos: autoria anônima

ALGUMAS DEFINIÇÕES: CAVALGAMENTOS E NAPPEES

- Os cavalgamentos propriamente ditos, correspondem a unidades tectônicas de dimensões modestas (pequenas) e alcance limitado e quase sempre pertencem ao mesmo domínio paleogeográfico (os mergulhos são $<30^{\circ}$). Sua característica principal é de se apresentar enraizados axialmente, ou seja, em seus extremos há geração sucessiva de uma dobra-falha, dobra normal ou até a uma terminação perianticlinal. Por este enraizamento se estabelece a continuidade entre a unidade cavalgada e a unidade cavalgante.
- Há produção de milonitos e/ou brechas: a milonitização se dá quando as rochas são plásticas e a deformação ocorre em um nível estrutural mais profundo enquanto que a brechação ou cataclase ocorre pelo intenso atrito entre os planos de falha em nível estrutural mais raso.

-
- As nappes correspondem a unidades tectônicas de grandes dimensões, localizadas em alguns cinturões orogenéticos, tais como o Alpino. Normalmente as superfícies autóctones e alóctones pertencem a domínios paleogeográficos diferentes, ou seja, não há enraizamento axial de tal maneira que não se pode reconstruir a continuidade entre o que é autóctone e que é alóctone.
 - O movimento horizontal de um dos conjuntos de camadas explica a superposição observada e a noção de recobrimento.
 - Por convenção a unidade superior é denominada de superfície alóctone com relação ao local onde foi encontrada, por ter sofrido transporte.
 - A superfície inferior será autóctone caso não tenha possibilidade de transporte. Há encurtamento crustal acentuado em nappes e cavalgamentos em função dos movimentos horizontais das massas continentais e conseqüente esforços trancenciais.

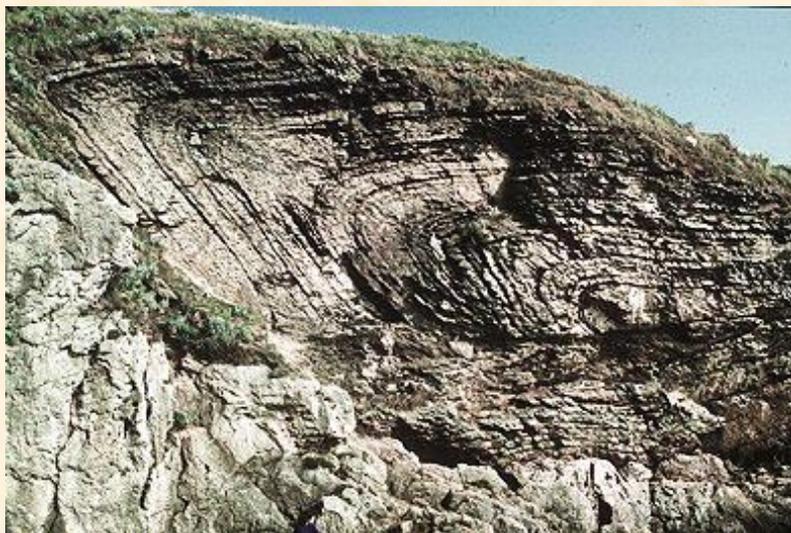
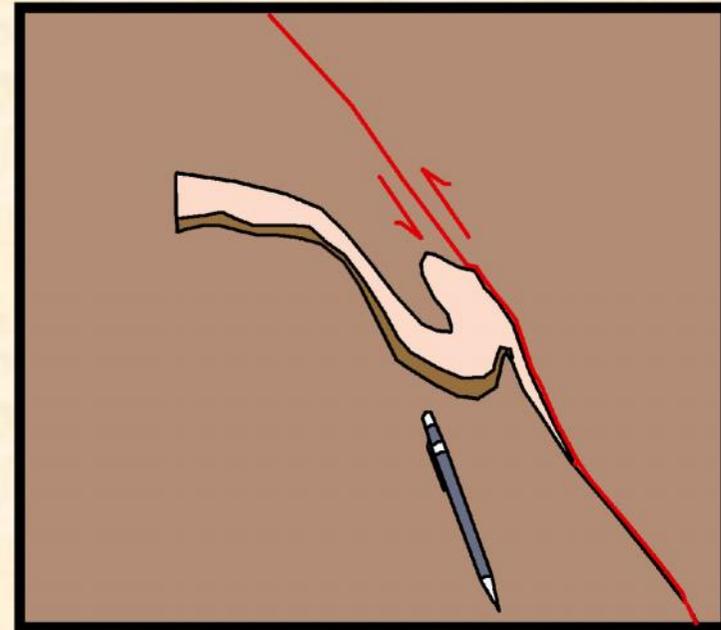
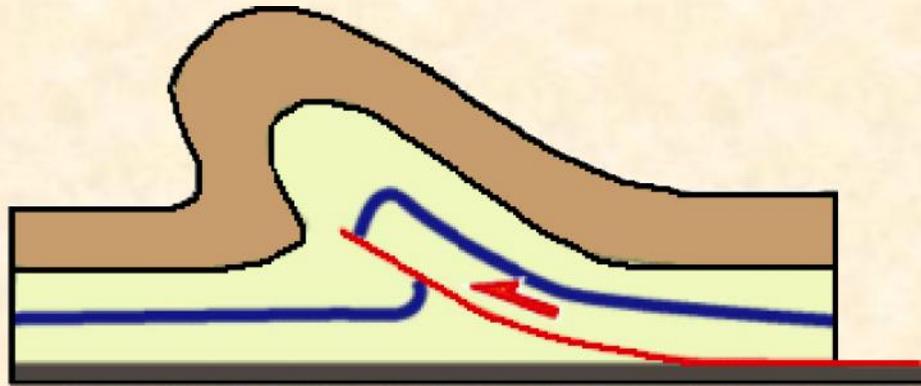
TIPOS PRINCIPAIS DE CAVALGAMENTOS

(a) Falhas inversas ($<30^{\circ}$) ou falhas de cavalgamento propriamente ditas.

(b) Dobras-falhas (ou dobras cavalgantes): melhor observadas em rochas sedimentares ou metassedimentares onde há intercalação granulométrica. São indicativos do sentido de movimento.

(c) Escamas de coberturas: são unidades cavalgantes em cuja base se situa um nível estratigráfico determinado, em geral sem flanco invertidos, normalmente curtas, enraizadas axialmente.

Geração de dobras em zonas de cavalgamentos: dobras-falhas



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

Metassiltito da Formação Capiru, Grupo Açungui – Almirante Tamandaré (PR).
(Foto: E. Salamuni)

FEIÇÕES ESTRUTURAIS AO LONGO DE FALHAS DE CAVALGAMENTO OU DE EMPURRÃO

- Falhas sub-paralelas múltiplas, onde há ramificação da falha principal formando fatias e escamas de falhas.
- Ocorrência de falhas transcorrentes e fraturas na base da superfície de carreamento, transversais à direção de cavalgamentos.
- Dobras associadas podem ser oriundas de arrastos ou ser imediatamente precedidas às falha de empurrão (os dois processos podem ocorrer em um mesmo evento).
- Os mergulhos dos empurrões são irregulares. Em regiões de topografia acidentada, quanto menor o ângulo da superfície da falha mais sinuoso será seu traço em mapa (Vs bem abertos nos vales). Falhas de ângulos mais altos mostram Vs mais fechados quando são cortados por um vale.

Recobrimento entre camadas de mesma idade

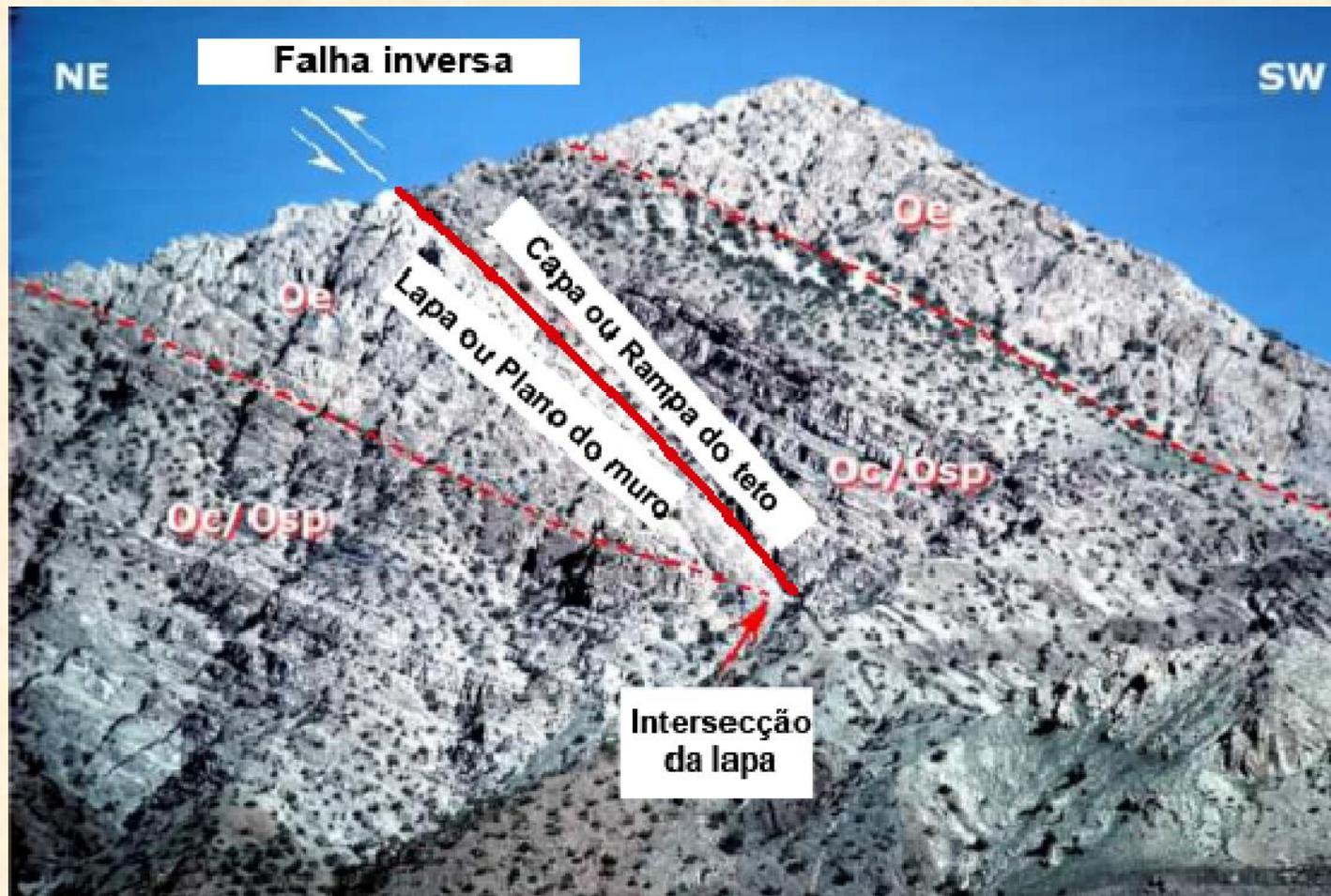
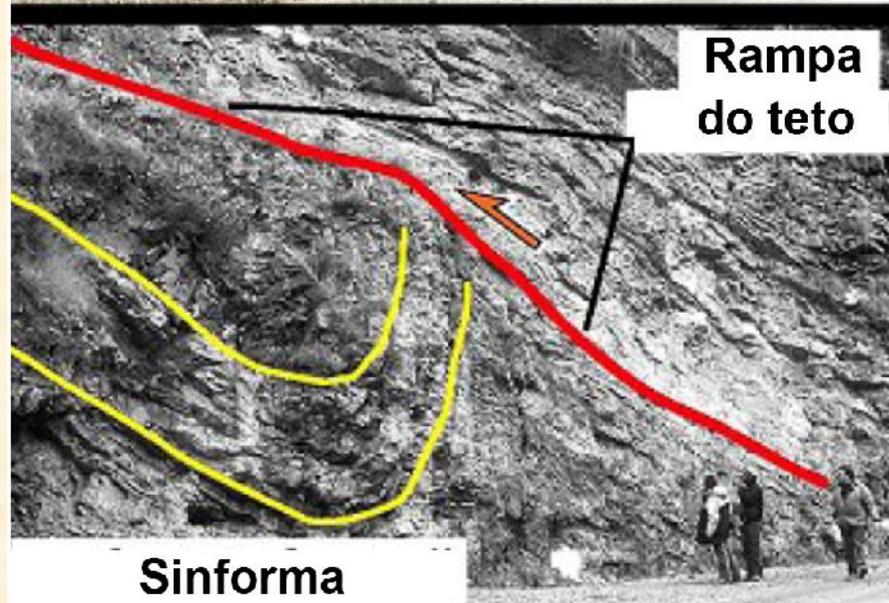


Foto: autoria desconhecida

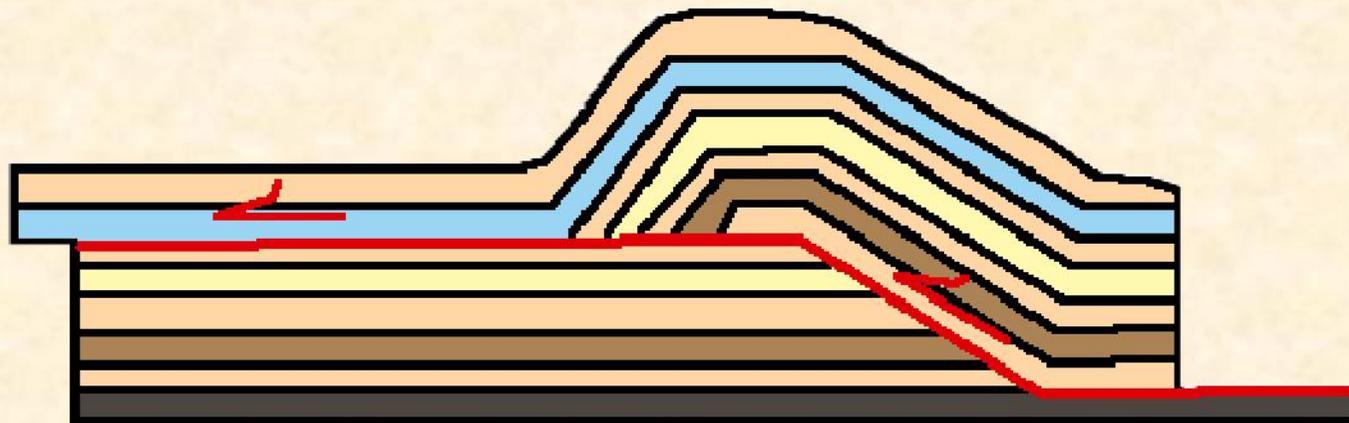
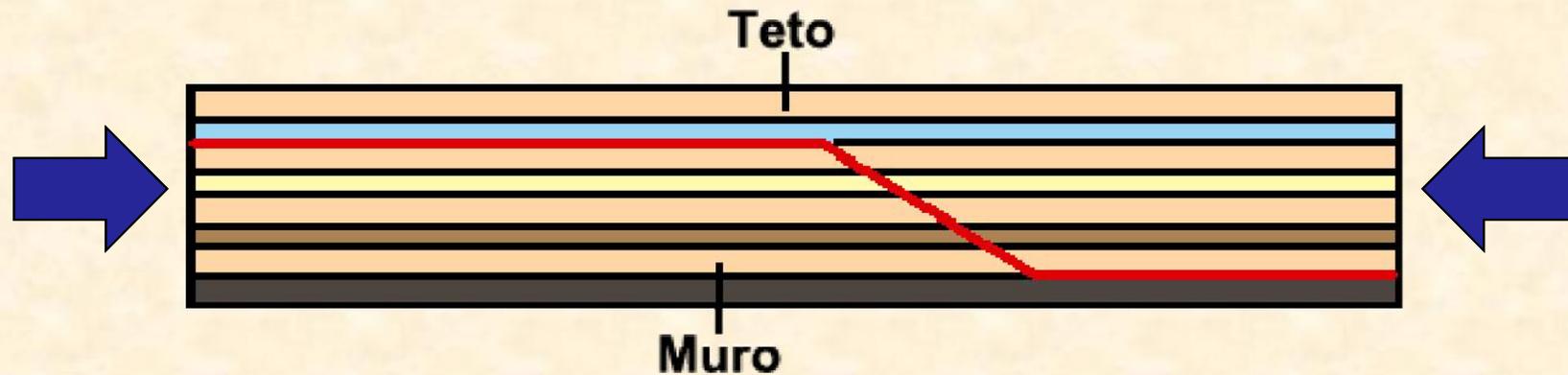
Estilo de dobras diferenciadas, em zonas de cavalgamento



SISTEMAS DE EMPURRÃO (THRUSTS SYSTEMS)

- Thrusts são falhas contracionais, ou seja, falhas que encurtam o acamamento (ou a superfície referencial). Apresentam características de falhas inversas e de cavalgamento formando um sistema no qual ocorrem diversos planos de falhas. Apresentam-se também como leques imbricados ou duplexes, podendo ser subdivididos em cinco tipos principais.
- Os empurrões apresentam uma geometria em lascas ou fatias e seu arranjo compõe o leque imbricado. As zonas de cisalhamento que limitam as lascas diminuem seus mergulhos em profundidade e juntam-se numa zona única maior denominada de empurrão basal. Se houver correspondência ao limite inferior da massa rochosa é chamada de zona de descolamento (detachment).
- As falhas de empurrão, em tese, apresentam ângulos menores que 45° .

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



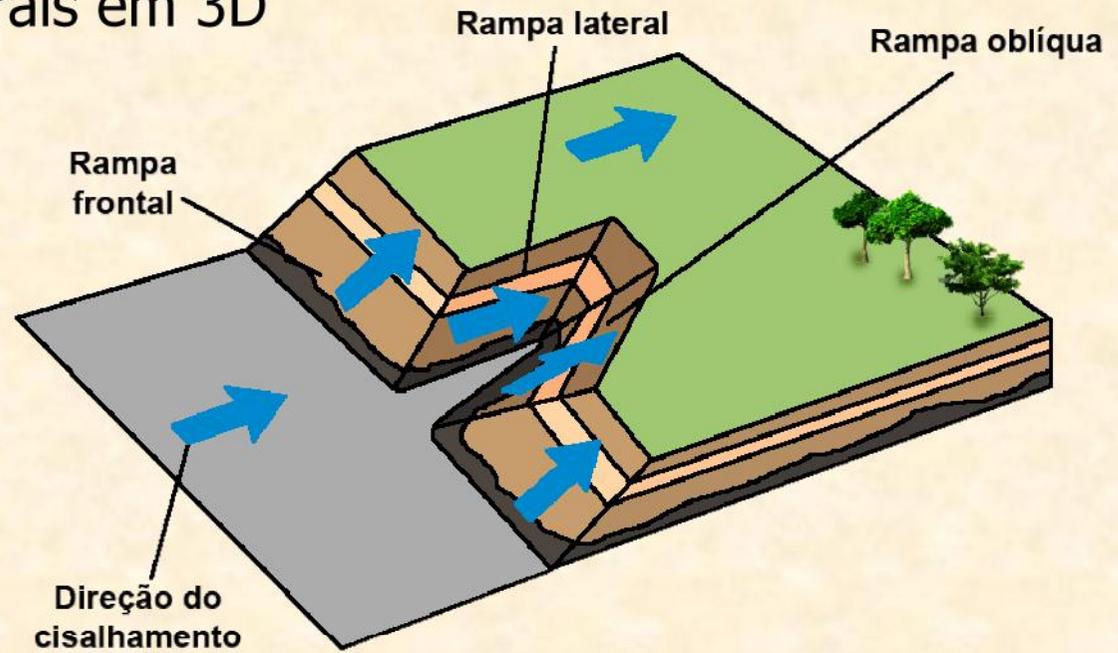
A base do muro permanece indeformada

Rampas frontais e o empurrão

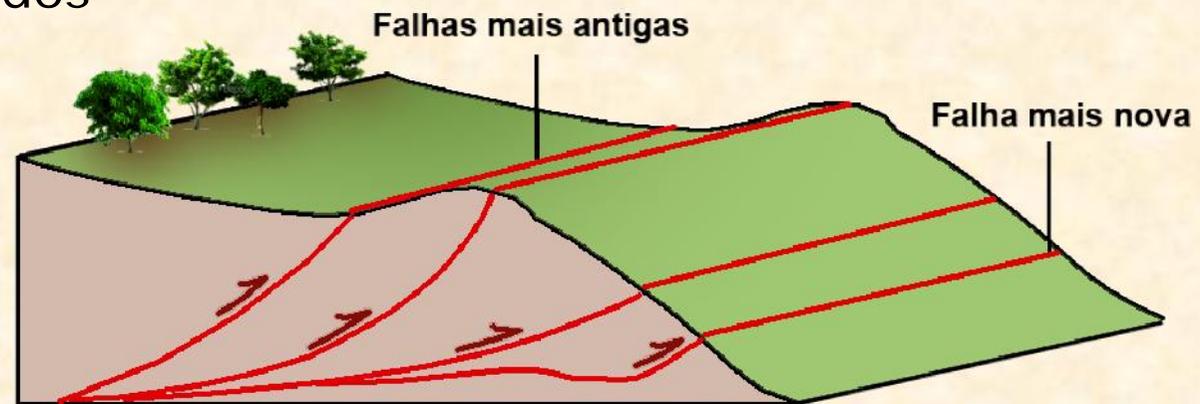


Foto: autoria desconhecida

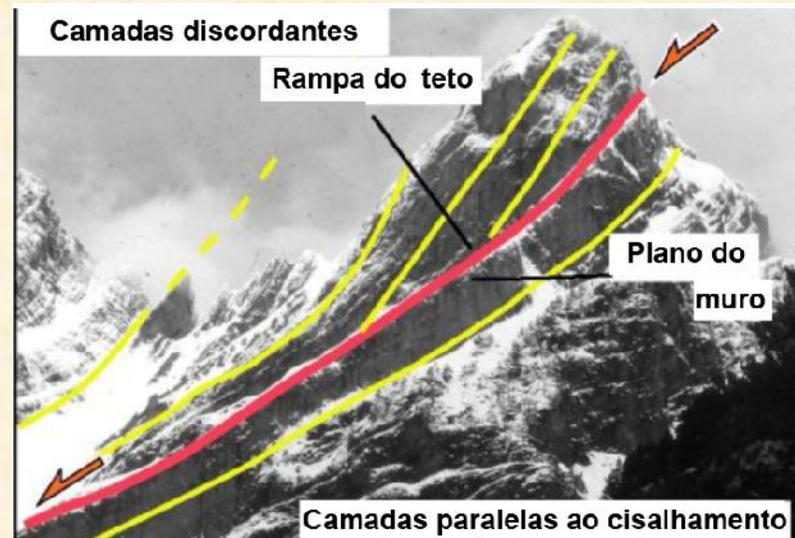
Rampas frontais e laterais em 3D



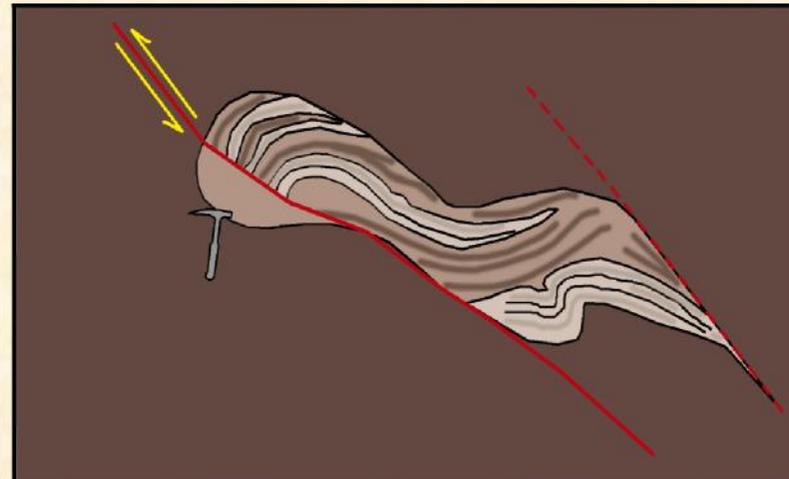
Leques imbricados



Grandes lascas de camadas posicionadas no sentido estratigráfico inverso

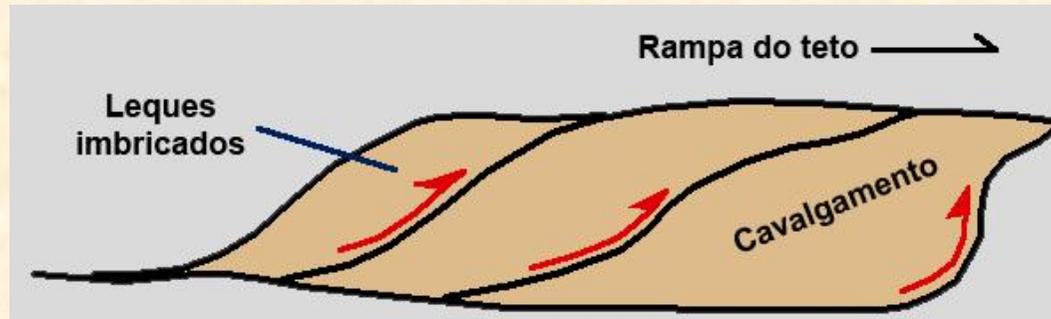


<http://earth.leeds.ac.uk>



Xistos quartzosos da Formação Betara, Complexo Setuva – Itaperuçu (PR). (Foto: E. Salamuni)

Leques imbricados 2

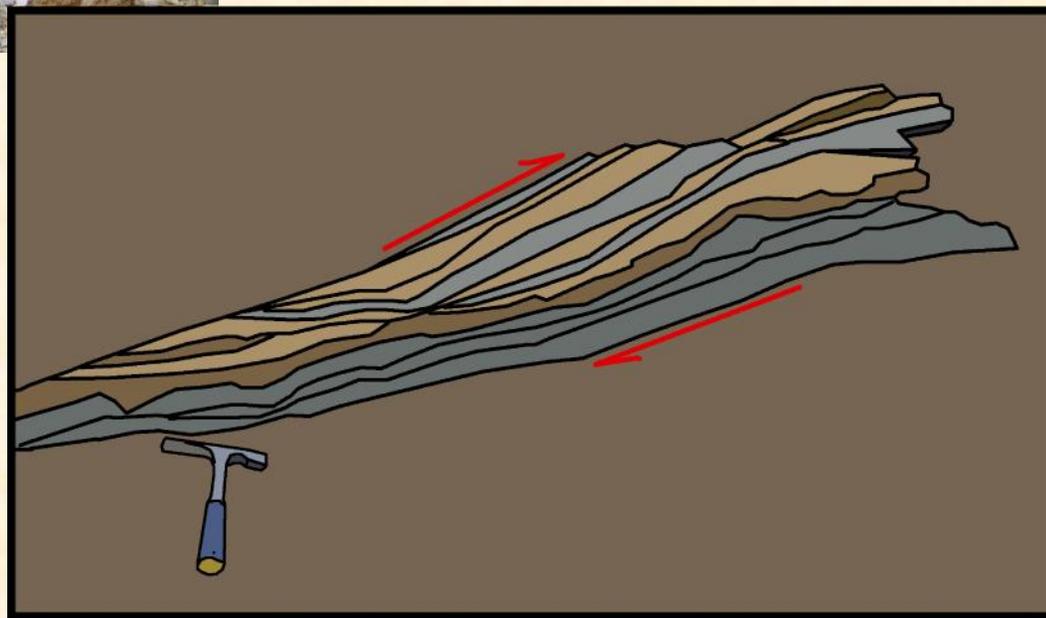


Quartzitos da Formação Betara, Complexo Setuva – Itaperuçu (PR). (Foto: E. Salamuni)

Leques imbricados 3



Metarenitos da Formação Capiru,
Grupo Açungui– Bocaiúva do Sul
(PR). (Foto: E. Salamuni)



Back thrusts (empurrões reversos)

