

GEOLOGIA ESTRUTURAL

Aulas 5

FRATURAS: JUNTAS E FALHAS

Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

FRATURAS: JUNTAS

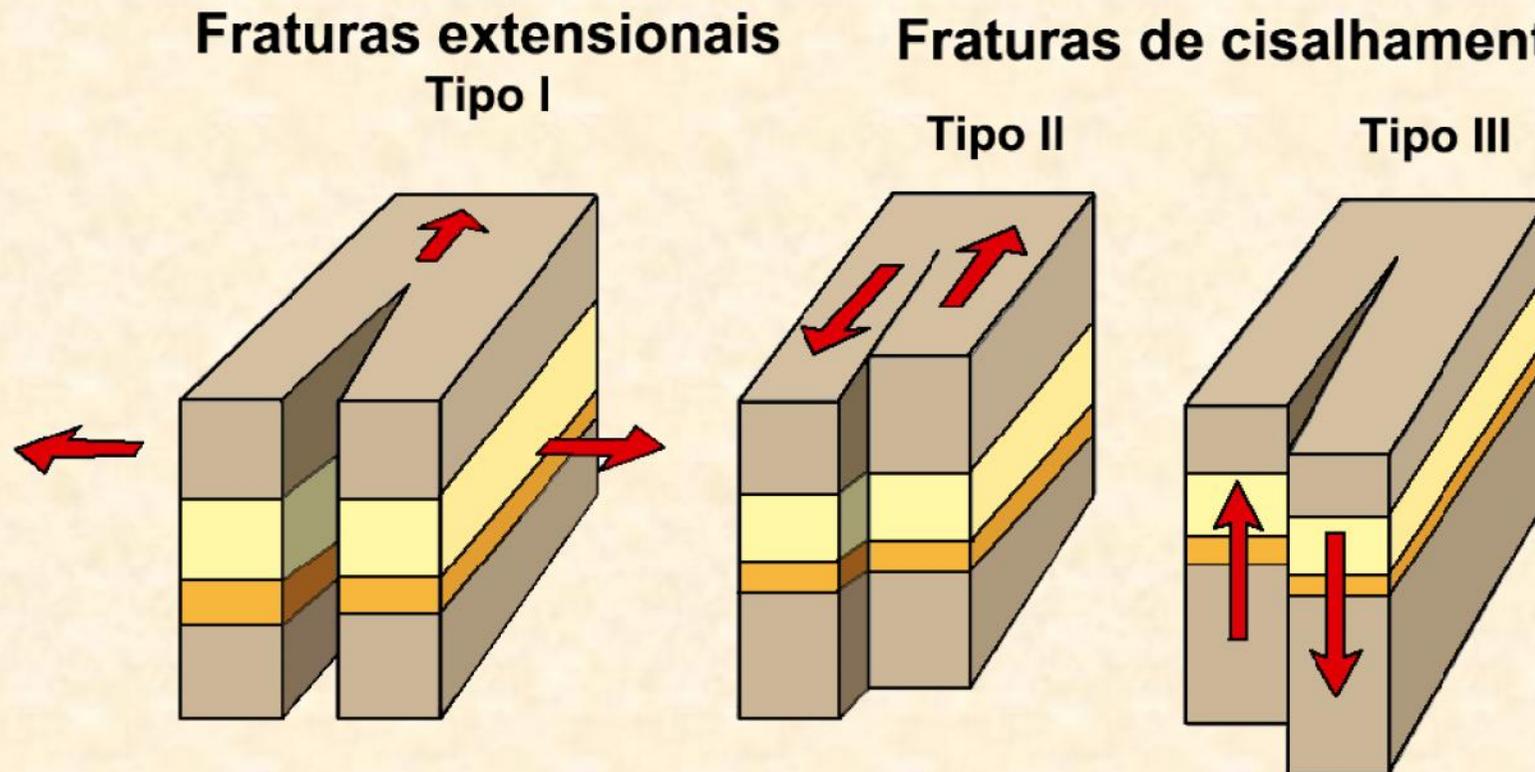
INTRODUÇÃO

Existem três caminhos pelos quais as rochas sofrem deformações:

- apresentam fluxo, quando as deformações são mais ou menos distribuídas no cisalhamento dúctil.
- dobram-se, flexionando as camadas, havendo encurtamento acentuado e deformação interna moderada.
- apresentam descontinuidades entre blocos adjacentes, ao longo de discretas superfícies ou zonas com pouca ou intensa deformação e/ou deslocamento entre os blocos. Tais descontinuidades são chamadas de FRATURAS.

Fraturas → são juntas (diáclases) ou falhas

- Fraturas extensionais: o deslocamento é perpendicular à fratura (tensional)
- Fraturas de cisalhamento: o deslocamento é paralelo às fraturas (tipo transcorrente ou do tipo em tesoura)



Definições básicas

- Junta: fratura extensional natural
- Veio: fratura preenchida por precipitados minerais ou argila.
- Dique: fratura preenchida por rochas ígneas ou rochas sedimentares clásticas remobilizadas.



Quartzitos do Grupo Açungui. Foto: E.Salamuni

Juntas são fraturas ao longo das quais não houve movimento.

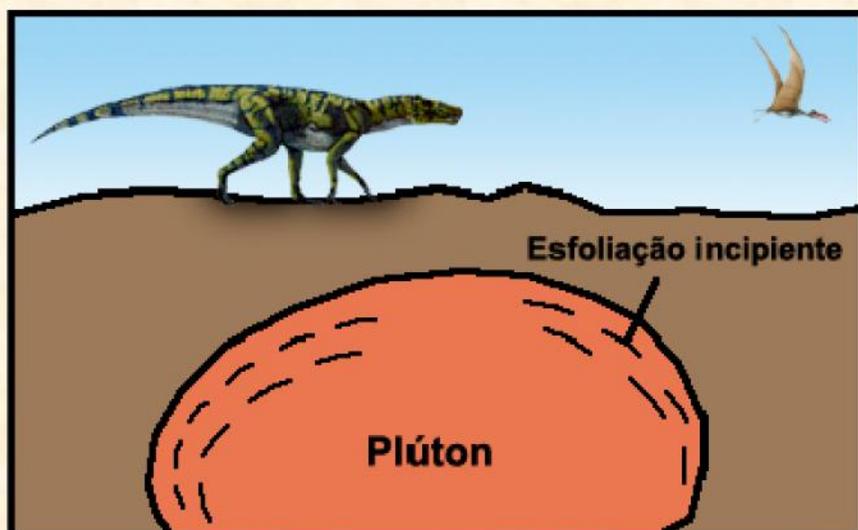
- Família: conjunto de juntas paralelas ou subparalelas com padrão regular.
- Sistemas: quando ocorrem duas ou mais famílias de juntas estas compõem os chamados sistemas.

A origem está ligada tanto a processos/esforços adiastróficos (primários), ou seja, não tectônicos (juntas de resfriamento, disjunção colunar no basalto, mud cracks), quanto diastróficos (secundários) juntas de origem tectônica, provenientes de uma estruturação regional.

Exemplos de juntas
adiastróficas ou não
tectônicas: intemperismo
em corpos ígneos ou
disjunção colunar em
basaltos.



Granito da Cadeia Alpina. Itália.
Foto: L. Chavez-Kus



CLASSIFICAÇÃO GEOMÉTRICA

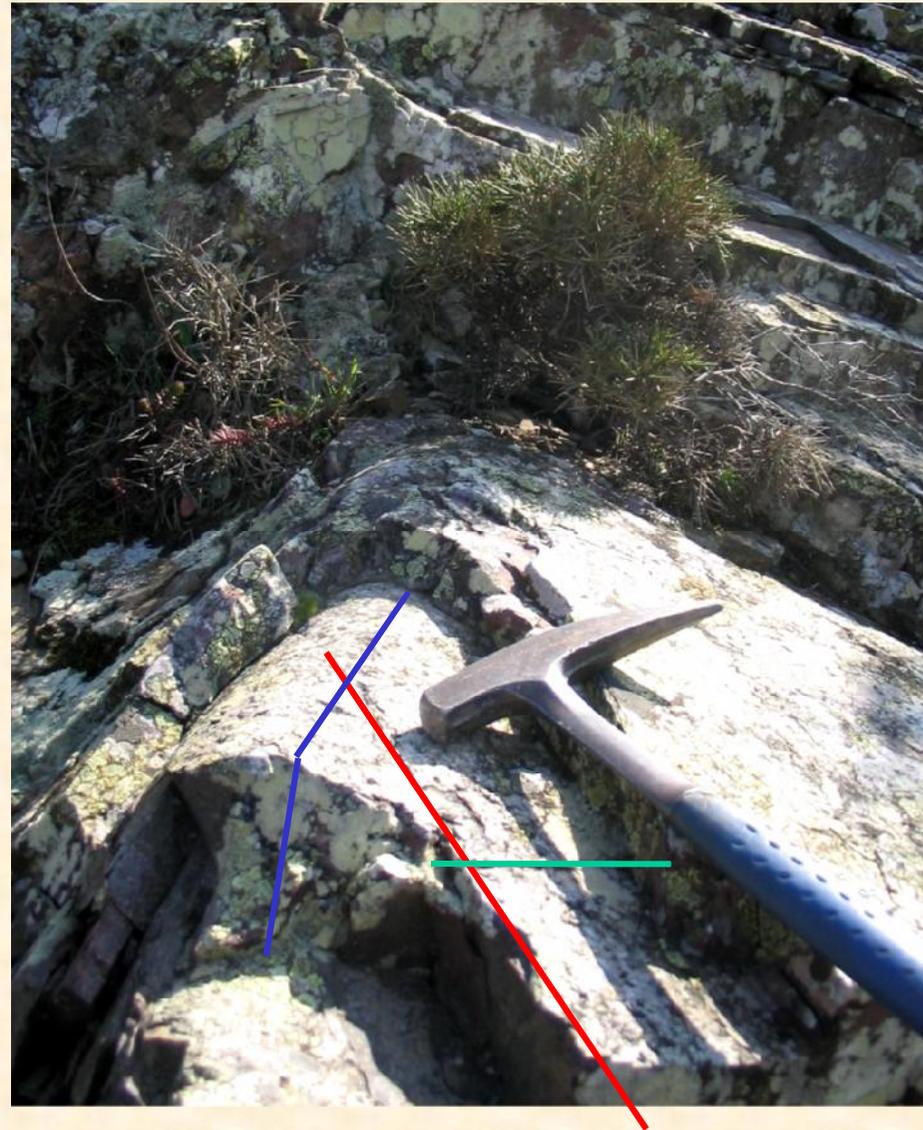
a. Em relação às estruturas planares (acamamento, xistosidade, bandamento gnaissico), ocorrem (1) juntas direcionais ou paralelas à estrutura planar; (2) juntas de mergulho ou paralelas à direção de mergulho; (3) juntas horizontais ou concordantes a planos horizontais e (4) juntas diagonais ou oblíquas à direção da camada



Dique no Complexo Atuba.
Pedreira central. Foto: E.
Salamuni

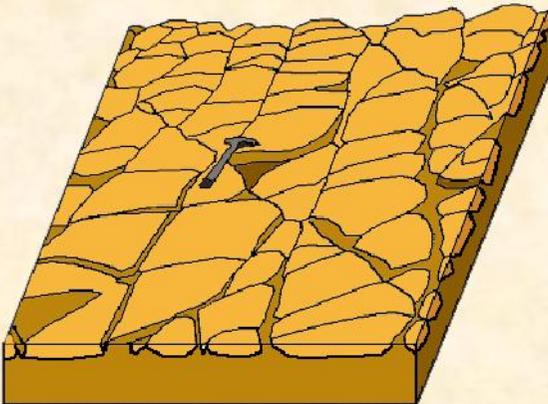
b. Em relação a eixos de dobras as juntas são classificadas como:

- longitudinais ou paralelas ao eixo da dobra;
- cruzadas ou aproximadamente perpendiculares ao eixo;
- diagonais ou cruzadas transversalmente ao eixo.



c. Em relação à disposição espacial são

- paralelas: paralelas entre si
- concêntricas: típicas de área intrusivas.
- radiais: associadas às concêntricas



d. Em relação ao espaçamento: distância entre as fraturas, medida perpendicularmente aos planos das mesmas, classificam-se de acordo com sua densidade:

- muito denso distância é < 5 cm;
- denso distância entre 5 e 30 cm.
- regularmente denso distância entre 30 e 100 cm.
- pouco denso distância entre 100 a 300 cm.
- muito pouco denso distância é > 300 cm.



Dique no Complexo
Atuba. Pedreira Central.
Foto: E. Salamuni

CARACTERIZAÇÃO

Para a caracterização do estado de fraturas do maciço as juntas devem ser observadas quanto aos seguintes aspectos:

- qualidade da superfície de ruptura: lisa ou áspera
- geometria da superfície: planas ou curvilineares
- espaçamento: distância média entre as juntas
- abertura: distância de afastamento entre os blocos
- persistência: extensão, tanto na horizontal quanto na vertical
- alteração das paredes
- preenchimento por elementos de naturezas diversas.

(é possível, p. ex., ser encontrados os seguintes produtos de preenchimento: pegmatitos ou soluções pneumatolíticas; veios de minerais metálicos ou soluções hidrotermais; veios de calcita calcedônia, limonita, ou outras soluções descendentes e diques - magma inconsolidado).

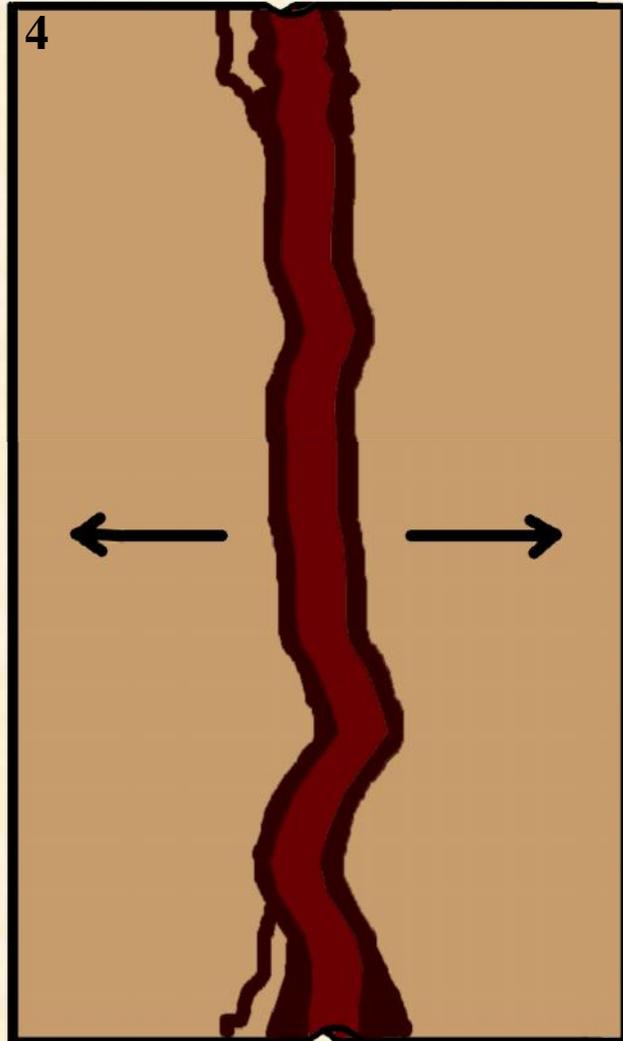


Geometria,
preenchimento e
qualidade da superfície
das fraturas

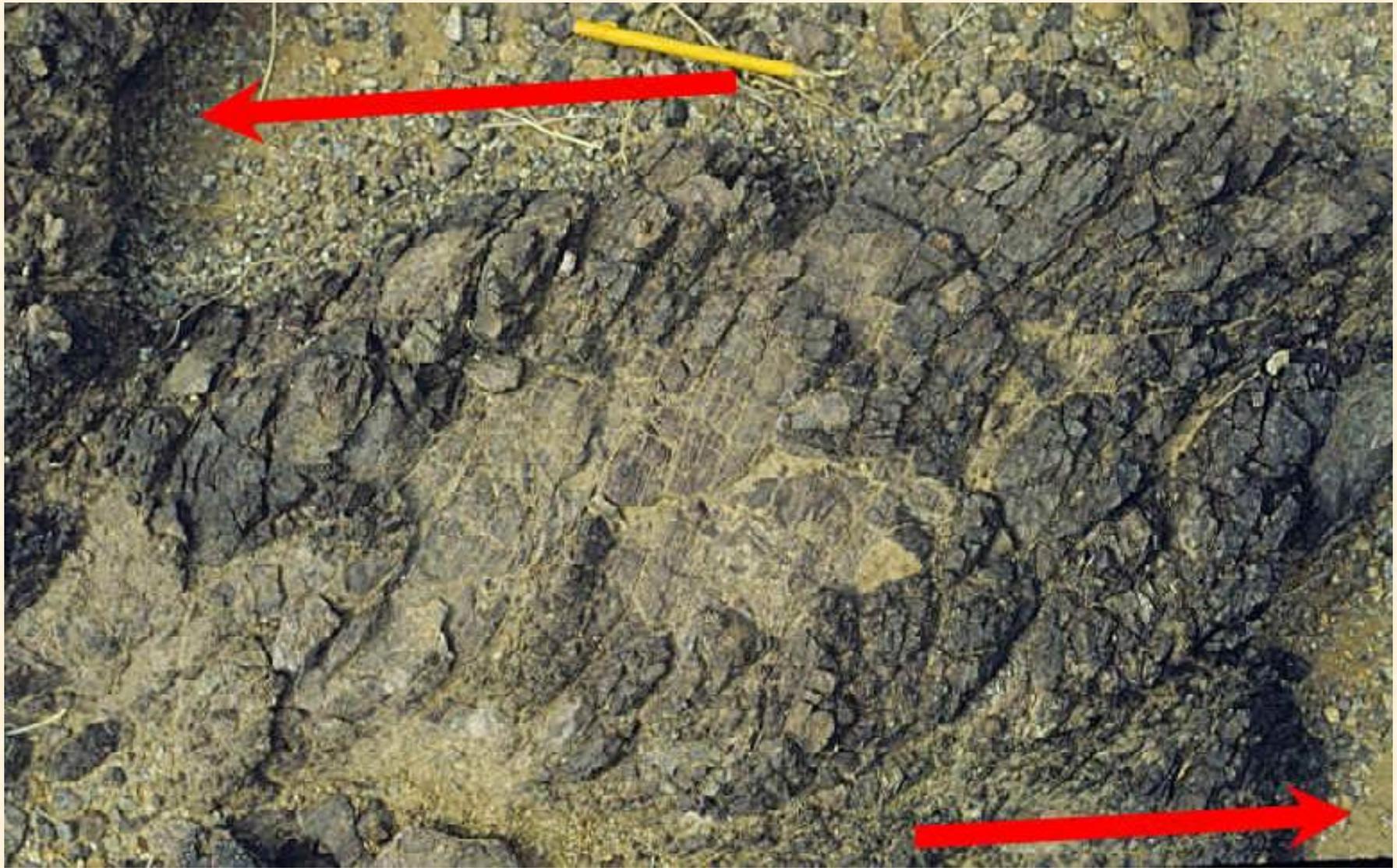
Metassedimentos na
Cadeia andina. Fotos: E.
Salamuni



Geração de Veios



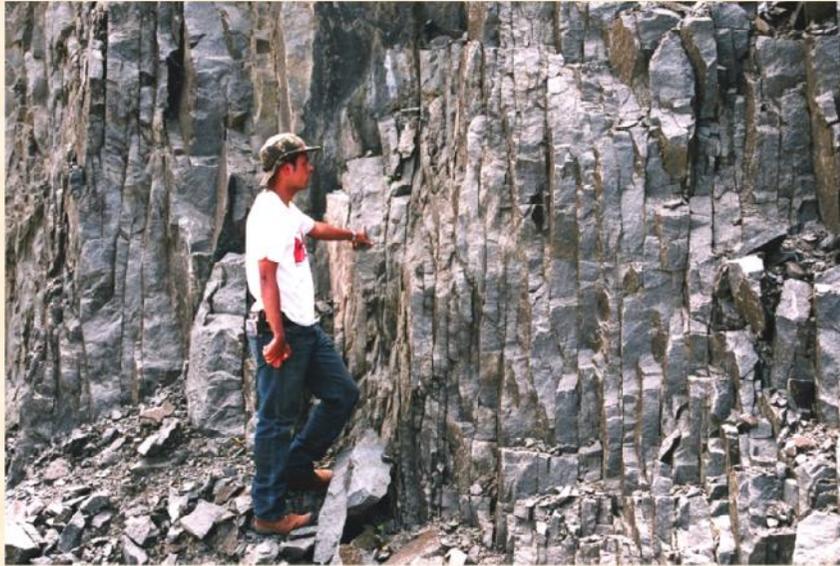
Gnaiss no Complexo Atuba. Pedreira Maringá. Campo Largo (PR). Foto: E. Salamuni



ABORDAGEM GEOLÓGICA

As juntas são utilizadas para definição do estado de fragmentação do maciço rochoso. Tal estudo prevê:

- definição de domínios homogêneos, ou seja, a área na qual um elemento se apresenta contínuo e sem variações significativas.
- levantamento sistemático em cada domínio.
- definição das famílias presentes e articulação.
- definição do bloco unitário e sua orientação.



Estado de fragmentação do maciço rochoso

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



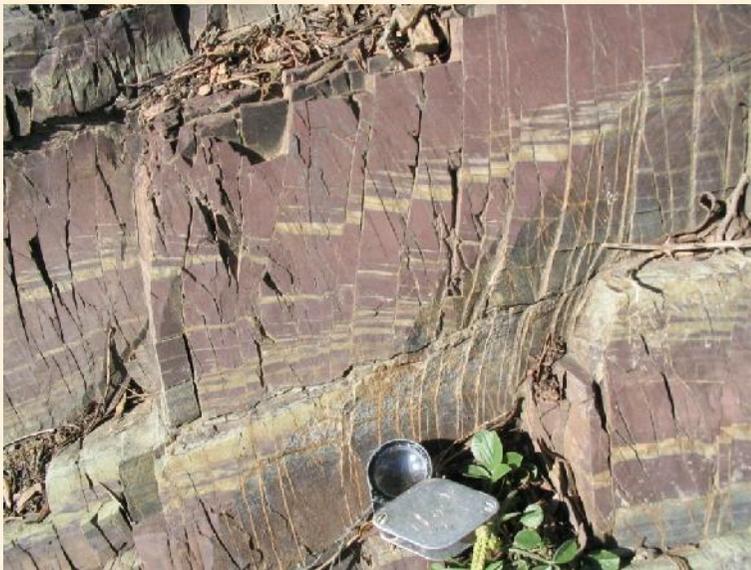
Definição da presença de famílias

Gnaiss no Complexo Atuba. Pedreira Maringá. Campo Largo (PR). Foto: L. Chavez-Kus

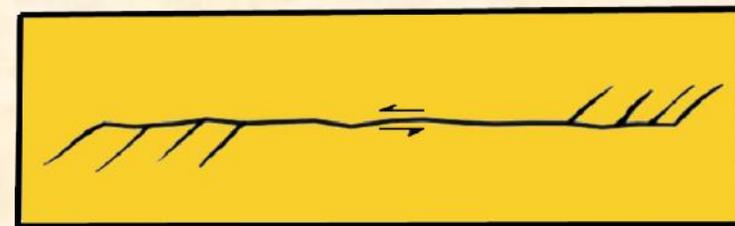
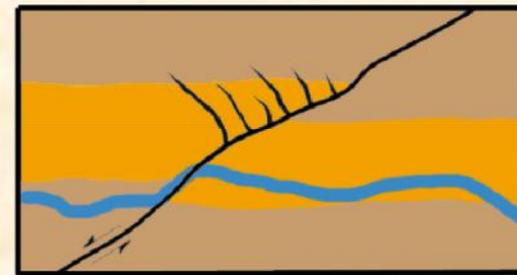
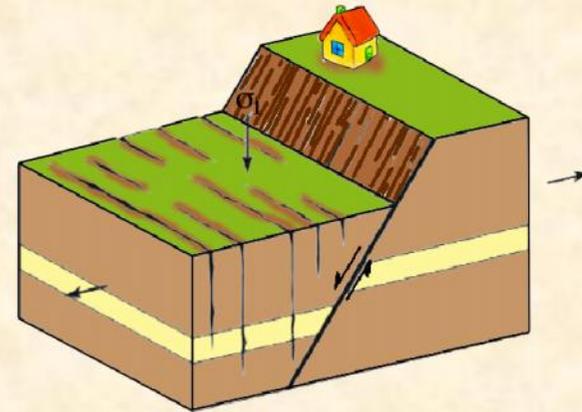
Definição de blocos e domínios



Gnaise no Complexo Atuba. Campo Largo (PR). Foto: L. Chavez-Kus



Siltito-quartzito da Cadeia Alpina. Elba (IT). Foto: L. Chavez-Kus



Formação de juntas em sistema de falhas normais, inversas e transcorrentes.

IMPORTÂNCIA PRÁTICA DAS JUNTAS

- Nas escavações subterrâneas facilitam o desmonte mas impõem a necessidade de escoramento.
- Permitem a formação de aquífero, mas por outro lado permitem a infiltração de água em obras subterrâneas.
- Controlam mineralizações.
- Condicionam o relevo e a drenagem.
- Permitem a ação rápida da erosão, propiciando a mais rápida denudação do terreno.
- Na mineração auxiliam o desmonte de rocha, porém prejudicam a retirada de blocos intactos para uso como rochas ornamentais.



Faturas como controle de drenagem

Granito, Grupo Açungui.
Foto: E. Salamuni

Faturas como facilitadores de desmontes rochosos

Gnaiss no Complexo Atuba.
Pedreira Maringá. Campo Largo (PR). Foto: E. Salamuni





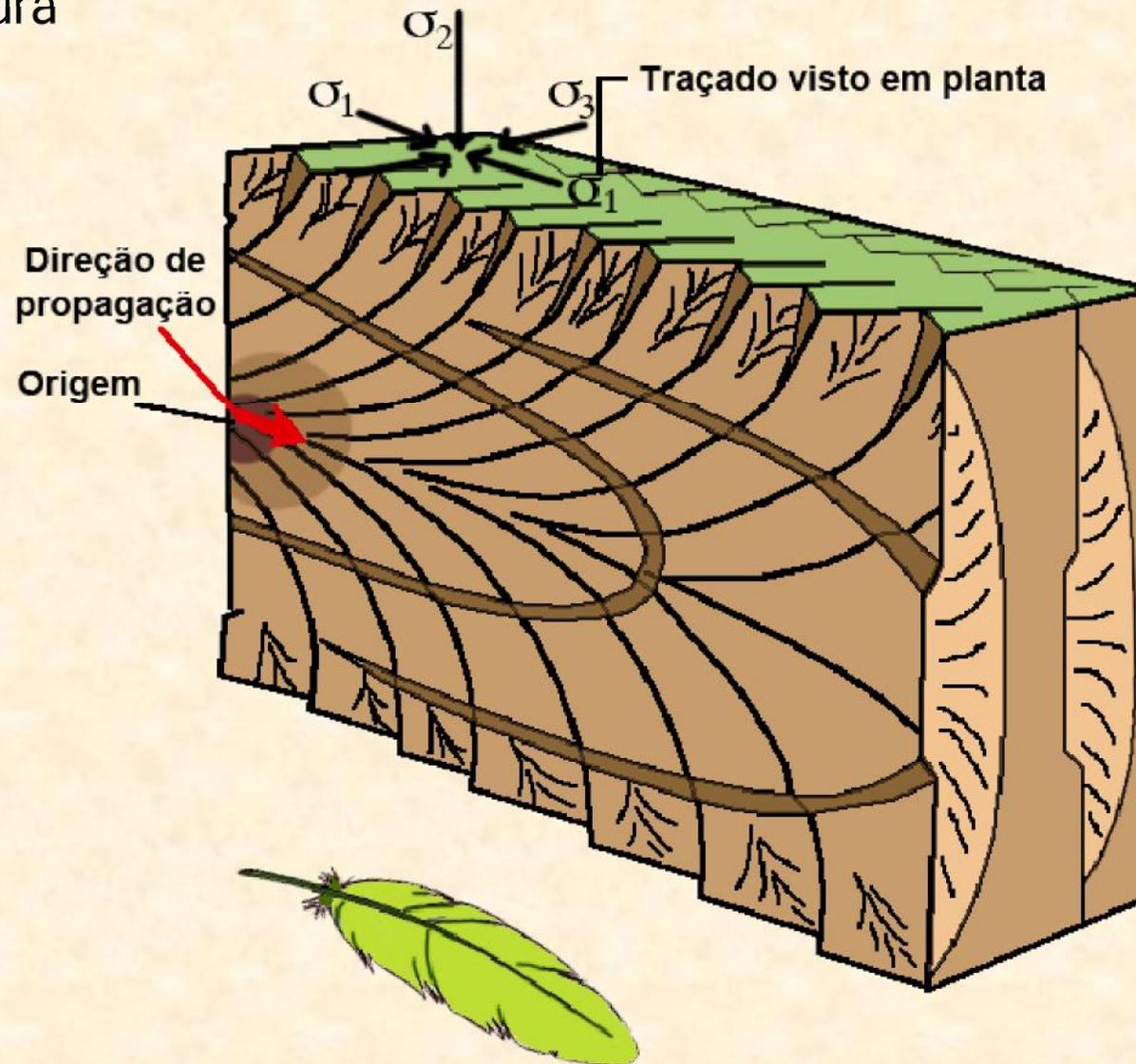
Faturas controladoras da fragmentação rochosa e facilitadoras de erosão



Arenito Itararé. Vila Velha (PG). Fotos: E.Salamuni

CONDIÇÕES ESPECIAIS

- Fratura plumosa: formato em pluma devido à propagação da tensão de fratura





Junta plumosa. Foto anônima



Junta plumosa em basaltos da Formação Serra Geral. Paraná PR).

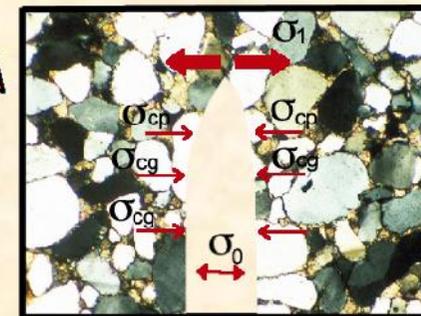
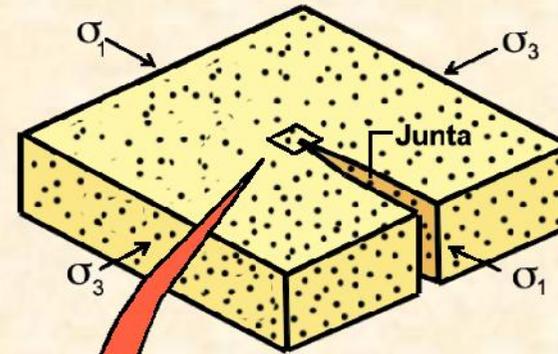
- Hidrofraturas: geração de fraturas em função da tensão hidrostática



Granito Cunhaporanga, Abapã – Castro (PR). Foto: E.Salamuni



Isthmus Bay. Foto: autoria desconhecida

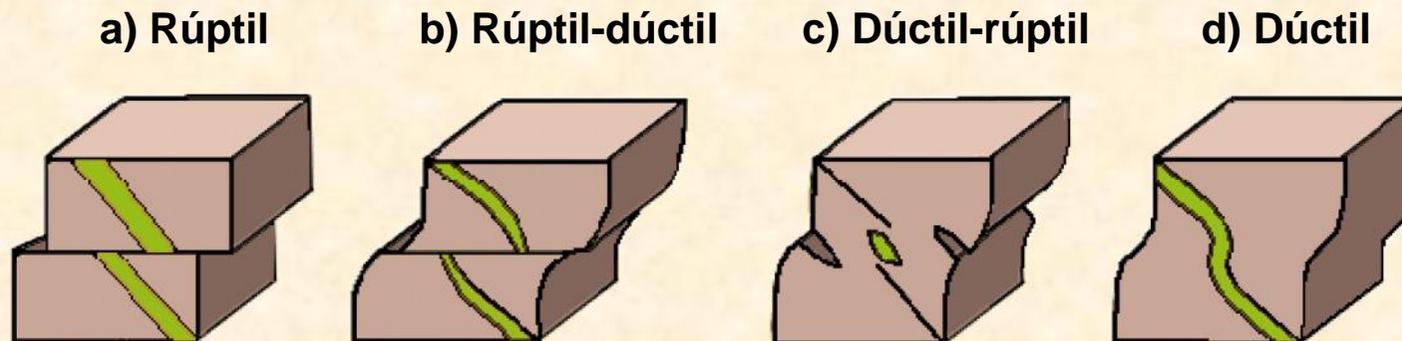


$$\sigma_0 > \sigma_{cp} + \sigma_{cg}$$

FRATURAS: FALHAS

DEFINIÇÕES

- Falha é uma descontinuidade planar entre blocos de rocha, os quais apresentam movimentos relativos entre si.
- Uma falha é o resultado de extensão, distensão ou torção. Suas dimensões variam da escala mineralógica às escalas continentais (Ex. Falha da Lancinha, Falha de San Andreas).
- Zona de Falha: É uma região onde há vários planos de falhas paralelos ou entrelaçados (anastomosados). É frequente sua localização em zonas de deformação rúptil.

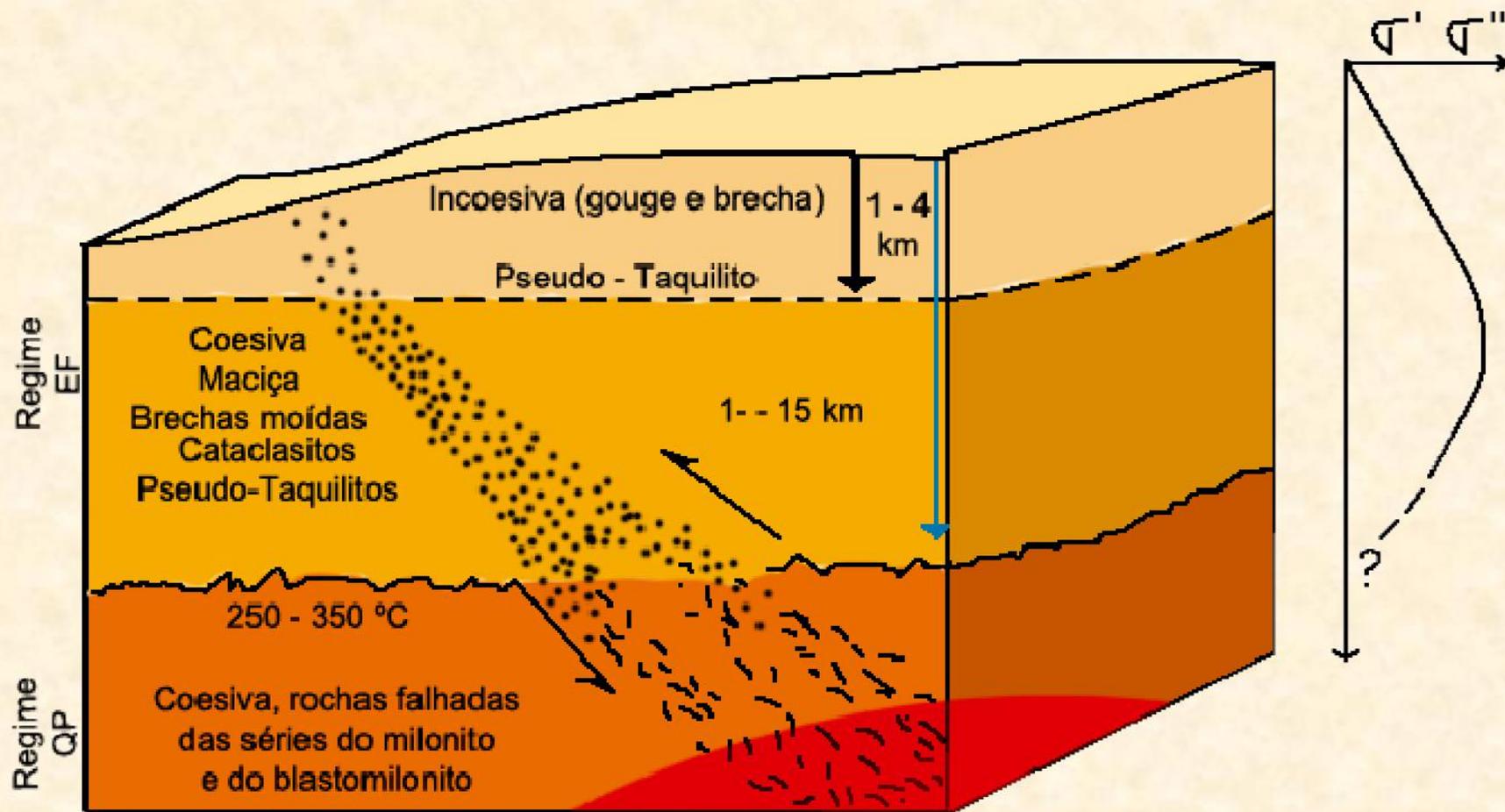


Relembrando os regimes de deformação.

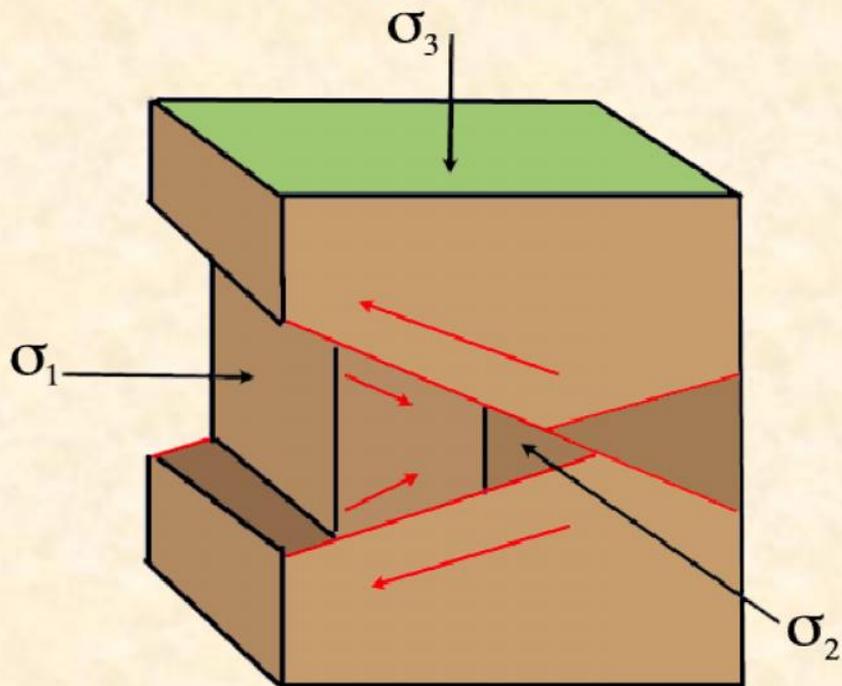
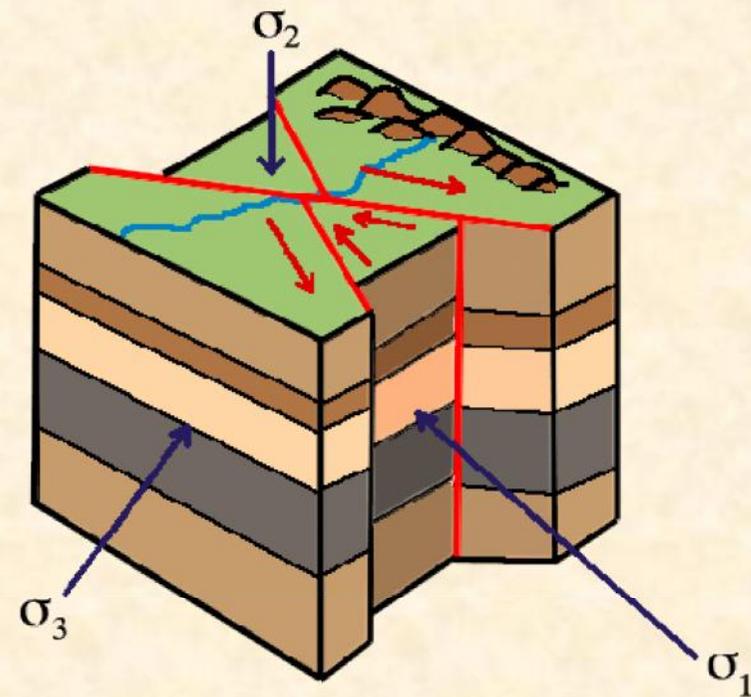
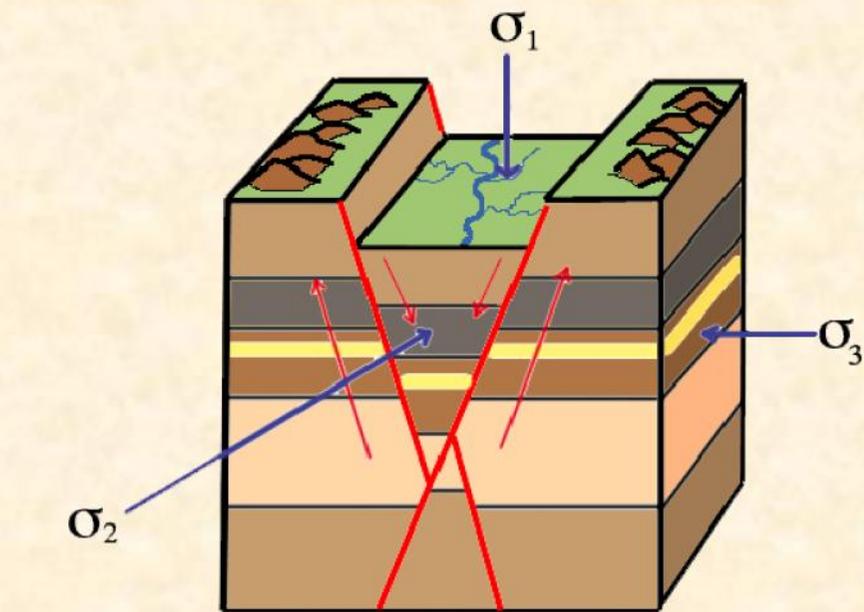
Fonte: Modificado de Ramsay & Hubber (1976)

Relembrando...

Zona de falha x Nível crustal



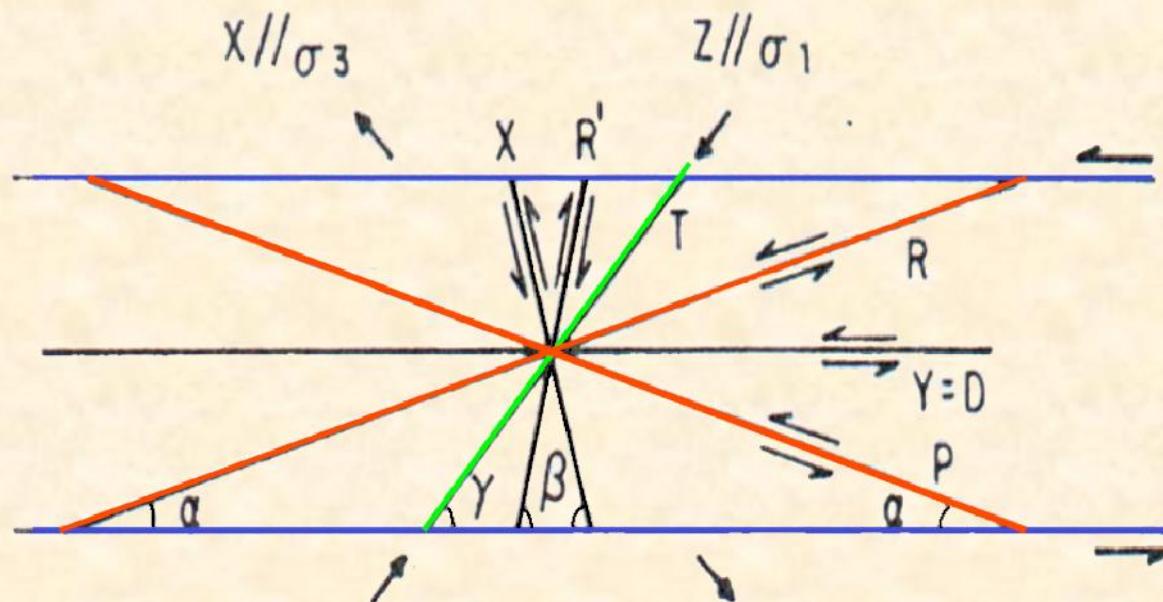
Adaptado de Sibson, 1977



MODELO DE ANDERSON (1942):
aplicado em regiões homogêneas da
crosta, geralmente nos níveis
crustais superiores, tais como
maciços, derrames vulcânicos, e
extensas regiões de embasamento e

FALHAS PRESENTES NO MODELO DE RIEDEL

- fratura de partição T: fratura de extensão ou distensão.
- fratura de cisalhamento de RIEDEL (sintética ou R).
- fratura de cisalhamento conjugada de RIEDEL (antitética ou R').
- fraturas de cisalhamento P e X (sintéticas secundárias)
- fratura de cisalhamento Y ou D, que se forma paralelamente ao binário em casos extremos



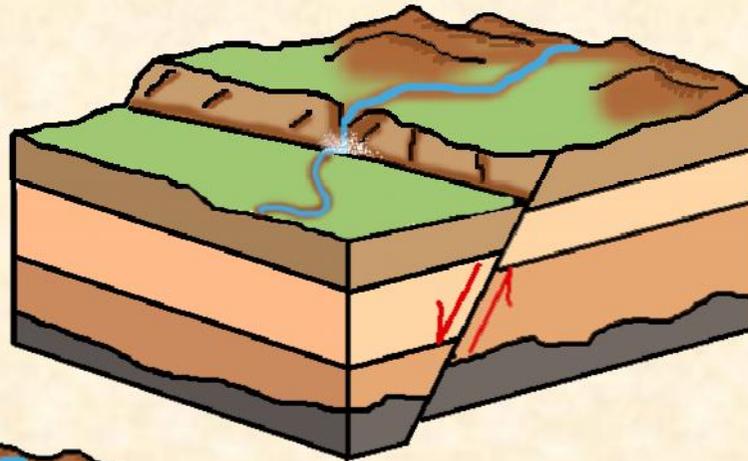
CLASSES OU TIPOS DE FALHAS FUNDAMENTAIS

(a) Normal (ou de gravidade)

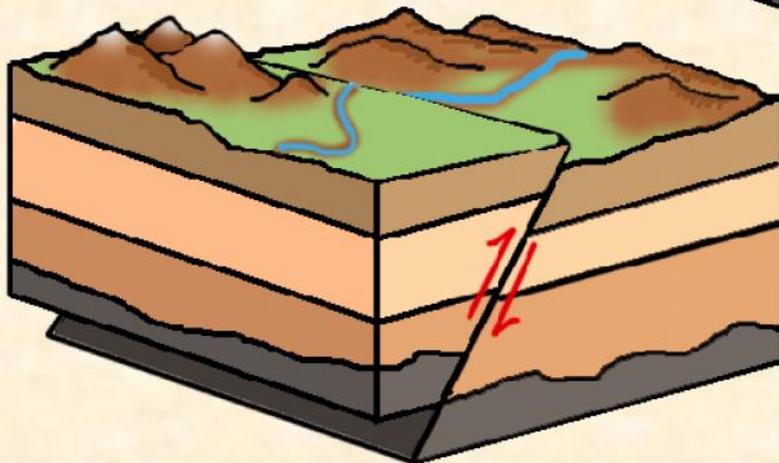
(b) Inversa (ou reversa)

(c) Transcorrente (ou direcional)

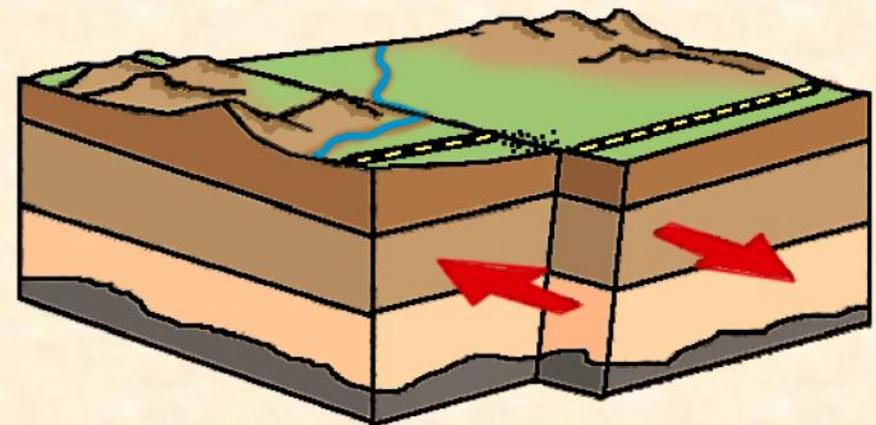
(a)



(b)



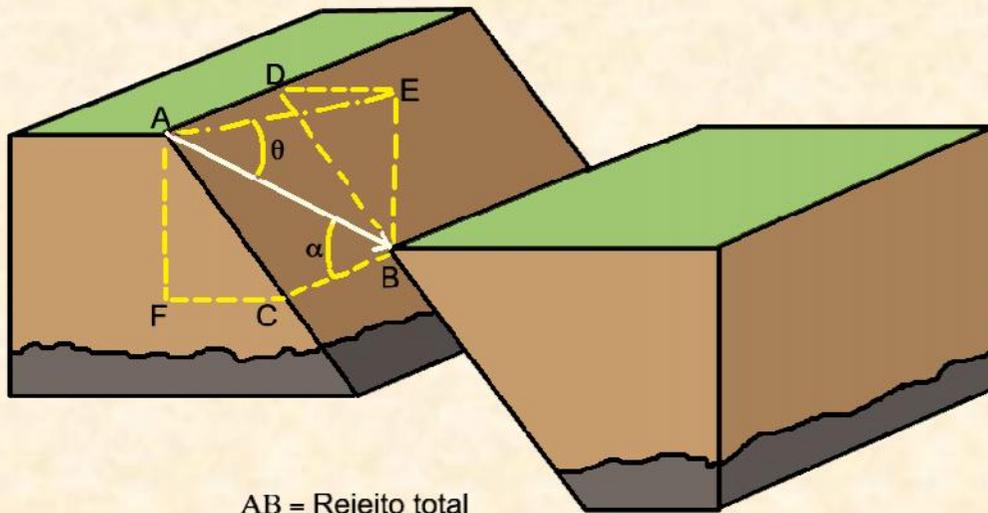
(c)



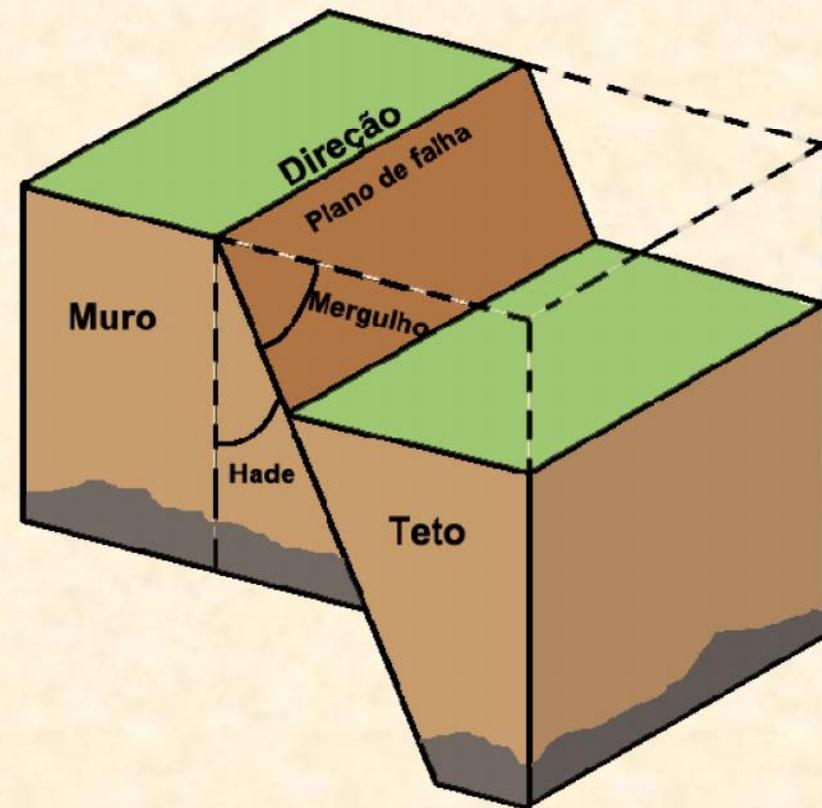
ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE FALHAS

- Plano de Falha (PF)
- Capa ou Teto (hingwall): bloco situado sobre o plano de falha.
- Lapa ou Muro (footwall): bloco situado sob o plano de falha.
- Espelho de falha: superfície lisa, brilhante, normalmente cheia de estrias de atrito, situado no plano de falha.
- Traço ou linha de falha: a linha formada pela interseção do plano de falha (PF) com a superfície terrestre ou o plano horizontal (PH).
- Atitudes
 - a. direção do plano de falha (PF) (strike); α : ângulo de mergulho (dip) do plano de falha (PF) com relação ao plano horizontal (PH);
 - b. rake ou pitch: ângulo de mergulho de uma estria de atrito (slickensides) contida no plano de falha;
 - c. hade (β complemento do ângulo de mergulho ou ângulo entre o plano de falha e um plano vertical).

Elementos geométricos do deslocamento



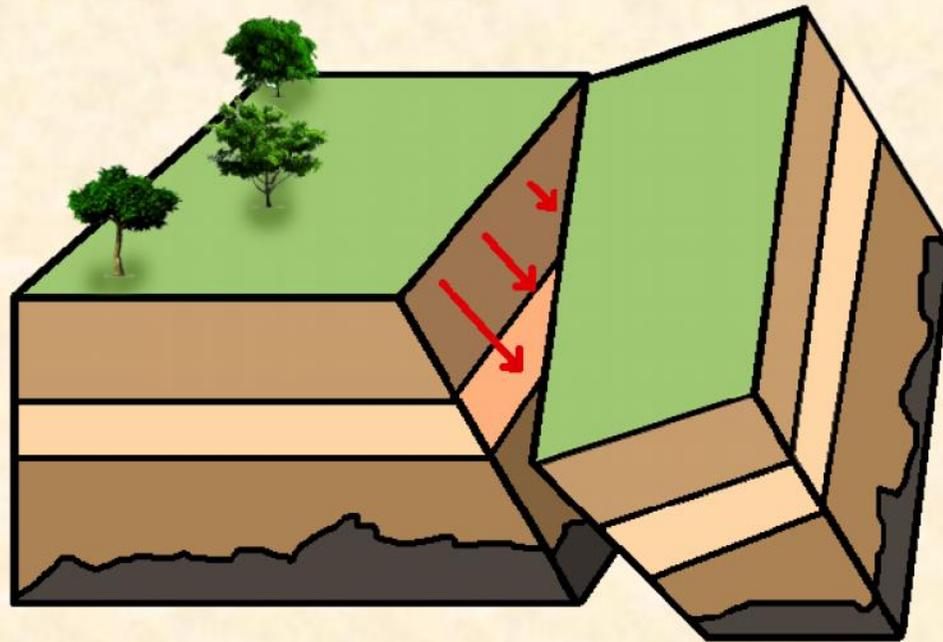
AB = Rejeito total
AC = DB = Rejeito de mergulho
AD = BC = Rejeito direcional
AE = Rejeito horizontal
AF = Rejeito vertical
CF = Rejeito horizontal de mergulho
 θ = caimento do rejeito total
 α = obliquidade (rake) do rejeito total



TIPOS DE MOVIMENTOS AO LONGO DAS FALHAS

- Dependendo da seção transversal feita no bloco rochoso, a relação entre dois blocos falhados pode apresentar movimentos diferentes do rejeito total real. Isto se aplica a quaisquer tipos de falhas.
- Os movimentos mais importantes são:
 - a. Movimentos rotacionais: quando os blocos não se deslocam paralelamente. Um bloco tende a girar sobre o outro e as retas antes paralelas perdem essa condição após o movimento. Exemplos: falhas lítricas e falhas em tesoura.

Falha em tesoura



b. Movimentos translacionais: se dão ao longo de linhas retas (as linhas que eram paralelas antes da ocorrência da falha continuam paralelas após o movimento). A distância entre duas partes comparáveis de um horizonte deslocado (veio ou camada) medida em um plano em qualquer direção é chamada de separação.

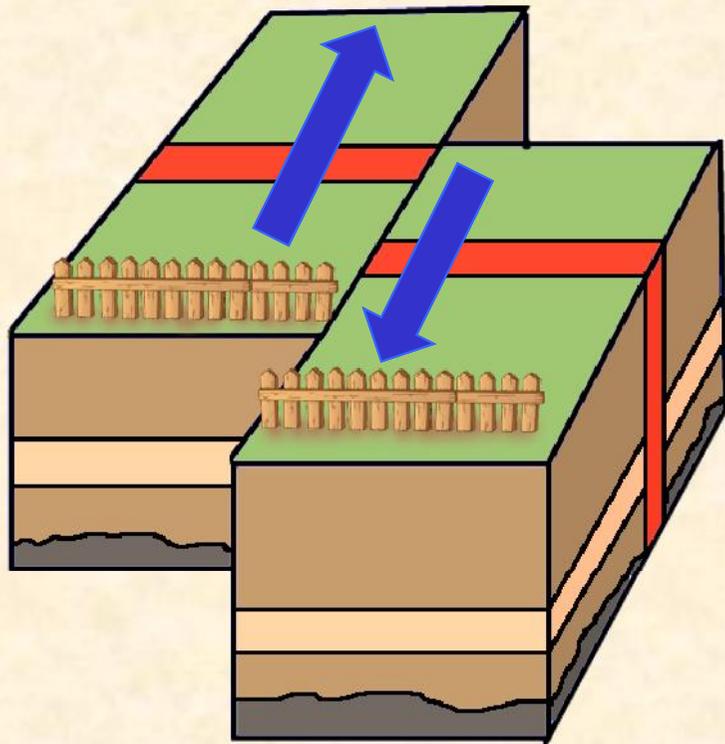
Esses movimentos podem ser subdivididos em:

Direcional dextrógiro: observador situado em qualquer ponto da linha de falha necessita voltar-se à direita para achar o horizonte (ou camada) que situa-se à suas costas. O movimento é horário (tem sido usada a palavra dextral para descrever tal movimento)

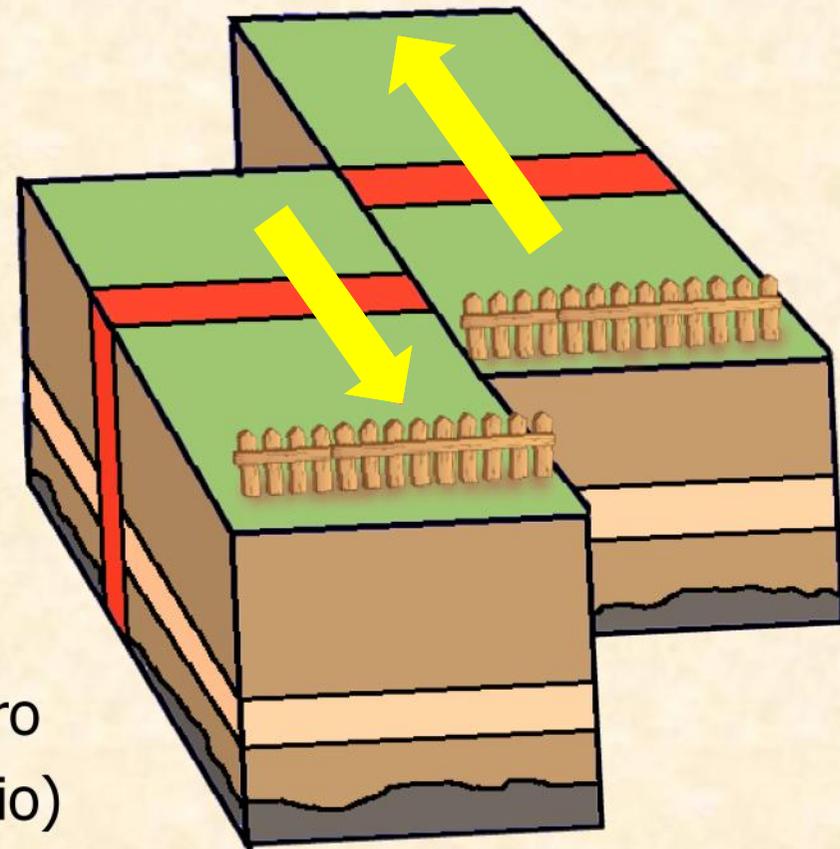
Direcional sinistrógiro (ou levógiro): observador necessita voltar-se à esquerda. Movimento anti-horário (tem sido usada a palavra sinistral para descrever tal movimento).

Separação horizontal

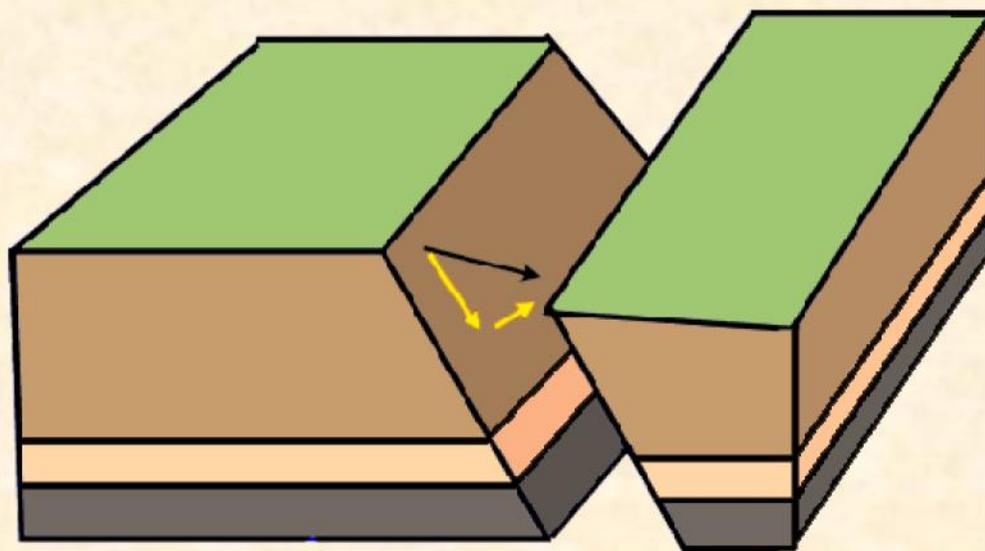
Separação vertical



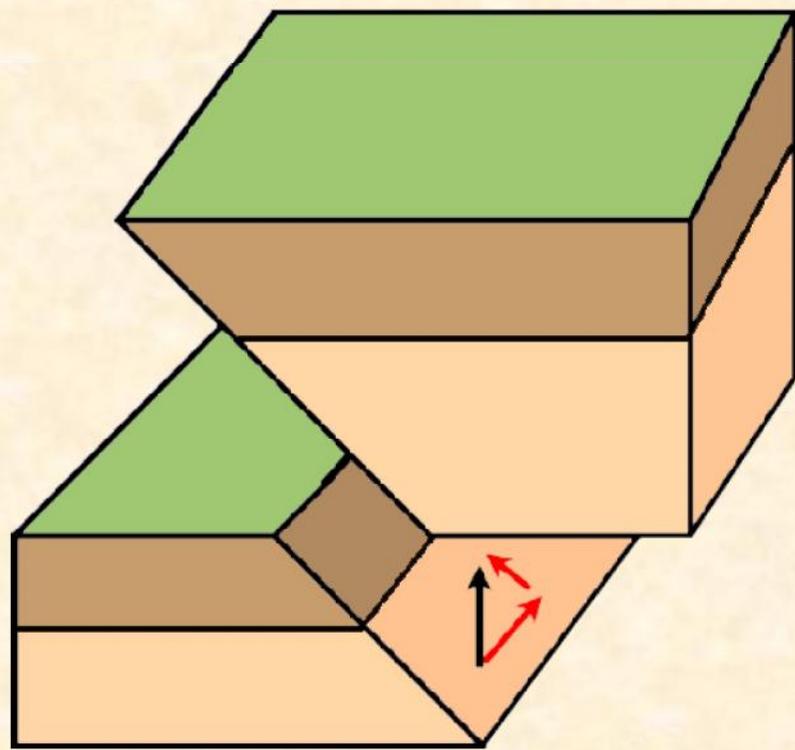
Movimento dextrógiro
(ou horário)



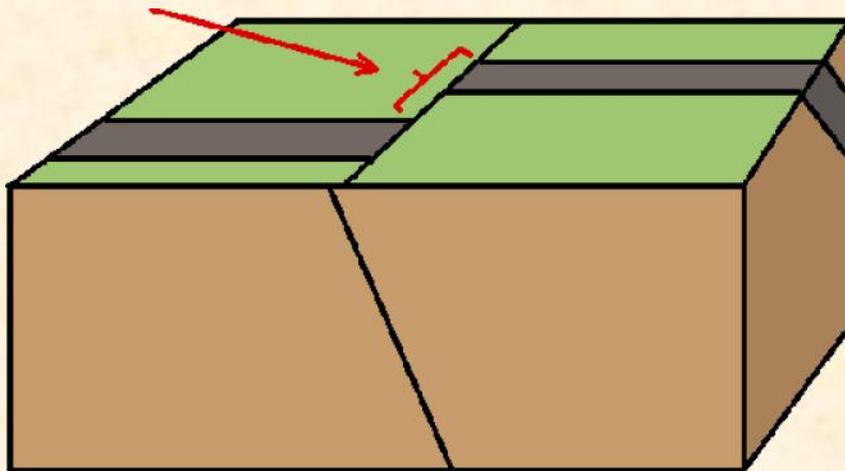
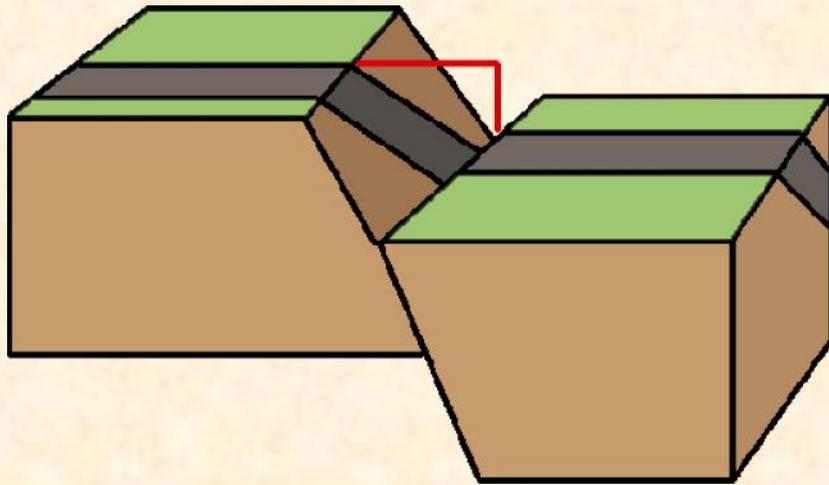
Movimento sinistrógiro
(levógiro ou antihorário)



Separação horizontal



Separação vertical



- Cuidados com marcadores
Quando os planos de referência apresentam mergulho é necessário um cuidado especial para que não haja confusão entre tipos diferentes de falhas

CLASSIFICAÇÃO DAS FALHAS

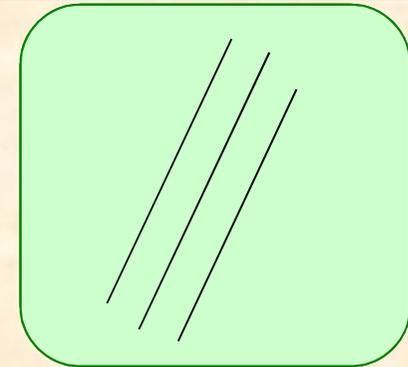
(a) Quanto ao rejeito

- Os movimentos absolutos e relativos são caracterizados pelos rejeitos (slip), que são o produto de deslocamento relativo de pontos previamente adjacentes nos lados opostos da falha.
- É medido no plano de falha, determinando os componentes geométricos do deslocamento. Os rejeitos são caracterizados da seguinte forma:

-
- a. Rejeito total (net slip): distância entre dois pontos deslocados no plano de falha.
 - b. Rejeito direcional (strike-slip): medido paralelamente à direção do plano de falha. Rake = 0°
 - c. Rejeito de mergulho (dip-slip): o rejeito medido ao longo da direção do mergulho do plano de falha Rake = 90°
 - d. Rejeito diagonal: há uma componente de rejeito direcional e uma componente de rejeito de mergulho.
 - e. Rejeito horizontal (horizontal slip): componente horizontal do rejeito total.
 - f. Rejeito vertical (vertical slip): componente vertical do rejeito total.
 - g. Mergulho do rejeito (total): ângulo medido entre o rejeito total e plano horizontal.
 - h. Obliquidade (rake): ângulo medido entre a direção da falha e o rejeito total (medido no plano de falha).
 - i. Obs. A classificação e a terminologia das falhas fundamentam-se na relatividade do movimento entre os blocos, pois o movimento absoluto é de difícil caracterização no campo.

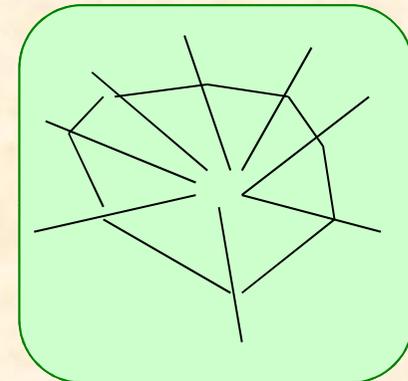
(b) Quanto ao arranjo em conjunto

- Falhas paralelas: possuem direção e mergulhos iguais.



Falhas paralelas

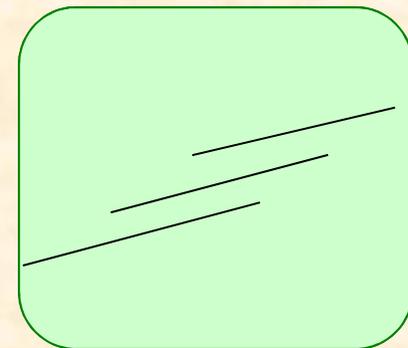
- Falhas radiais: irradiam-se de um ponto podendo constituir sistemas.



Falhas radiais

- Falhas circulares: exibem um padrão arqueado de falhas.

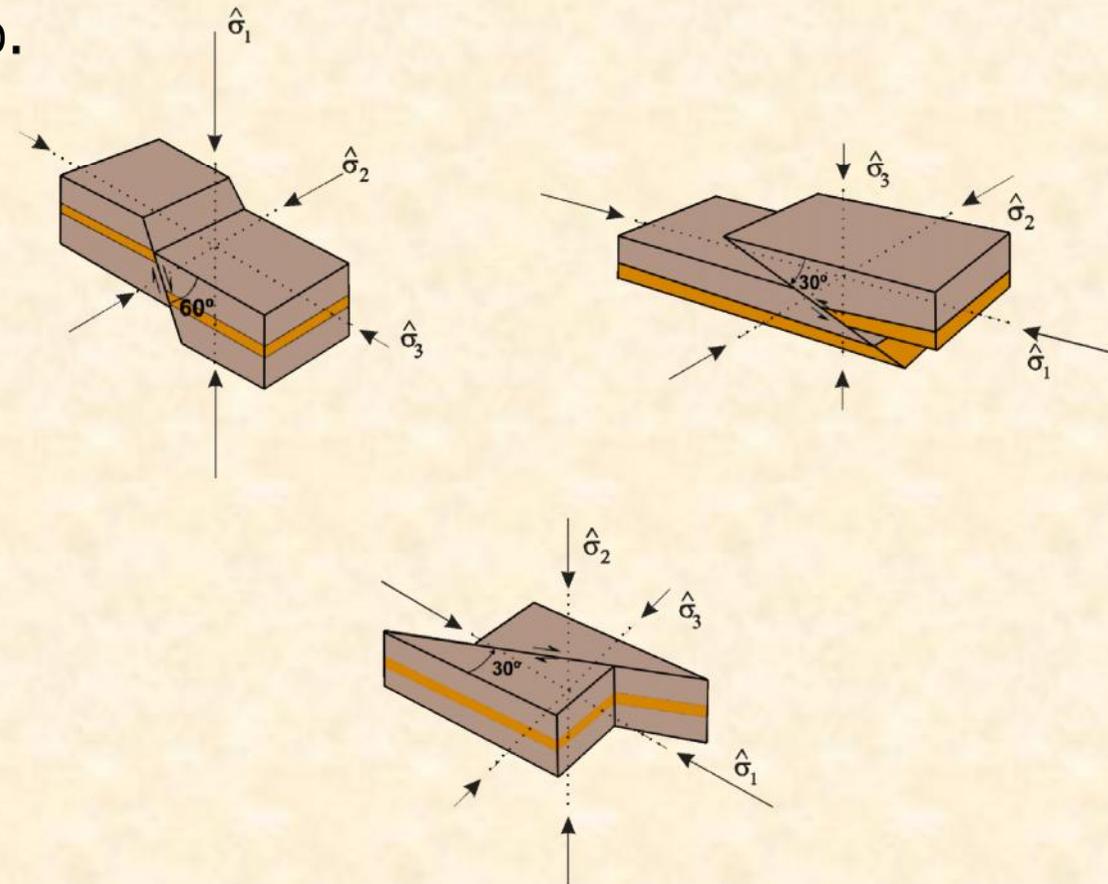
- Falhas escalonadas (en échelon): falhas que se superpõem ou recobrem uma às outras



Falhas
escalonadas

(c) Quanto à orientação do elipsóide de tensão e a deformação no plano de falha

- O plano de falha (PF) contém estrias de atrito no plano de movimento (PM) que marcam a direção de transporte tectônico. Tais elementos são essenciais para a determinação do elipsóide de deformação, que é inversamente proporcional ao elipsóide de tensão.



Relembrando...

- a. Elipsóide de tensão: σ_1 faz ângulo teórico de 30° com o PF; σ_2 é perpendicular às estrias de atrito no PF; σ_3 situa-se no PM (perpendicular dos outros dois)

$$\text{TENSÃO } \sigma \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

- b. Elipsóide de deformação: X paralelo às estrias de atrito (contido no PF); Y perpendicular ao PF e às estrias de atrito (contido no PM); Z perpendicular às estrias de atrito e ao PM (contido no PF).

$$\text{DEFORMAÇÃO } \epsilon \quad \epsilon_X > \epsilon_Y > \epsilon_Z$$

ELEMENTOS DE RECONHECIMENTO DE FALHAS: CRITÉRIOS GEOLÓGICOS

Falhas podem ser visualizadas em excelentes exposições naturais, mas na maioria das vezes não são observadas diretamente.

Nesse caso são inferidas a partir de elementos estruturais observados em afloramentos ou descontinuidades geológicas, em zonas não expostas, que constituem a expressão da falha na superfície. Alguns exemplos de elementos são os seguintes:

- Espelho de falha: superfície lisa, em geral escura vítrea ou brilhante que contém as estrias de atrito
- Estrias de atrito (slickensides)
- Presença de cataclasitos, gouges ou profusão de veios de quartzo
- Mudança brusca de litotipos
- Mudança brusca de estilo estrutural
- Mudança brusca de fácies (metamórficas ou sedimentares)

Exemplo de espelho de falha, estrias de atrito (slickensides) e steps



Gnaiss do Complexo Atuba - Campo Largo (PR) Pedreira Central. Foto: E. Salamuni



Gnaiss do Complexo Atuba - Campo Largo (PR). Pedreira Maringá. Foto: E. Salamuni



Metacalcário do Grupo Açungui. Foto: E. Salamuni

Outros exemplo de espelho de falha, estrias de atrito (slickensides) e steps



Tectonito com estrias e steps –
Montanhas Rochosas - Canadá. Foto:
Dandara Salvador



Sill de diabásio, UHE Mauá –
Telêmaco Borba (PR) . Foto: E.
Salamuni

Exemplo de mudanças brusca de fácies sedimentares



Calcário da Cadeia Alpina.
Apeninos, Vieste (Itália). Foto: L.
Chavez-Kus

Ocorrência de profusão de veios de quartzo paralelos entre si

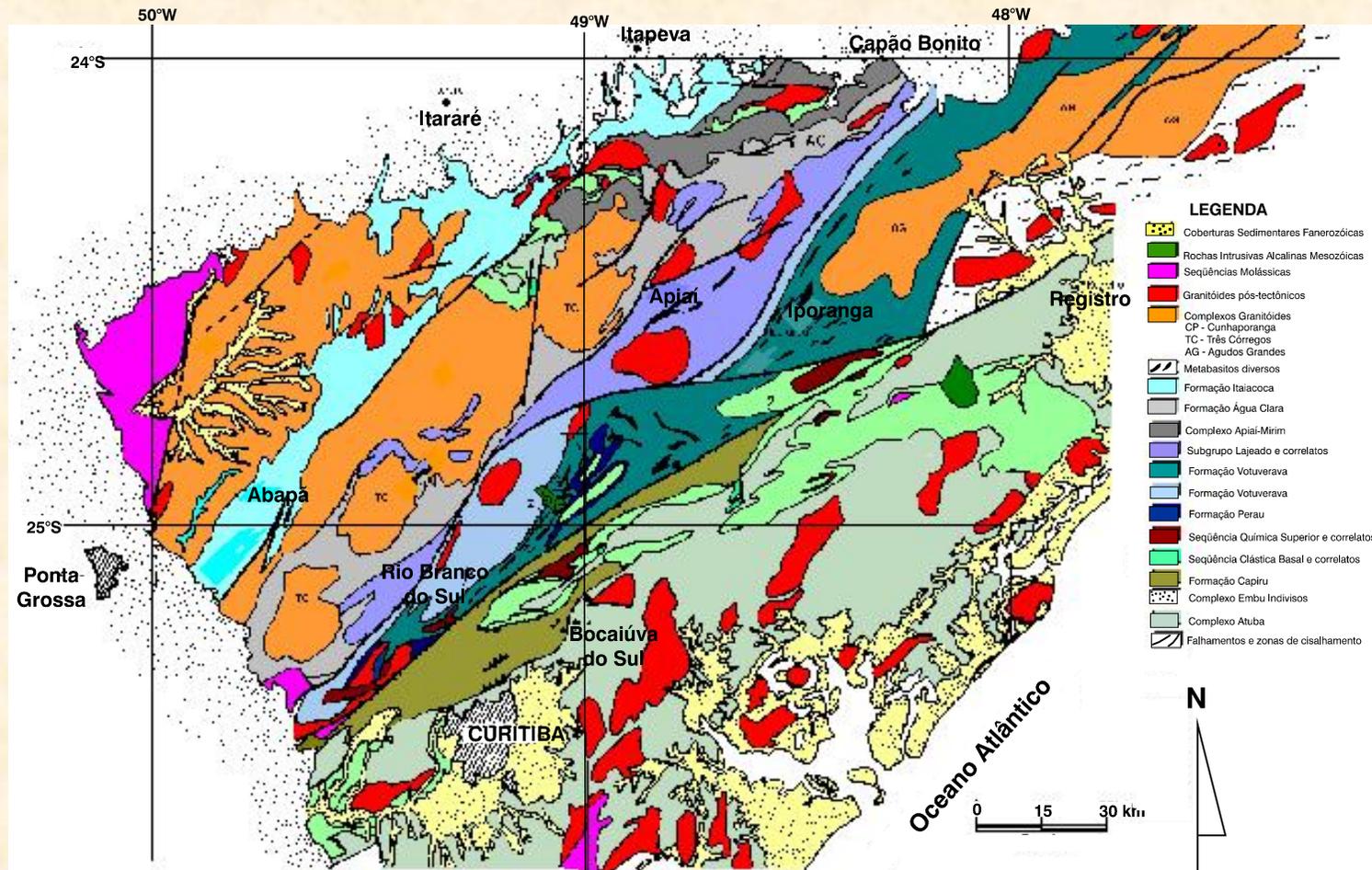


Zona de Cisalhamento Curitiba.
Foto: E. Salamuni



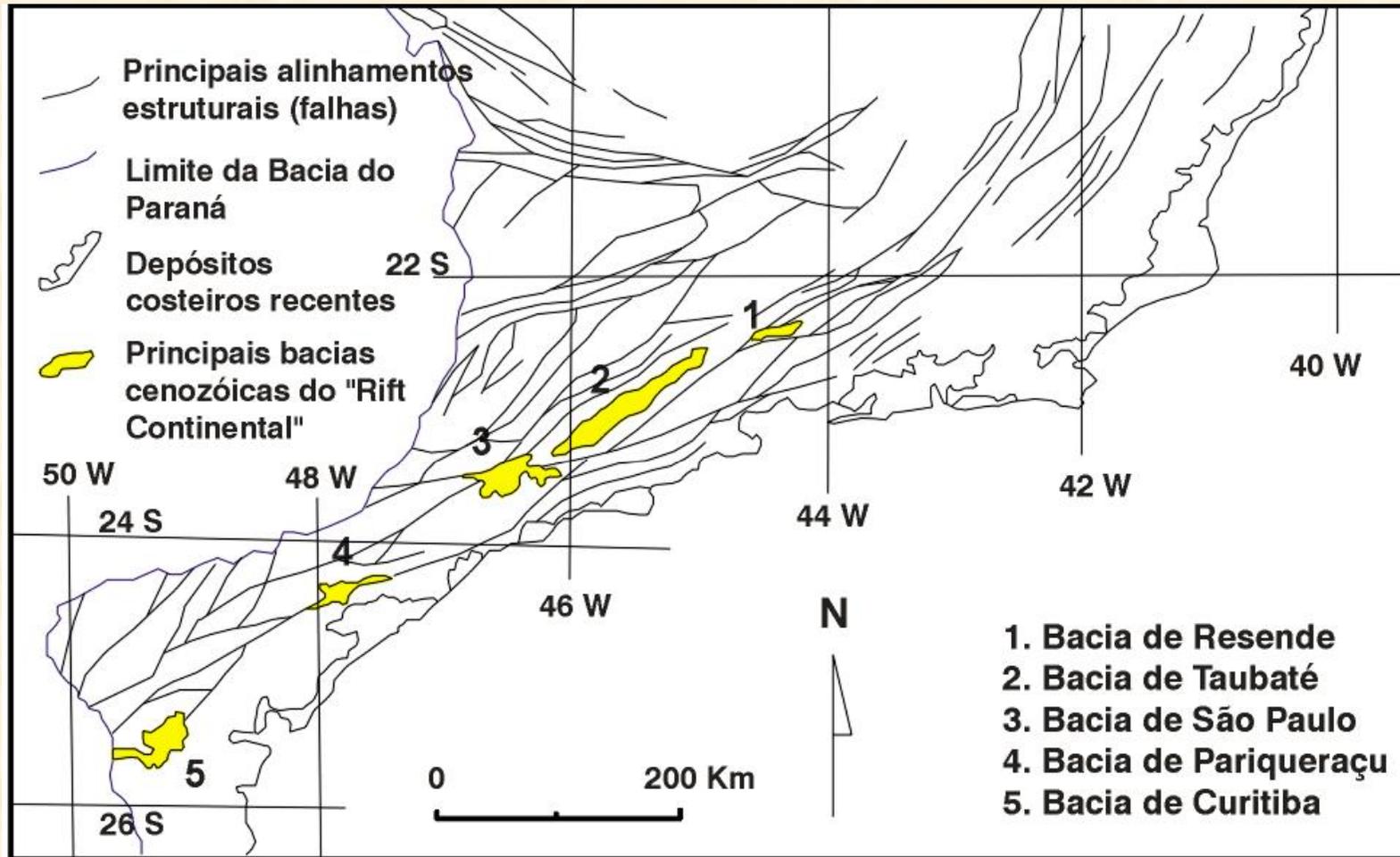
Veios em metassedimentos da
Formação Capiro , Grupo Açungui –
Colombo (PR). Foto: E. Salamuni

Exemplo de mudança brusca de litotipos e/ou de fácies metamórficas



Mapa geológico do leste do Paraná, mostrando alinhamentos estruturais que (traços contínuos em preto) que caracterizam falhas que colocam lado a lado unidades geológicas com fácies metamórficas e (meta)sedimentares diferenciadas. Fonte: Modificado de Campanha et. al (1987)

Grandes alinhamentos regionais / alinhamentos de bacias



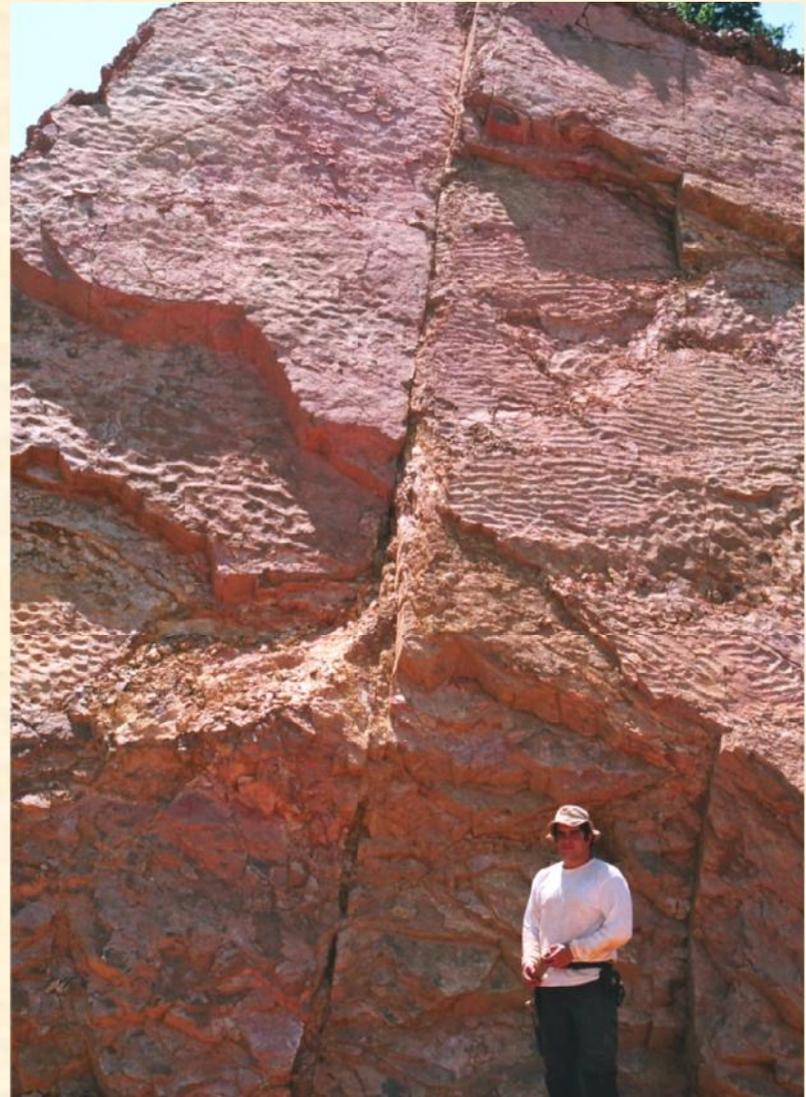
Mapa de alinhamentos estruturais e principais bacias tafrogênicas do sudeste e sul do Brasil (Rifte Serra do Mar) (Salamuni, 1998, modificado de Almeida e Hasui, 1976)

Contato entre zonas homólogas diferentes



Foto aérea da porção oeste do Pré-Cambriano do Paraná (Campo Largo – PR). Interpretação por E. Salamuni

- Truncamento de estruturas (por exemplo, marcas onduladas como na foto ao lado)
- Ocorrência de dobras de arrasto
- Repetição ou omissão de camadas
- Metamorfismo dinâmico ou cataclástico (lato sensu) com geração de produtos litológicos ou tectonitos gerados por falhas (brechas, por exemplo)
- Fluxo dúctil intenso: migmatização



Siltitos, Formação Alter do Chão, Domo de Monte Alegre (AM) . Foto: E. Salamuni

Repetição de camadas

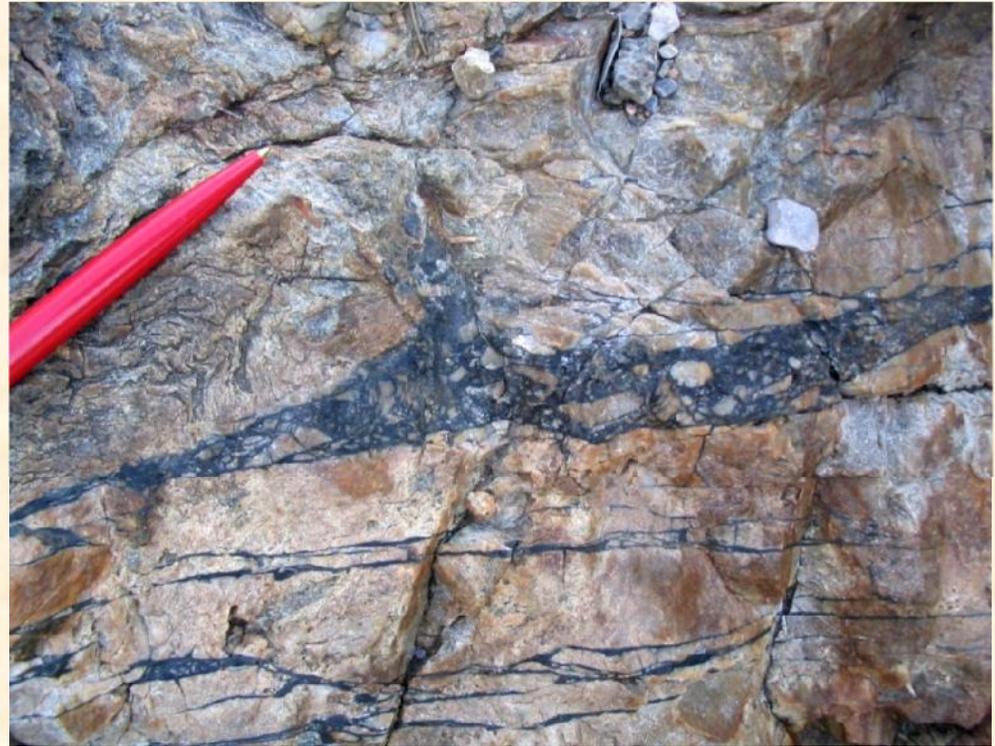


Calcário da Cadeia Alpina. Apeninos, Vieste (Itália). Foto: L. Chavez-Kus

Geração de tectonitos rúpteis (inclusive brechas)

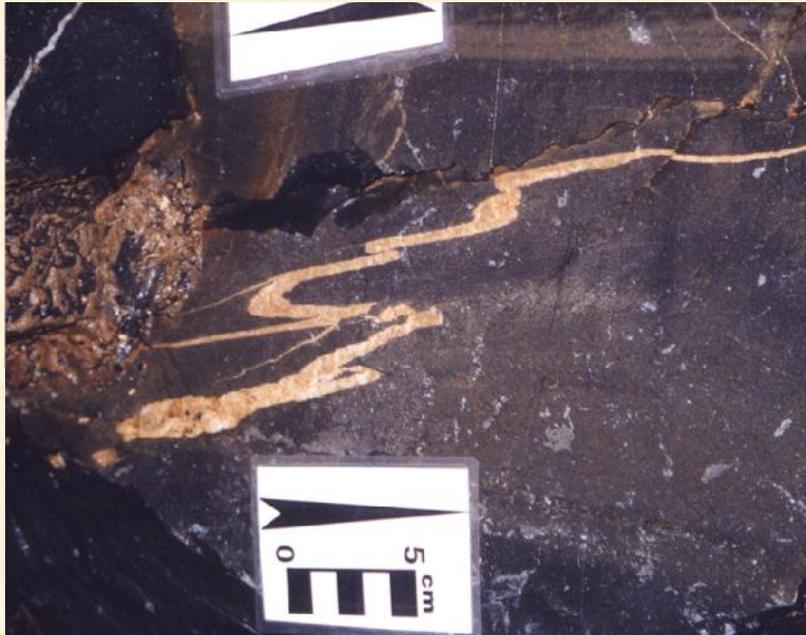


Brecha em gnaiss do Complexo Atuba -
Vale do Ribeira. Fotos: E. Salamuni

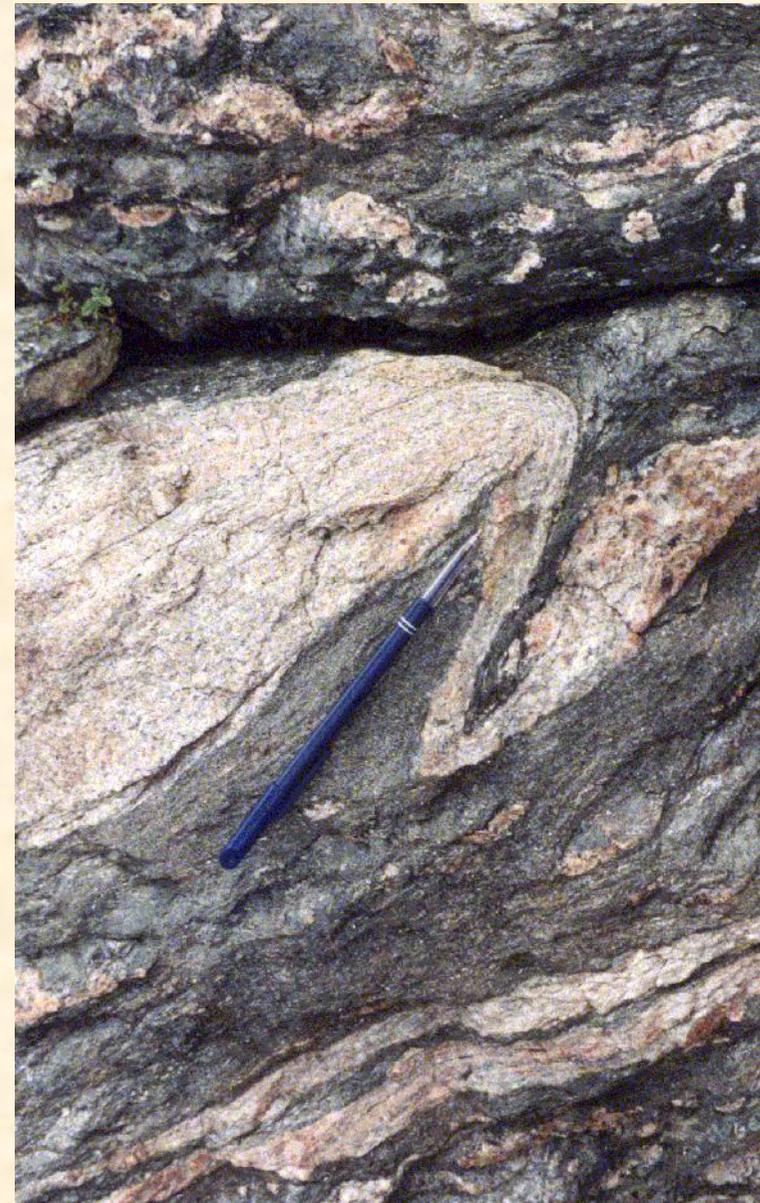


Brechas em quartzito da Cadeia Alpina -
Apeninos, Elba (Itália). Foto: L. Chavez-Kus

Dobras de arrasto geradas em
cinturões de cisalhamento rúptil-
dúctil



Mármore do Grupo Açungui.
Itaperuçu (PR) Foto: E. Salamuni



Gnaiss na Cadeia
Andina. Foto: E.
Salamuni

Geração de tectonitos dúcteis



Gnaise do Complexo Atuba. Curitiba (PR), Pedreira Boa Vista - Foto: L. Chavez-Kus

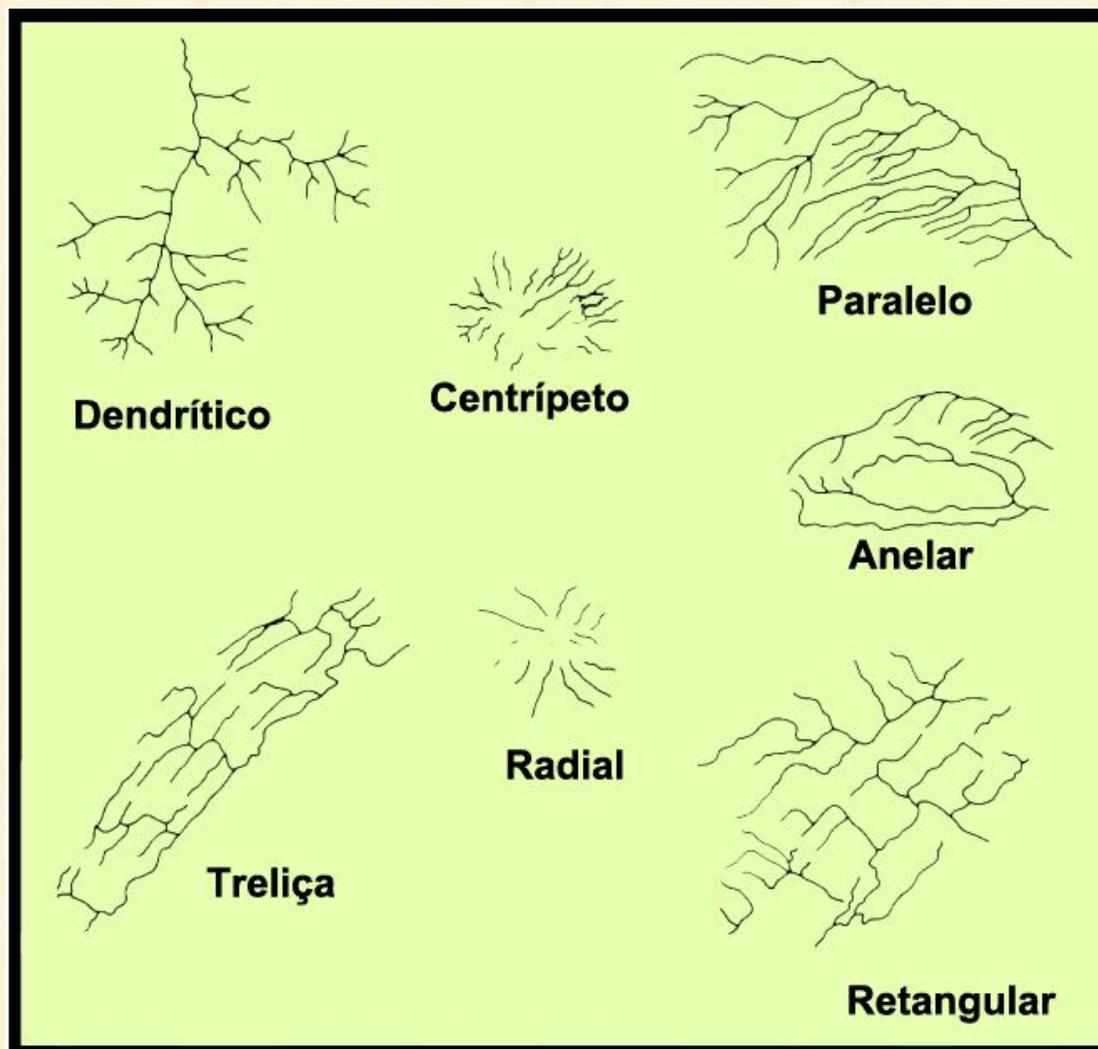
ELEMENTOS DE RECONHECIMENTO DE FALHAS: CRITÉRIOS GEOMORFOLÓGICOS

- Deslocamentos de serras
- Desvios e anomalias no padrão de drenagem
- Facetas trapezoidais ou triangulares
- Presença de escarpas

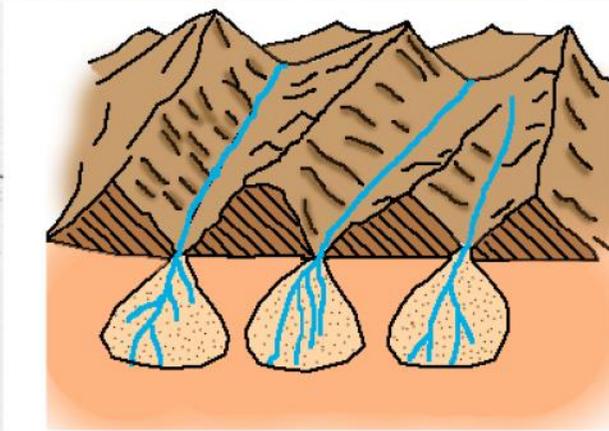


Montanhas rochosas
Foto: autoria
desconhecida

Tipos estruturados de padrões de drenagem, que são controladas por falhas:

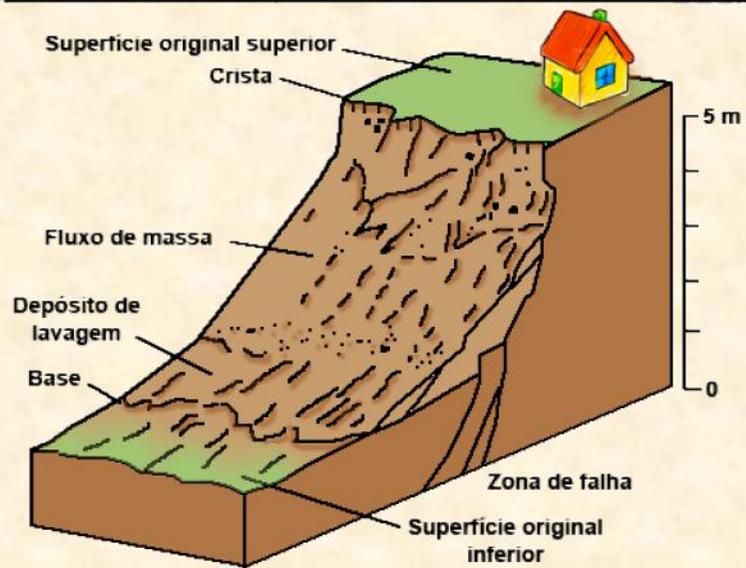


Facetas triangulares e/ou trapezoidais

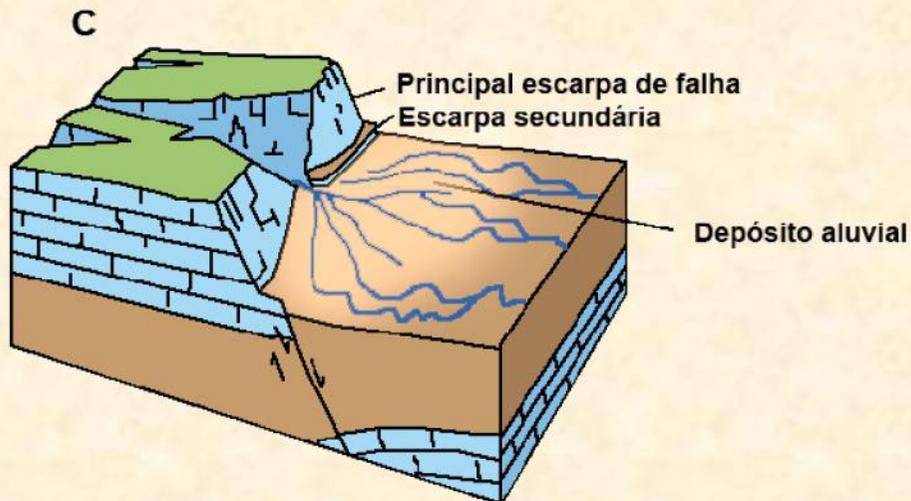
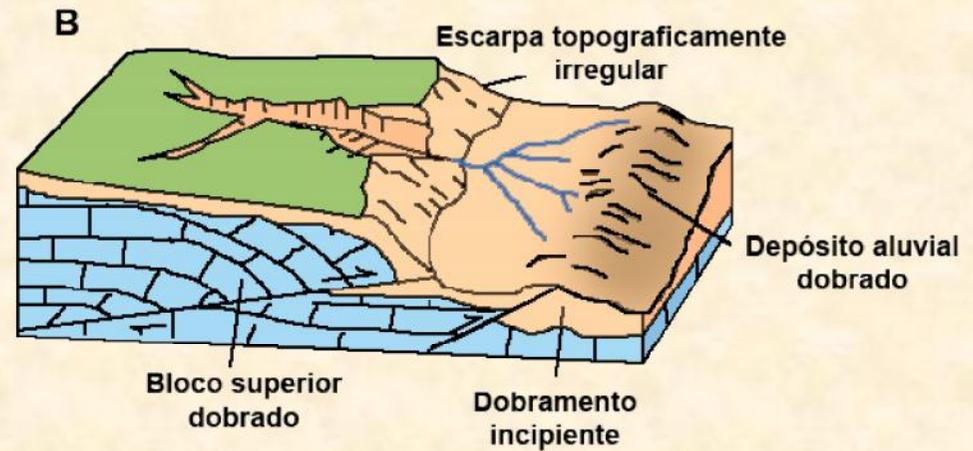
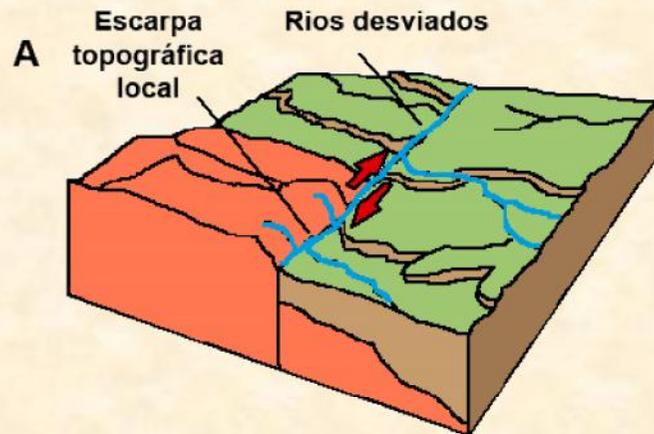


Wasatch Montains, Central Utah

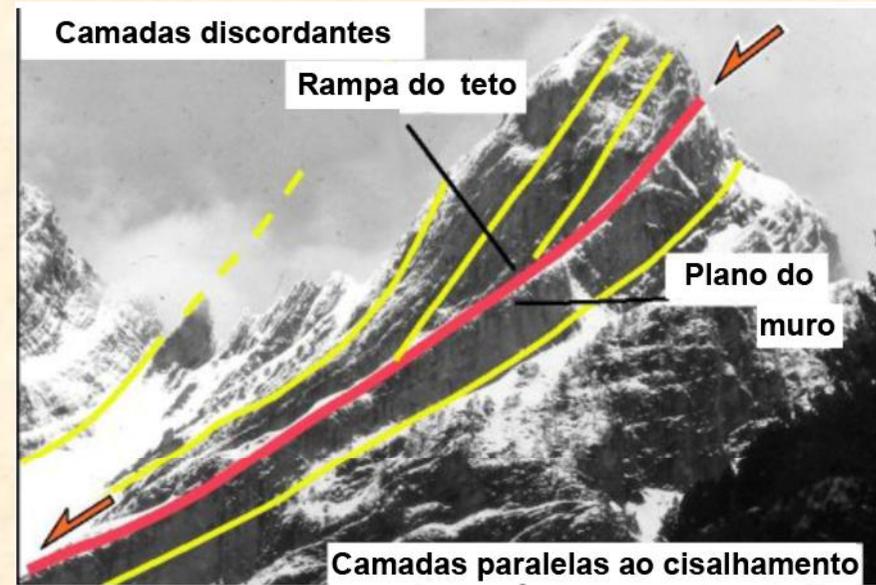
Presença de escarpas



Morfoestruturas diferenciadas em escarpas de diferentes naturezas



Estruturas em grande escala



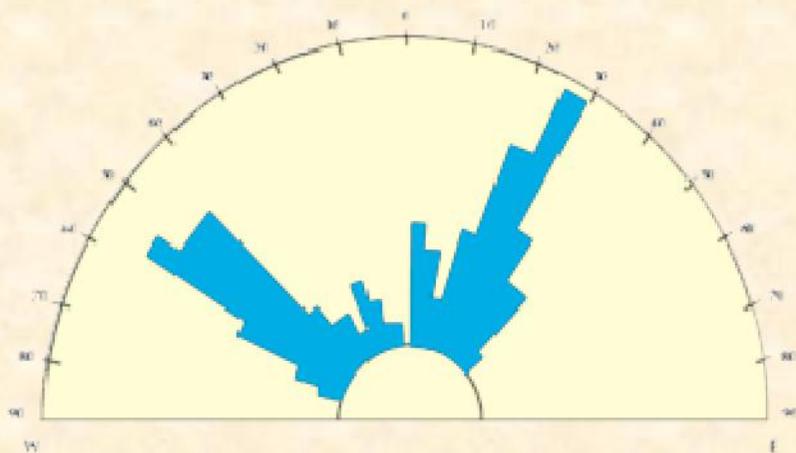
Fonte: <http://earth.leeds.ac.uk>

MÉTODOS DE ANÁLISE DE PLANOS DE JUNTAS E FALHAS

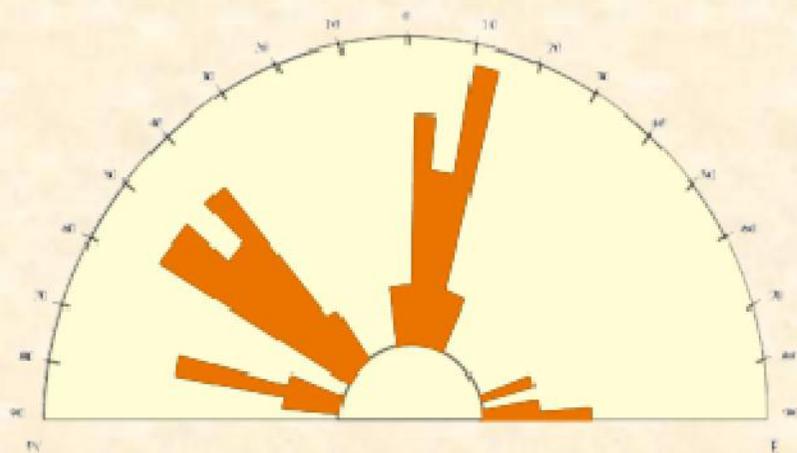
- Os métodos de análises mais comuns para a determinação de padrões de fraturas utilizam como ferramenta o Diagrama de Rosetas (ou de Rosáceas), o Diagrama de Schmidt-Lambert, as Técnicas de Arthaud e dos Diedros Retos.
- No diagrama de rosetas é necessário estar atento ao fato de que neste tipo de análise as famílias de fraturas só estão representadas pela sua direção, não importando neste caso o mergulho das estruturas planares.
- Trata-se de um semicírculo, subdividido de 10° em 10° , semelhante a um transferidor. A linha N-S, coincide com o retículo do 0° (zero graus), já a linha E-W, coincide com o retículo de 90° . Subdivide-se o semicírculo em dois quadrantes: NW (0° a 90° W) e NE (0° a 90° E).

- A linha E-W é subdividida em porcentagens. A escala varia de 0 a 100% (10 em 10%), tanto para W quanto para E, a partir do centro da linha, ou então poderá ser subdividida pela quantidade máxima de atitudes de fraturas para uma dada direção qualquer. Assim, conta-se a quantidade de fraturas de uma determinada área e calcula-se a porcentagem de fraturas direcionadas em um mesmo sentido. Por exemplo: se a quantidade de fraturas de uma área é 100 e 40% das mesmas estão direcionadas entre N20 e 30E, assinala-se uma fatia, que sai do centro do diagrama, entre os traços 20° e 30° até um semicírculo auxiliar que corresponde ao valor de 40%.

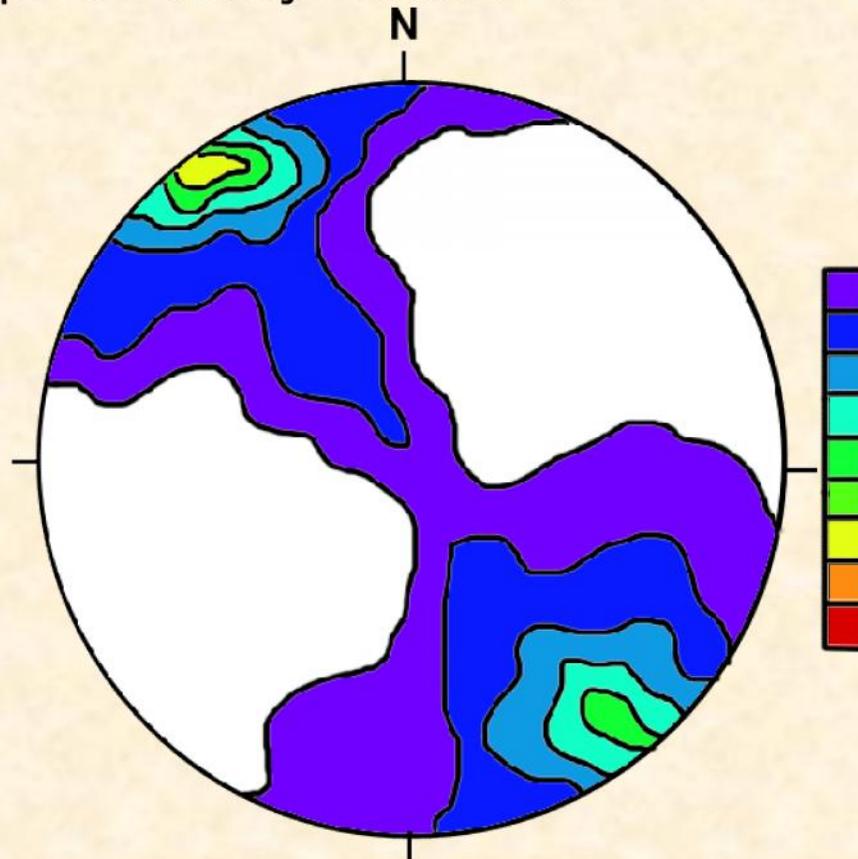
A



B

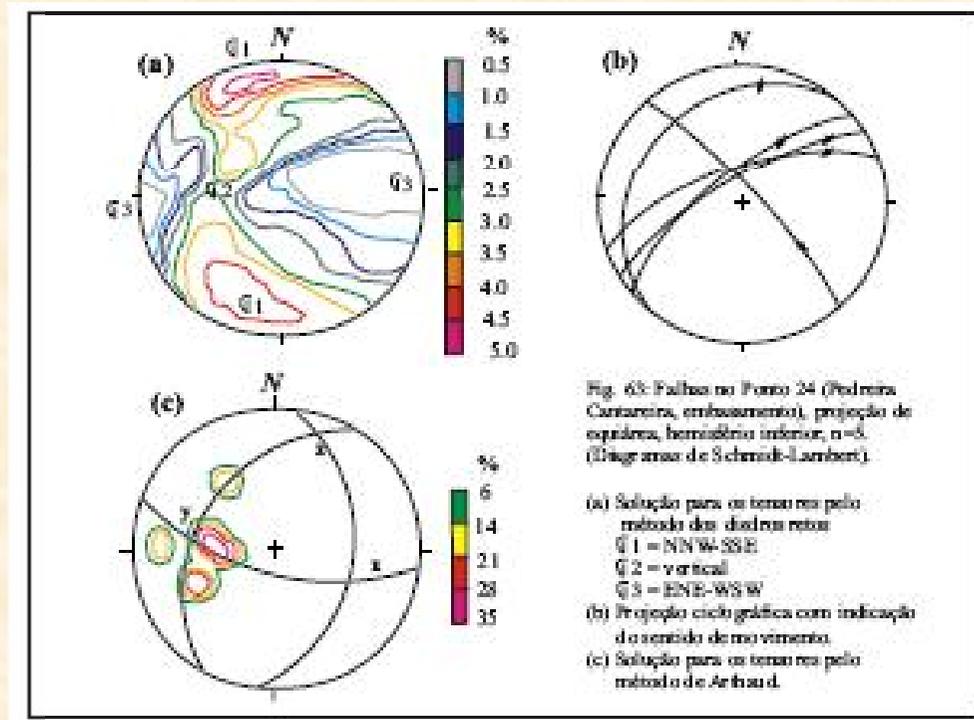
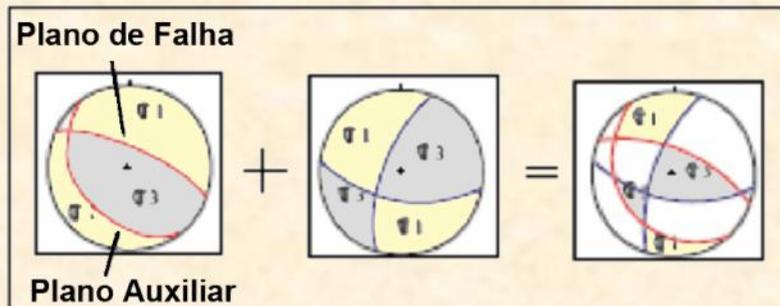
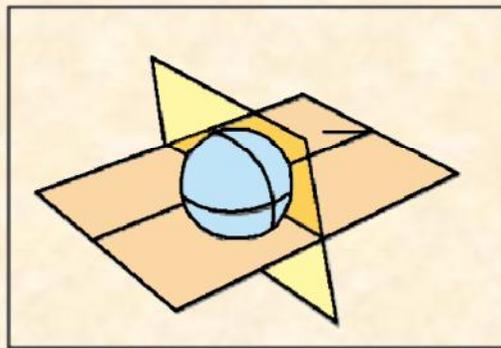


- Diagrama de Schmitd-Lambert: análise espacial de fraturas, por meio da utilização da direção e do mergulho dos planos. É possível realizar uma estatística gráfica com os dados e definir a concentração máxima que representará o plano de fratura médio (ou mais representativo) para o maciço analisado.



Fonte: adaptado de E. Salamuni (1998)

- Técnicas de Arthaud e dos diedros retos: análise espacial das fraturas, utilizando-se tanto a atitude da direção quanto os mergulhos dos planos. Neste caso também se utiliza de estruturas secundárias tais como as estrias (slickensides) presentes no plano de falha, bem como indicação do sentido de movimento.



Fonte: adaptado de Angelier & Mechler (1977)

Fonte: E. Salamuni (1998)