

GEOLOGIA ESTRUTURAL

Aula 3

Regimes e Processos de Deformação

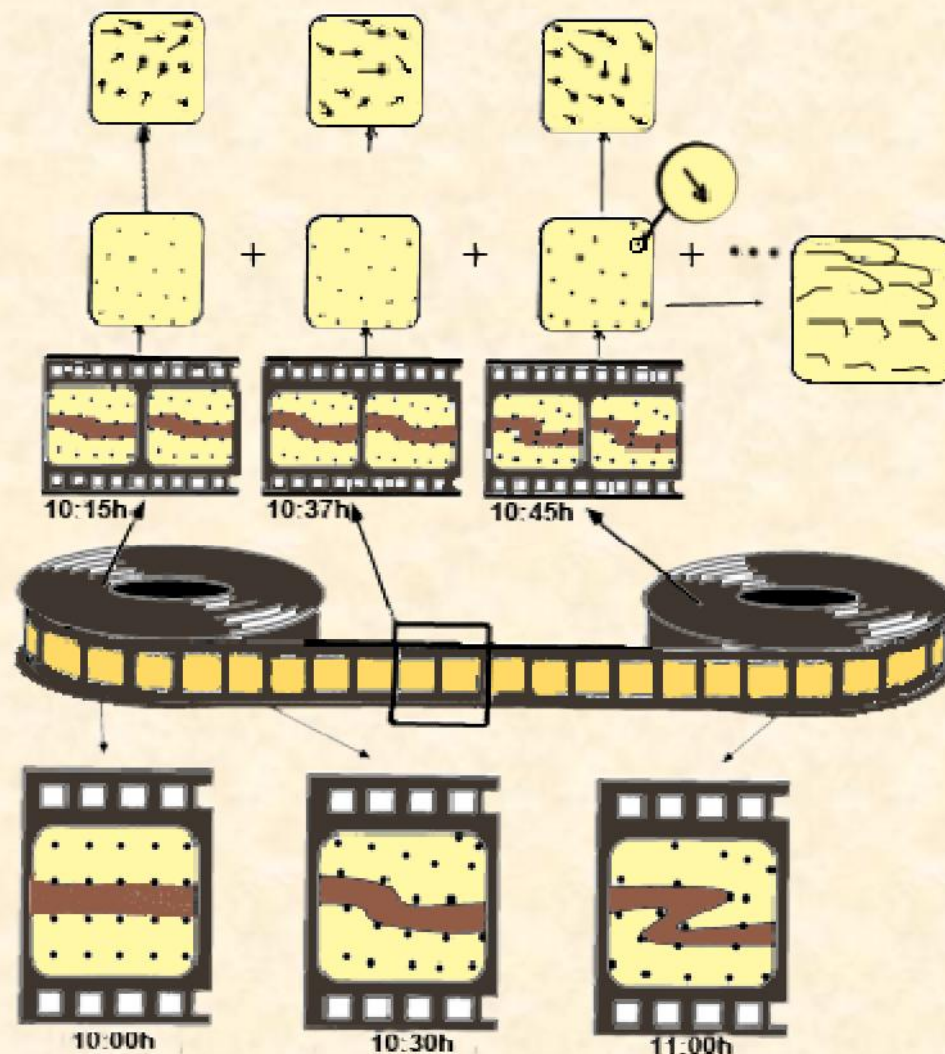
Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

REGIMES E PROCESSOS DE DEFORMAÇÃO

CONCEITOS GERAIS

- As mudanças mecânicas nos maciços rochosos são decorrentes dos movimentos tectônicos, impostos por forças originadas no manto e no interior da crosta terrestre (ou endógenas).
- As rochas estão sujeitas a mudanças de um estado inicial para um final. Esta passagem, denominada deformação, é observada em dois momentos:
 - (a) Deformação finita: estado final da rocha após a deformação, configurando modificações impostas por eventos sucessivos de deformação.
 - (b) Deformação progressiva: trajetória que o objeto geológico – ou parte dele - percorre desde o estado original até o estado final.

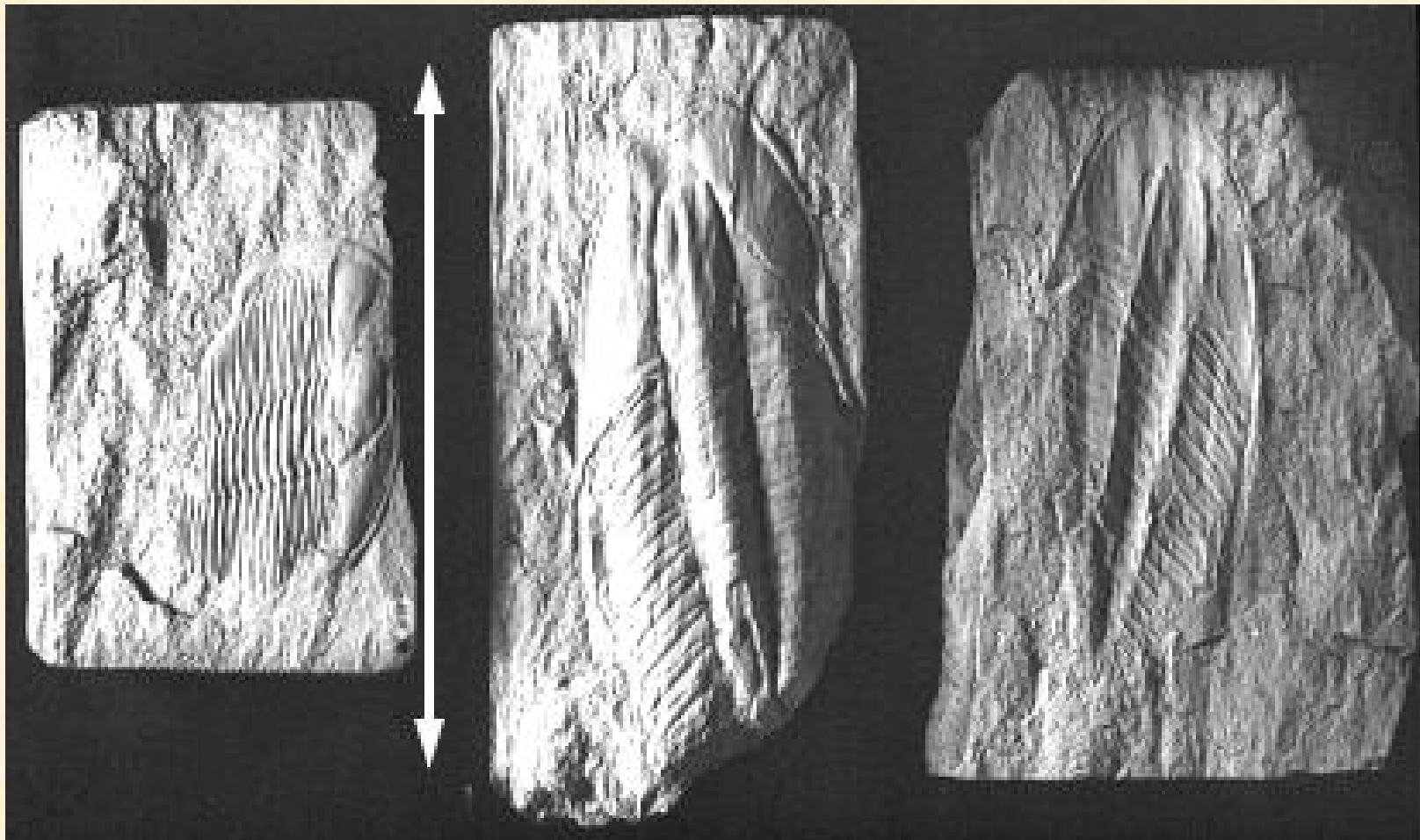


Caminho da deformação (strain):

deformação progressiva incremental (infinitesimal) até a deformação finita.

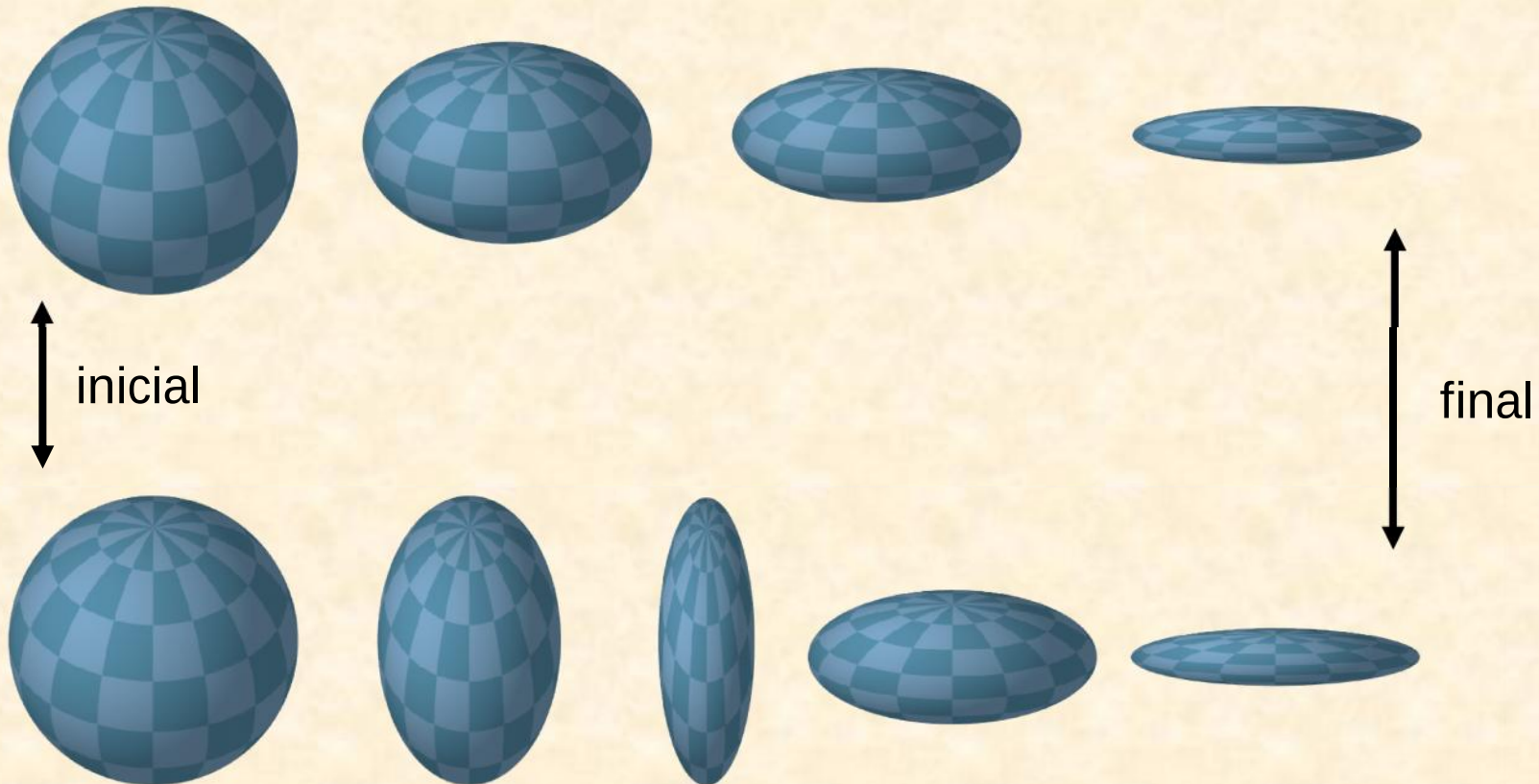
As trajetórias de deformação envolvem etapas sucessivas ou pulsos de atividade.

Fonte: Passchier e Trouw (2005)



Incremento da deformação: ocorre em momentos infinitesimais que, somados, podem representar longo tempo da evolução geológica.

Algumas possibilidades desde o estado inicial até o estado final



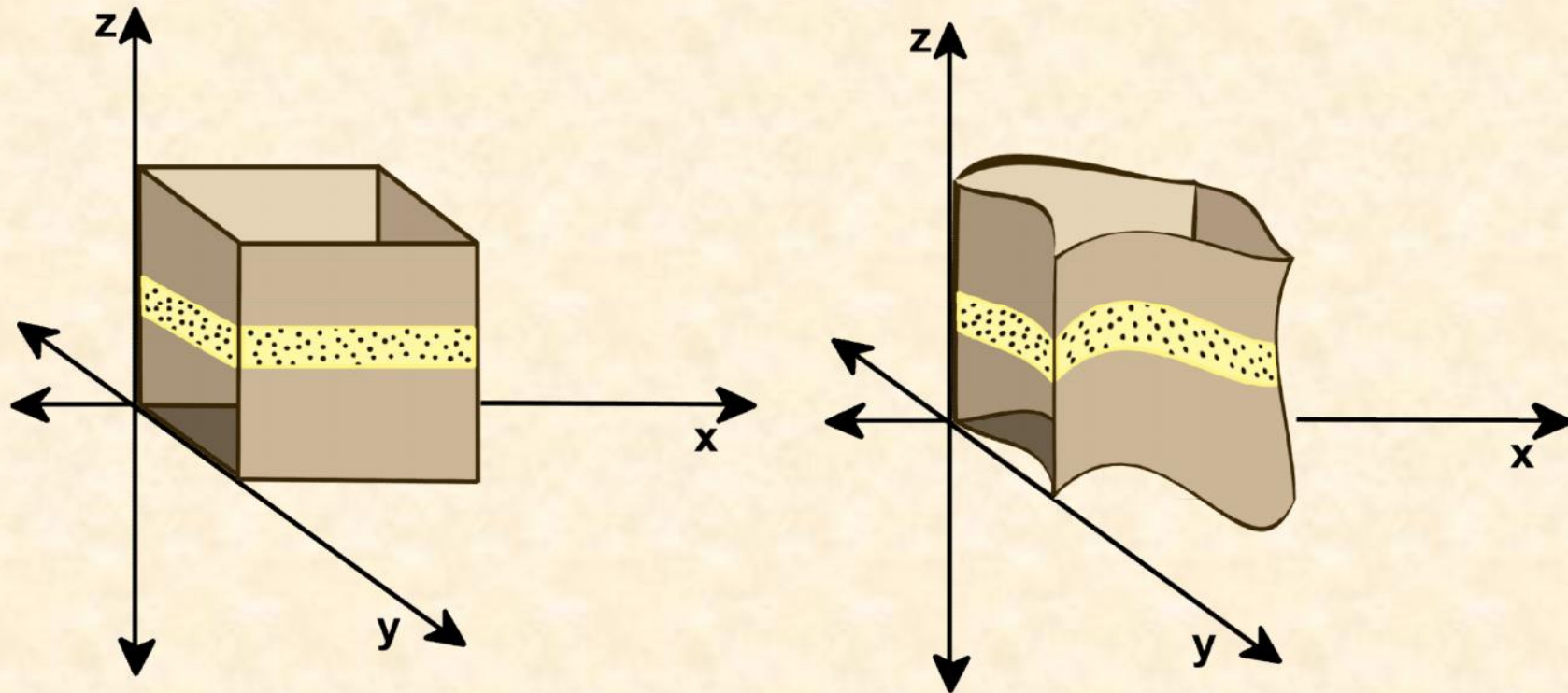
- caminho superior: encurtamento na vertical
- caminho inferior: encurtamento na horizontal inicial e posterior encurtamento na vertical.

A deformação envolve uma ou mais transformações físicas nas rochas, tais como:

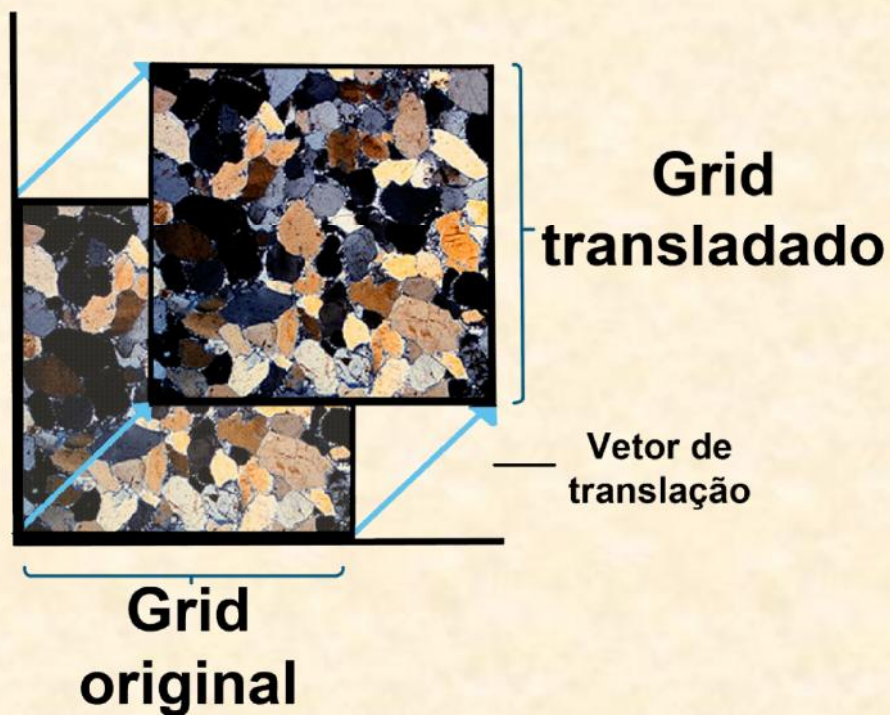
- Distorção: mudança de forma.
- Rotação: mudança de atitude
- Translação: mudança de posição.
- Dilatação: mudança de volume (positiva ou negativa).

DISTORÇÃO

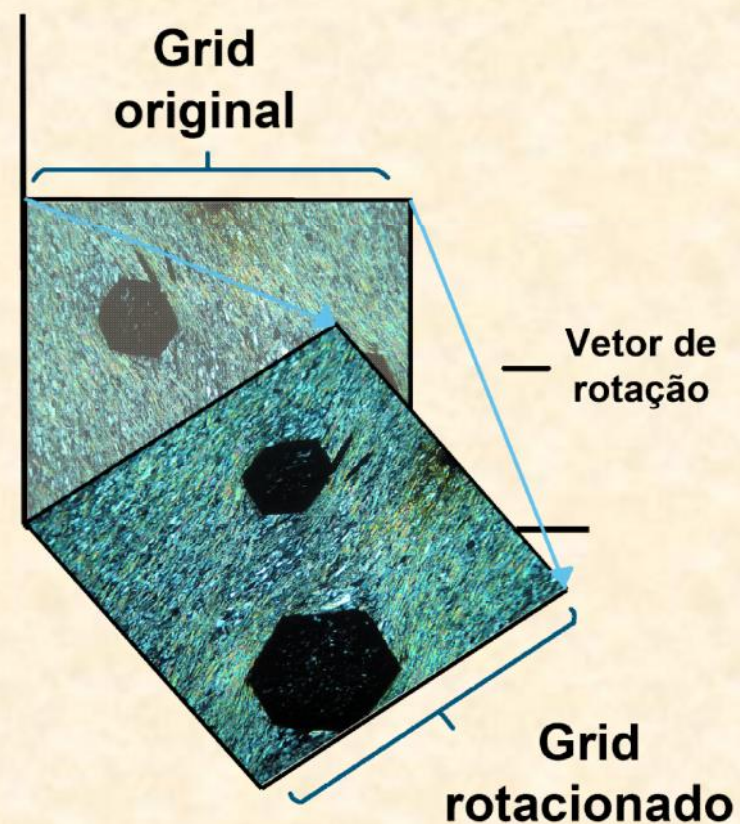
mudança de forma



TRANSLAÇÃO
mudança de posição



ROTAÇÃO
mudança de atitude



MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO

- Os minerais possuem propriedades mecânicas diferenciadas, refletindo um comportamento diferenciado: rúptil, dúctil ou um estado intermediário (dúctil-rúptil ou rúptil-dúctil).
- A deformação inicial se processa em nível cristalino e se propaga por toda a rocha, de maneira homogênea ou heterogênea.
- Há quatro mecanismos de deformação principais

Microcataclase: fragmentação dos grãos minerais, a partir de microfissuras.

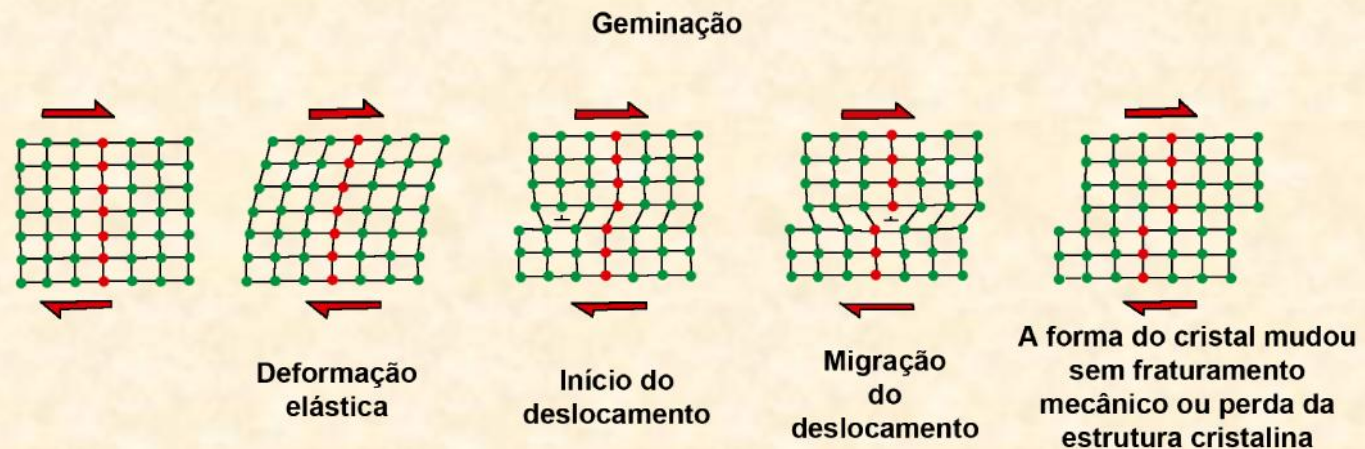
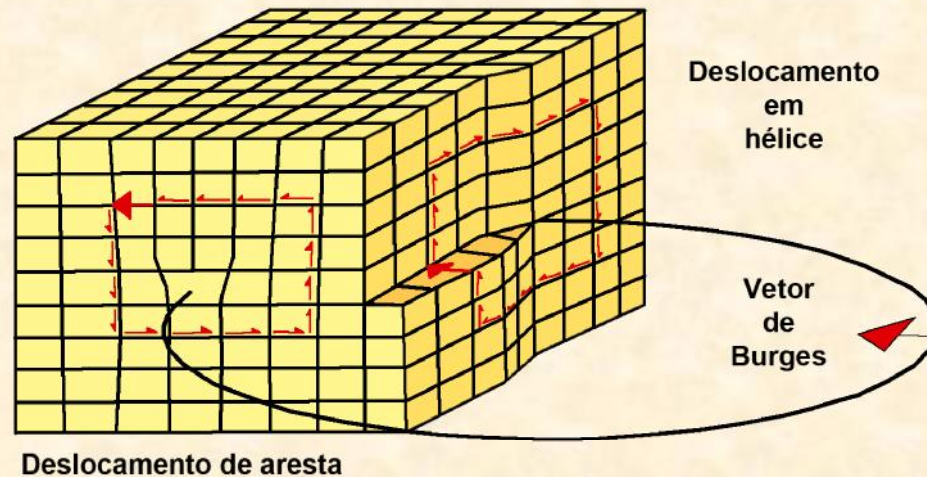
Deslizamentos intracristalinos: deslocamentos ao longo de planos reticulares que geram defeitos cristalinos, manifestados, por exemplo, por meio de distorções e geminação.

Deslizamentos intergranulares: ocorrem ao longo das superfícies de contato entre os grãos. Representam acomodações entre grãos.

Fluxo por difusão: envolve transferência de elementos através dos grãos (fusão sólida).

Deslizamento intracristalino

provocado por stress em escala de retículo do cristal



Fonte: adaptado de Passchier e Trouw (1996)

Stress em nível cristalino

Exemplo do quartzo

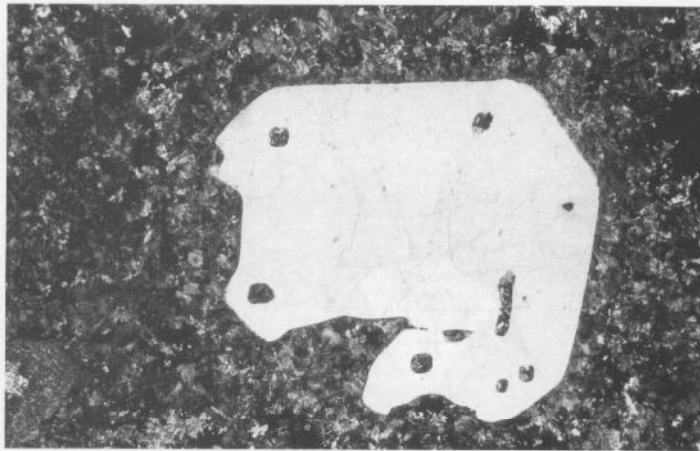


Fig. 3.5. Subhedral quartz crystal in an undeformed ignimbrite, Ornica, Southern Alps, Italy. Width of view 4 mm. CPL

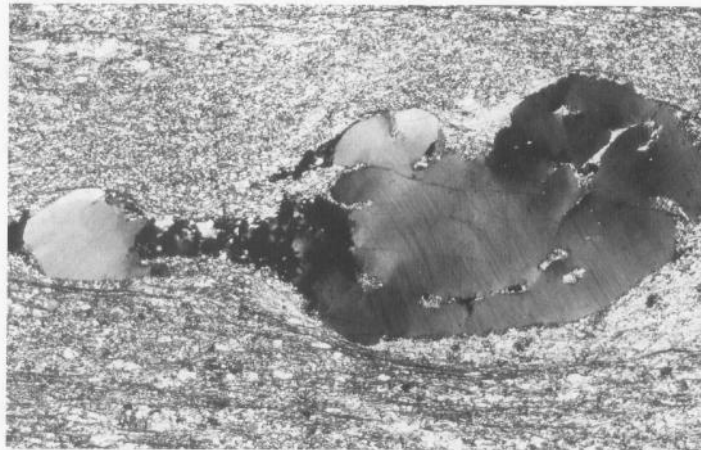


Fig. 3.6. Quartz crystal flattened by intracrystalline deformation in a deformed ignimbrite. The crystal is boudinaged and the fragment on the *right hand side* shows deformation lamellae and undulose extinction. Argylla Formation, Mount Isa, Australia. Width of view 4 mm. CPL

Fonte: Passchier e Trouw (1996)

Deslizamento intergranular

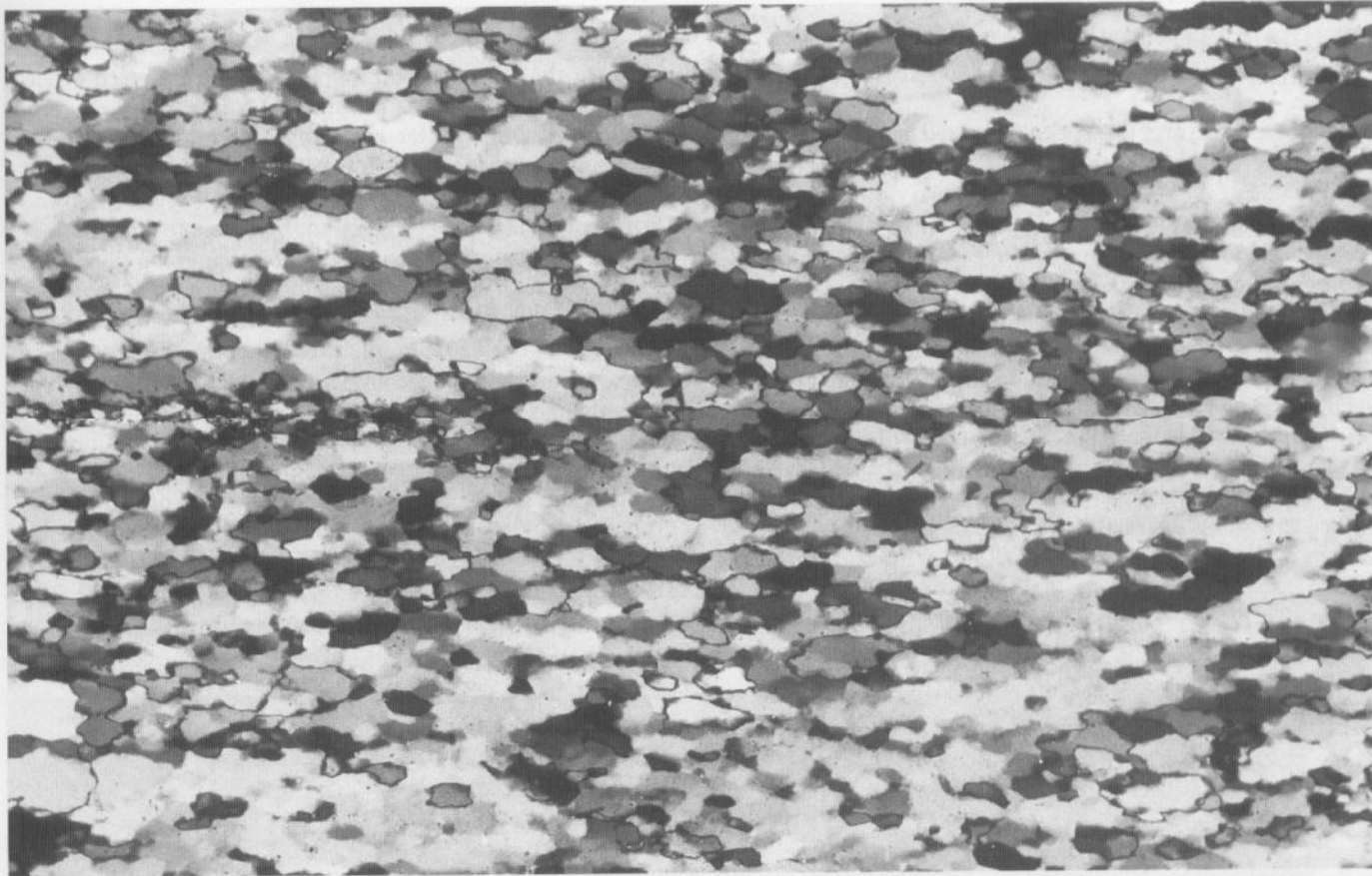


Fig. 3.24. Typical fabric of dynamically recrystallised quartz. Grains have a weak shape-preferred orientation which defines a continuous foliation (Chap. 4.7). Granite mylonite, Qin Ling mountains, China. Width of view 1.8 mm. CPL

Microcataclase

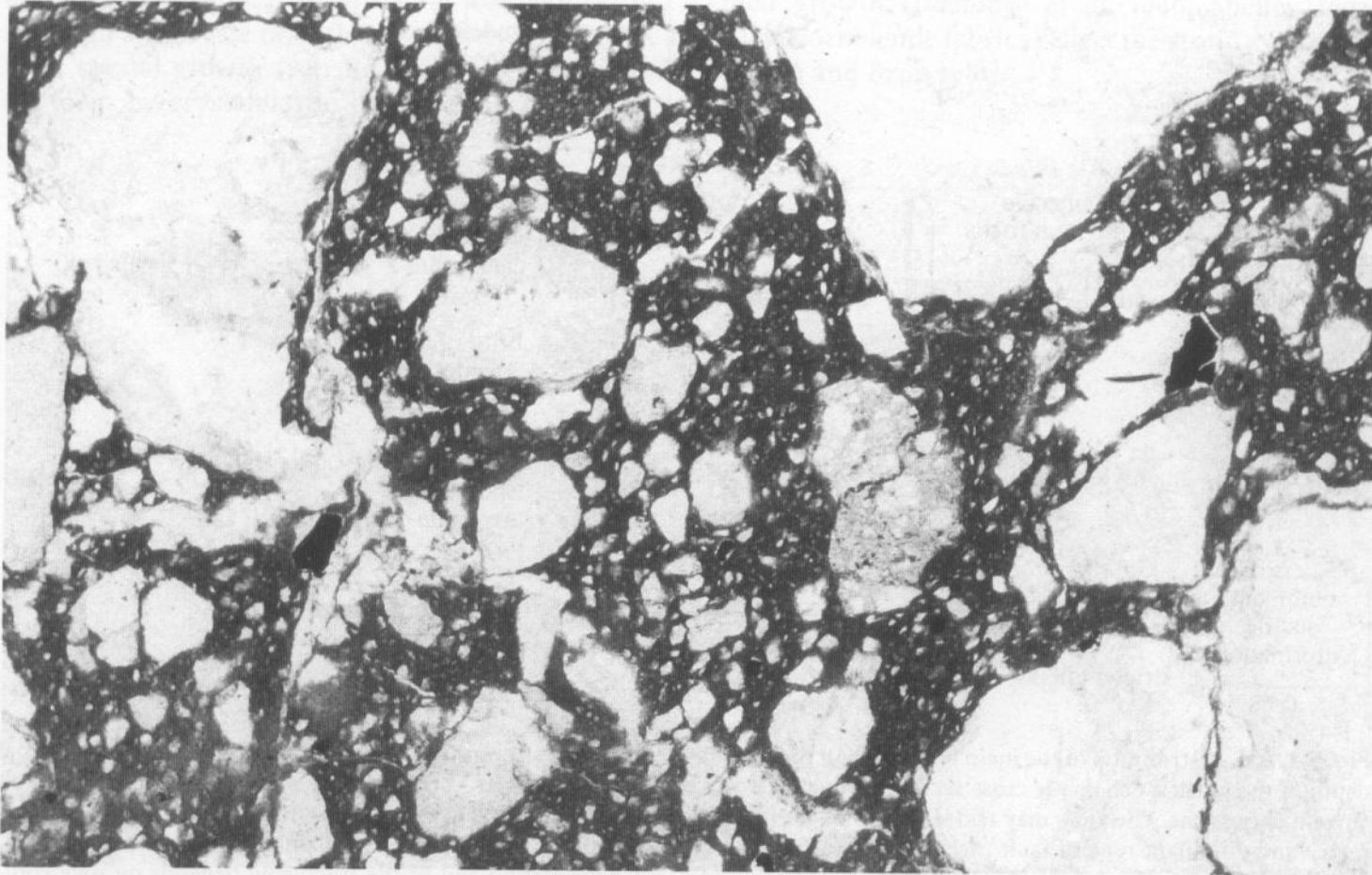


Fig. 5.2. Cohesive fault breccia in quartzite. Angular fragments of variable size are present. Orobic Alps, Italy. Width of view 8 mm. PPL

Fonte: Passchier e Trouw (1996)

Fluxo por difusão,
observado a partir de seções
de rochas (lâminas delgadas).
Os minerais apresentam
bordas irregulares, difusas
e/ou interdigitadas
(intercrescimento gráfico, por
exemplo) .

Fonte: Passchier e Trouw (1996)

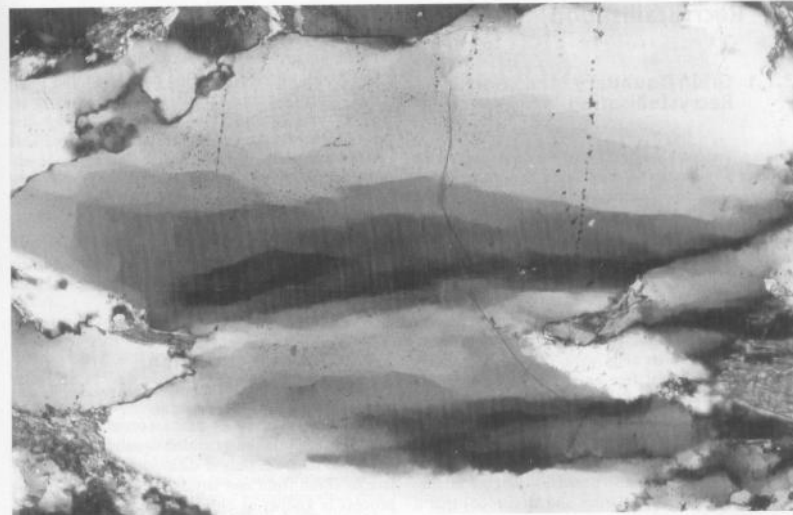


Fig. 3.15. Subgrains in quartz (horizontal), oblique to trails of fluid inclusions (vertical). Quartzite, Mt Isa, Australia. Width of view 1.8 mm. CPL

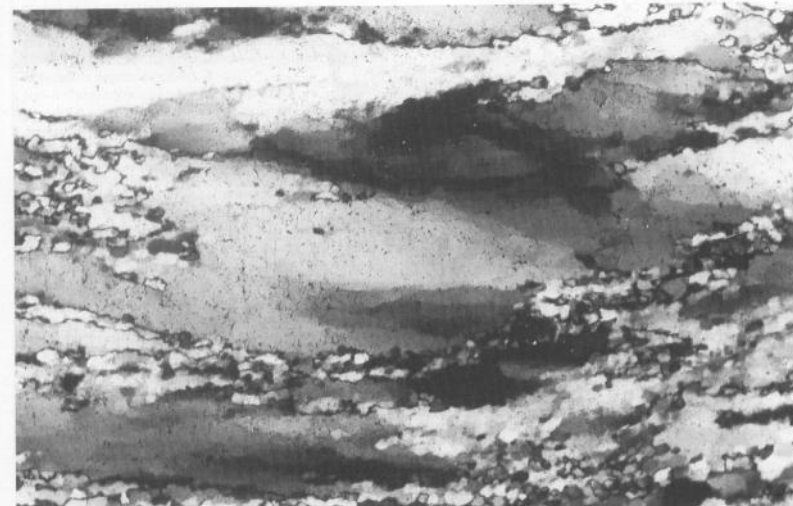
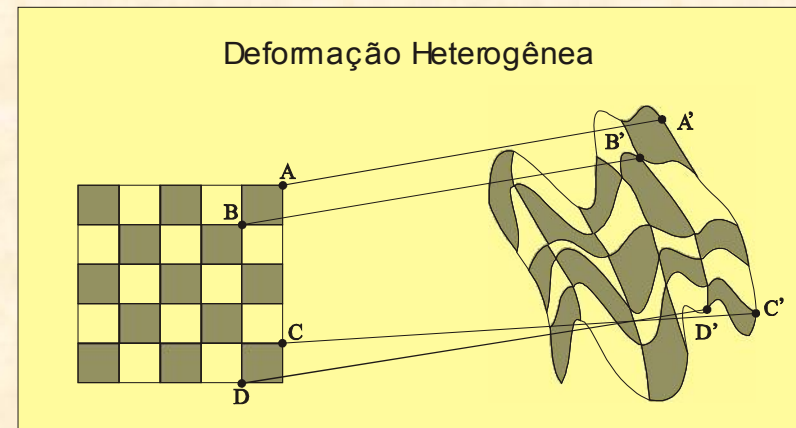
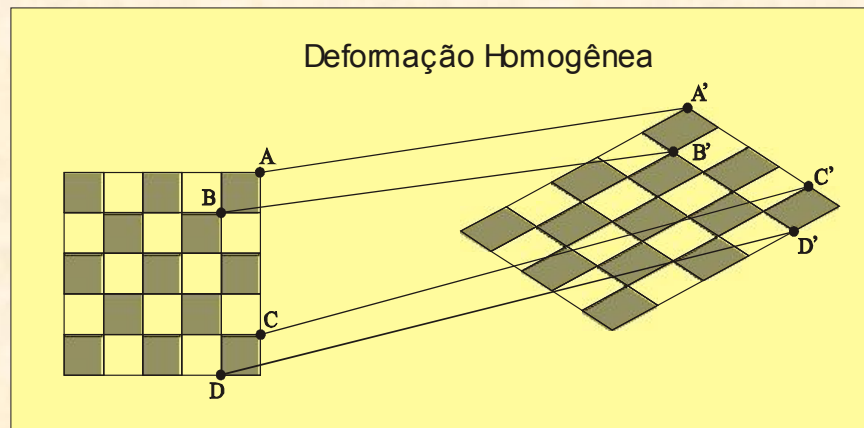
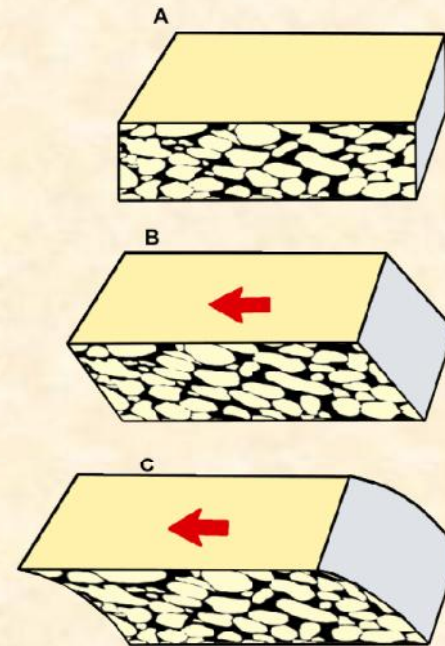


Fig. 3.16. Typical fabric of dynamic recrystallisation in quartz. Relics of large old quartz grains with undulose extinction and elongate subgrains pass laterally into domains of small, dynamically recrystallised grains. St Barthélemy, Pyrenees, France. Width of view 1.8 mm. CPL

PROCESSOS E COMPORTAMENTOS DA DEFORMAÇÃO

- A deformação pode ser instantânea como ocorre em evento sísmicos, ou então o processo se dá por meio de incrementos infinitesimais, gerando uma deformação progressiva.
- A deformação pode ser homogênea (uniforme) ou heterogênea (não uniforme)



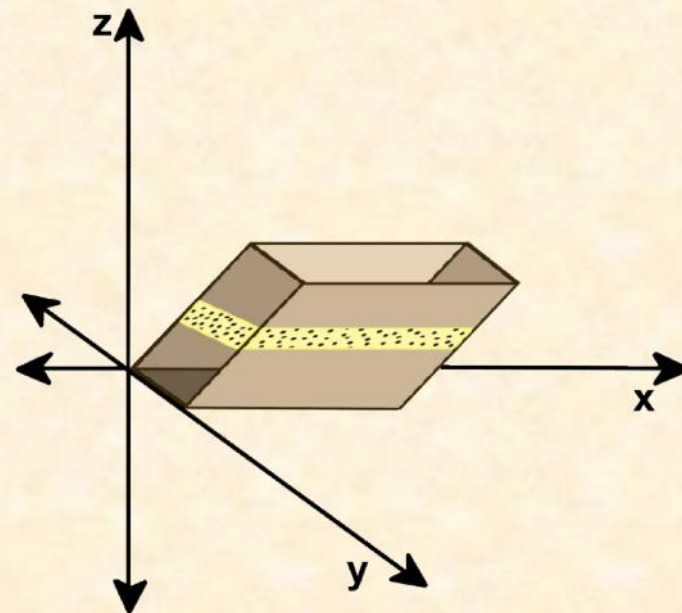
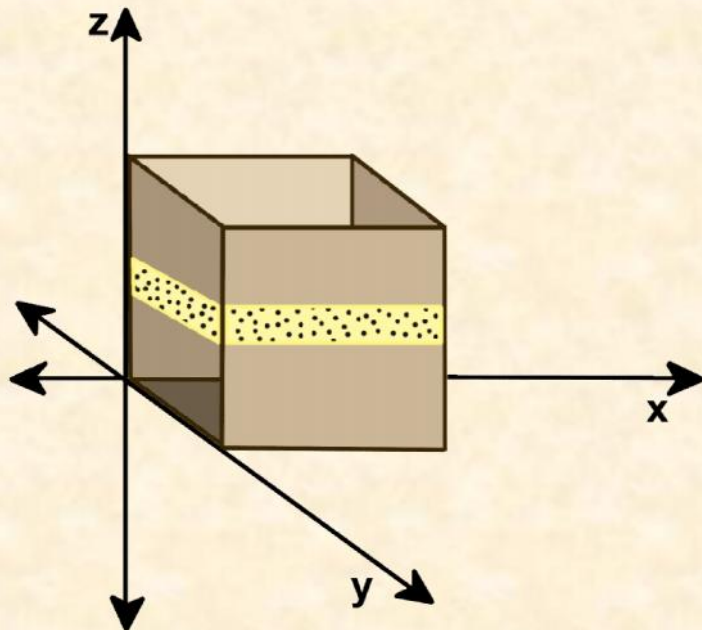
Fonte: modificado de Hobbs, Means, Williams (1976)

- Deformação homogênea: elementos originalmente paralelos (planos e linhas) se mantêm paralelos durante todo o processo deformacional (característica típica de translação).
- Pode ser representada no espaço pelo elipsóide de deformação, resultante de deformação de uma esfera imaginária inicial, composta por um sistema triortogonal de eixos cinemáticos:

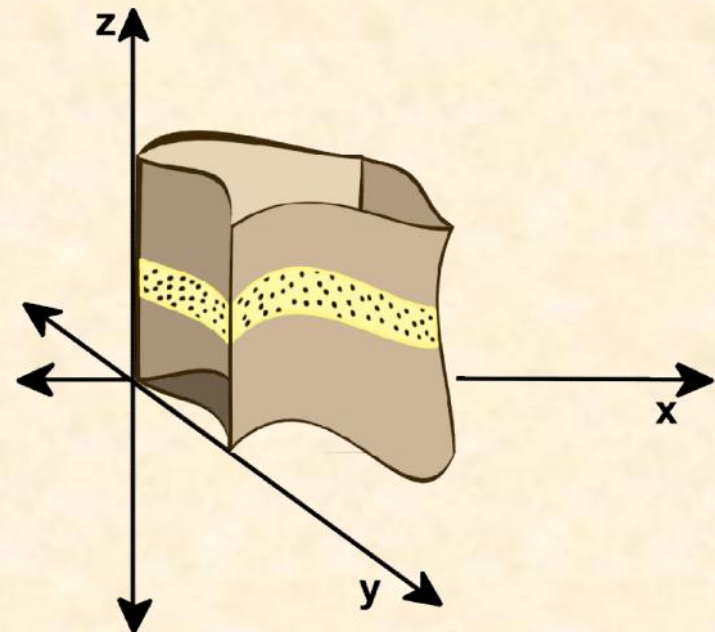
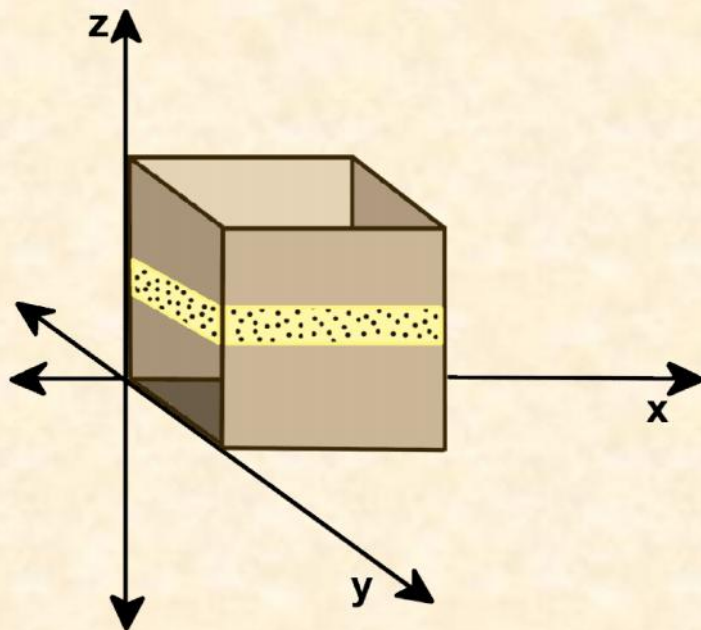
X = eixo de estiramento máximo

Y = eixo intermediário;

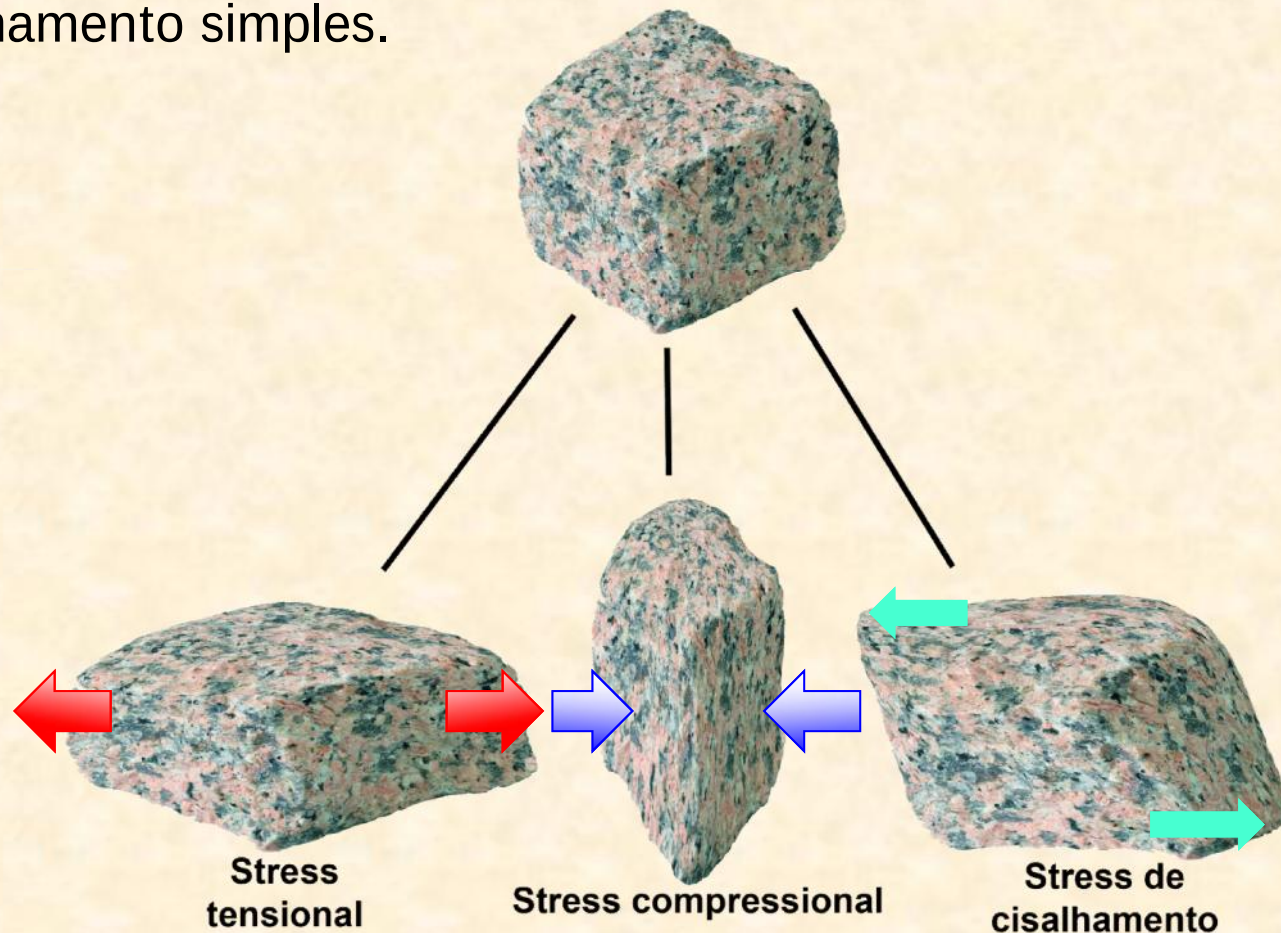
Z = eixo de encurtamento máximo



- Deformação heterogênea: o paralelismo não é mantido e a deformação varia de ponto a ponto.
- Na natureza quase a totalidade dos casos de deformação é heterogênea. Como a análise estrutural nesse contexto é complexa, procura-se subdividir o objeto de tal forma que cada fração ou porção do maciço rochoso possa ser analisada do ponto de vista da deformação homogênea.

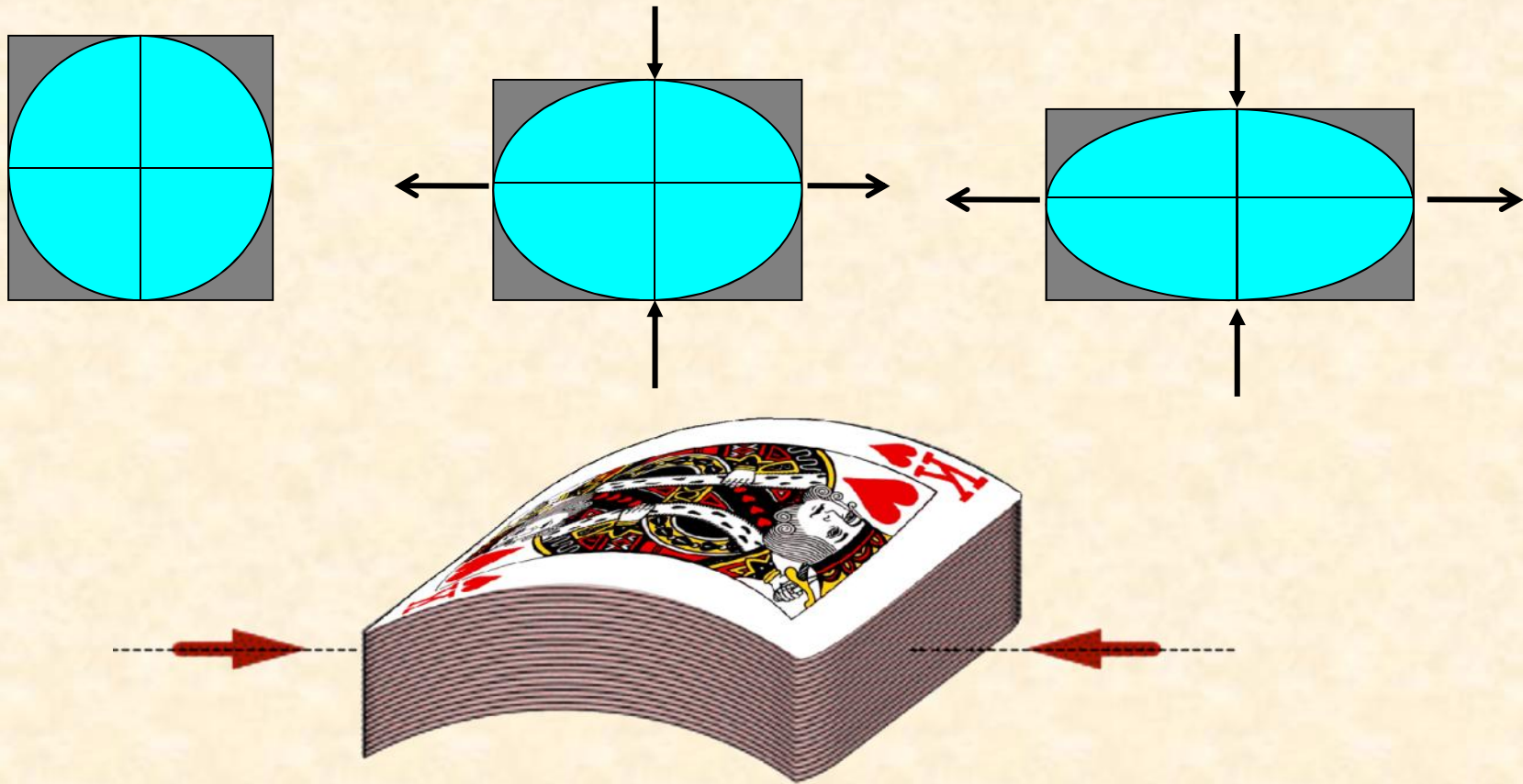


Tanto a deformação homogênea quanto a heterogênea podem sofrer processos de deformação diferenciados, representados por deformações não-rotacionais (coaxiais) ou rotacionais (não-coaxiais). Ambas envolvem o conceito de cisalhamento: em geologia estrutural o primeiro é chamado de cisalhamento puro e o segundo de cisalhamento simples.



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

Estes termos são sinônimos entre si e caracterizam processos de deformação que provocam movimentos no mesmo eixo de incidência (coaxial), porém com sentidos opostos.

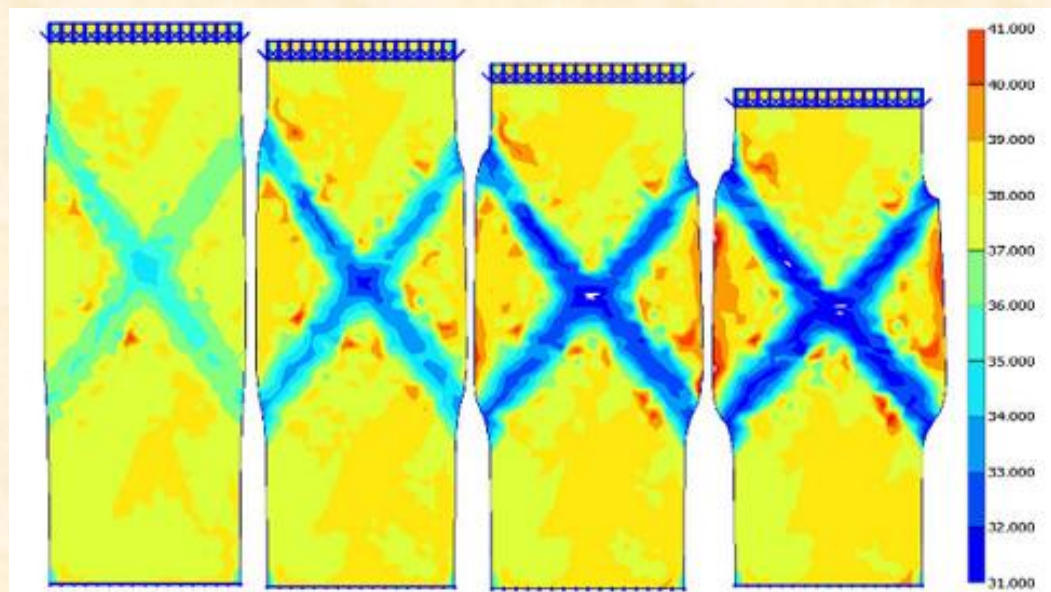


Na deformação coaxial ocorrem os seguintes tipos de comportamento:

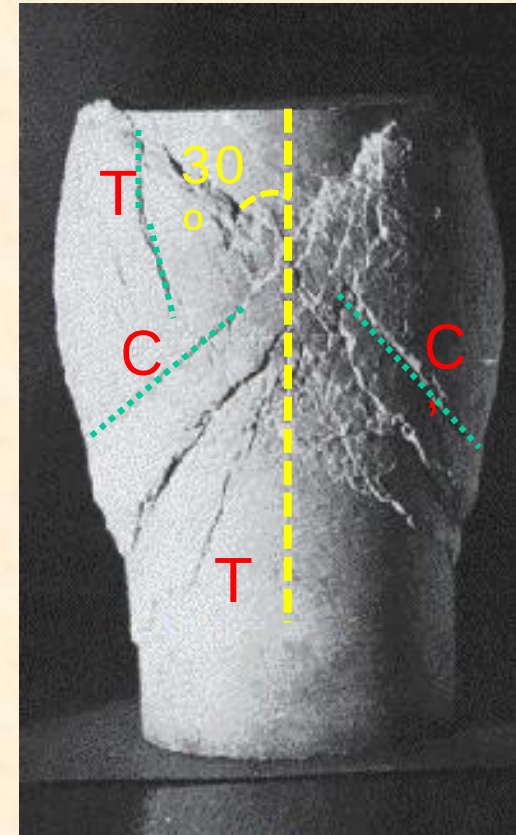
(a) Comportamento rúptil

Quando são geradas fraturas de tensão ou partição (T) e fraturas de cisalhamento (que podem caracterizar um par conjugado C e C').

As fraturas T e C formam ângulos θ teóricos da ordem de 30° entre si.



Fonte: Ricardo Teixeira (2001)



Esse é o princípio do modelo de fraturas de Anderson, que é o modelo mais simples, mas é a base da maioria dos outros modelos (Riedel, Moddy e Hill, Wilcox)

(b) Comportamento dúctil homogêneo

Há achatamento paralelo a Z (s_1) e escoamento plástico ou estiramento na direção X (s_3). Na direção de Y (s_2) poderá haver estiramento ou encurtamento.

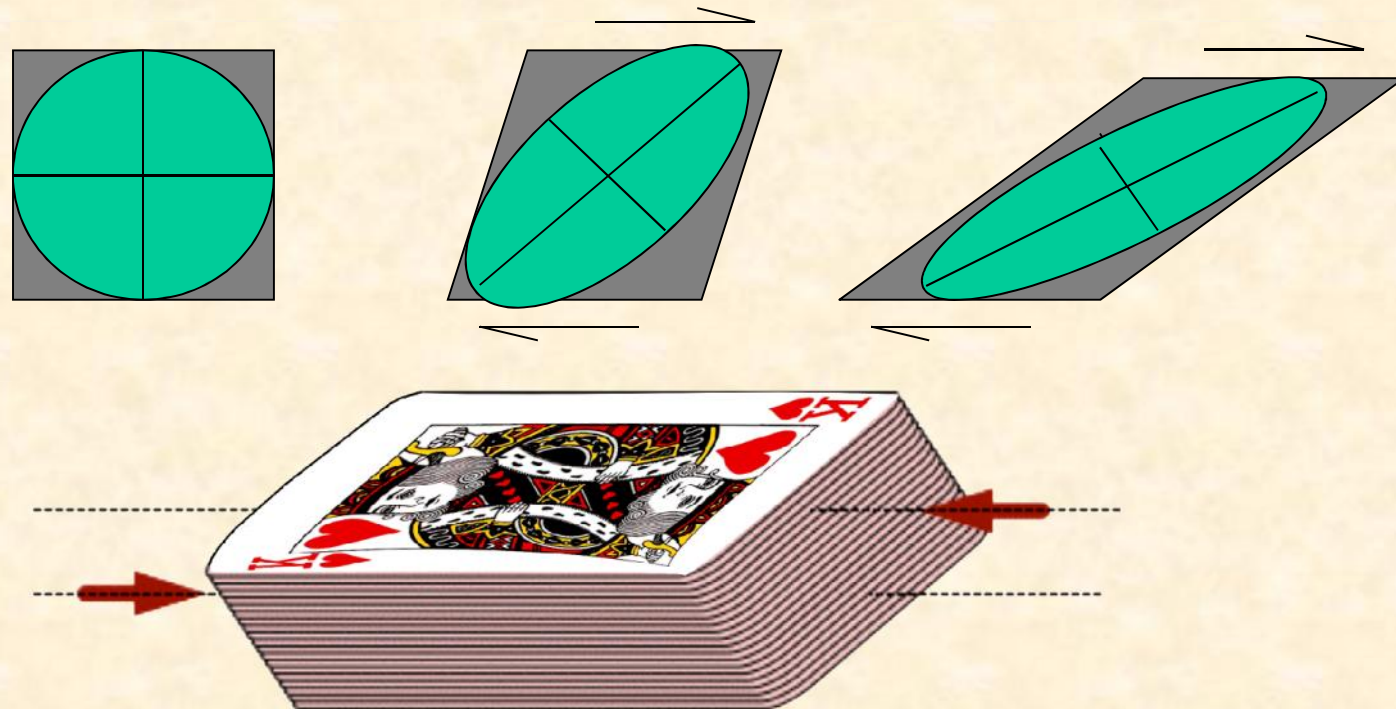
Esta deformação é chamada também de achatamento (flattening).

(c) Comportamento dúctil heterogêneo (ou não-homogêneo)

Há escoamento de algumas porções que fluem mais que outras. Na deformação heterogênea o estiramento pode resultar em boudinage enquanto o encurtamento pode resultar em ondulação.

Deformação não-coaxial (ou cisalhamento simples)

- Estes termos igualmente são sinônimos entre si e significam que a deformação provoca movimento rotacional no corpo.
- Há movimento em porções diferentes (não-coaxial) e com sentidos opostos. Este tipo de deformação envolve rotação desde a escala mineralógica até a escala de maciço rochoso.

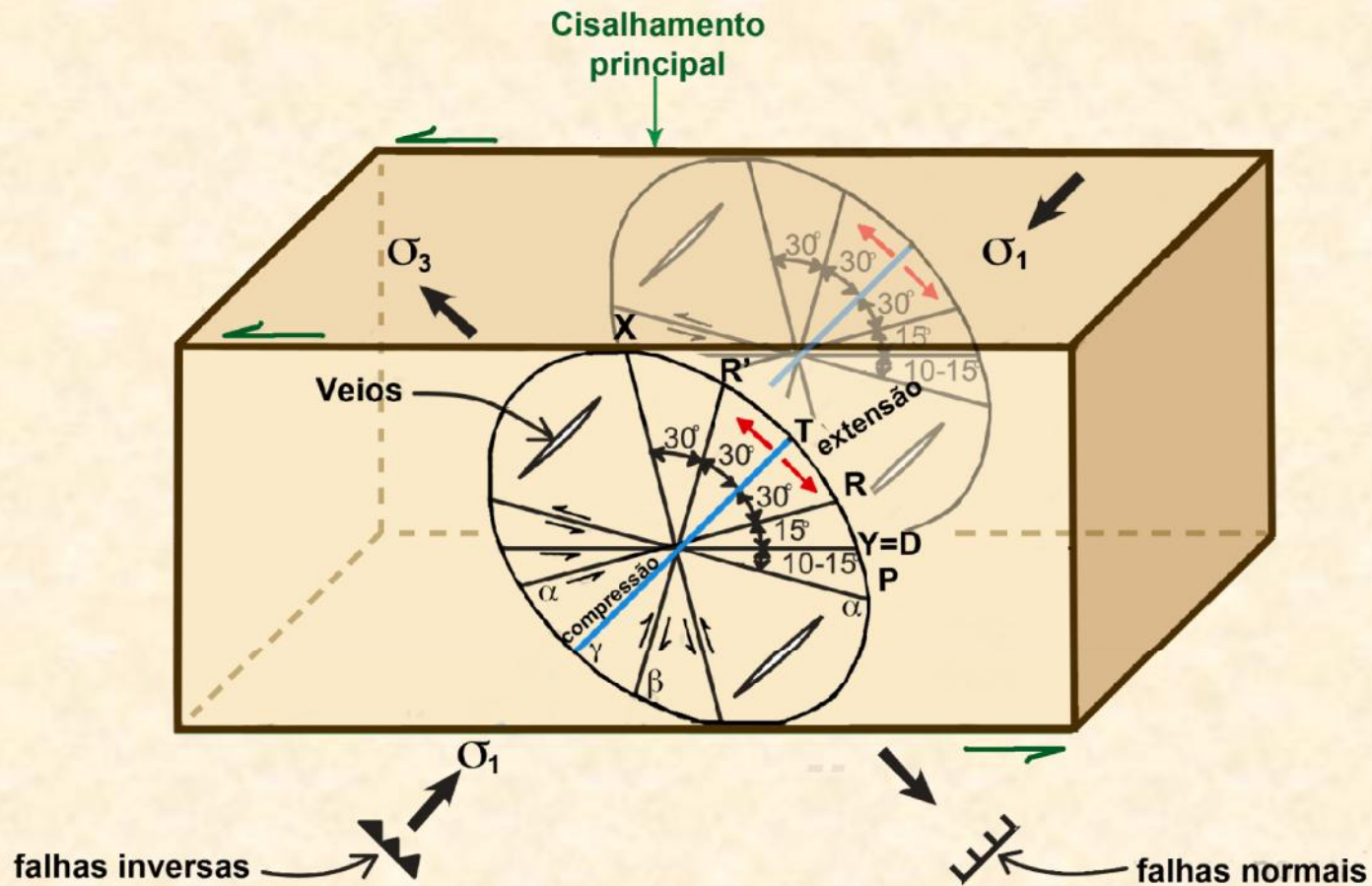


Da mesma forma que na deformação coaxial a deformação não-coaxial mostra os seguintes comportamentos:

(a) Comportamento rúptil

As discontinuidades que se desenvolvem encontram-se em modelo de fratura denominado de Modelo de Riedel (Riedel shear): ocorrem as seguintes estruturas:

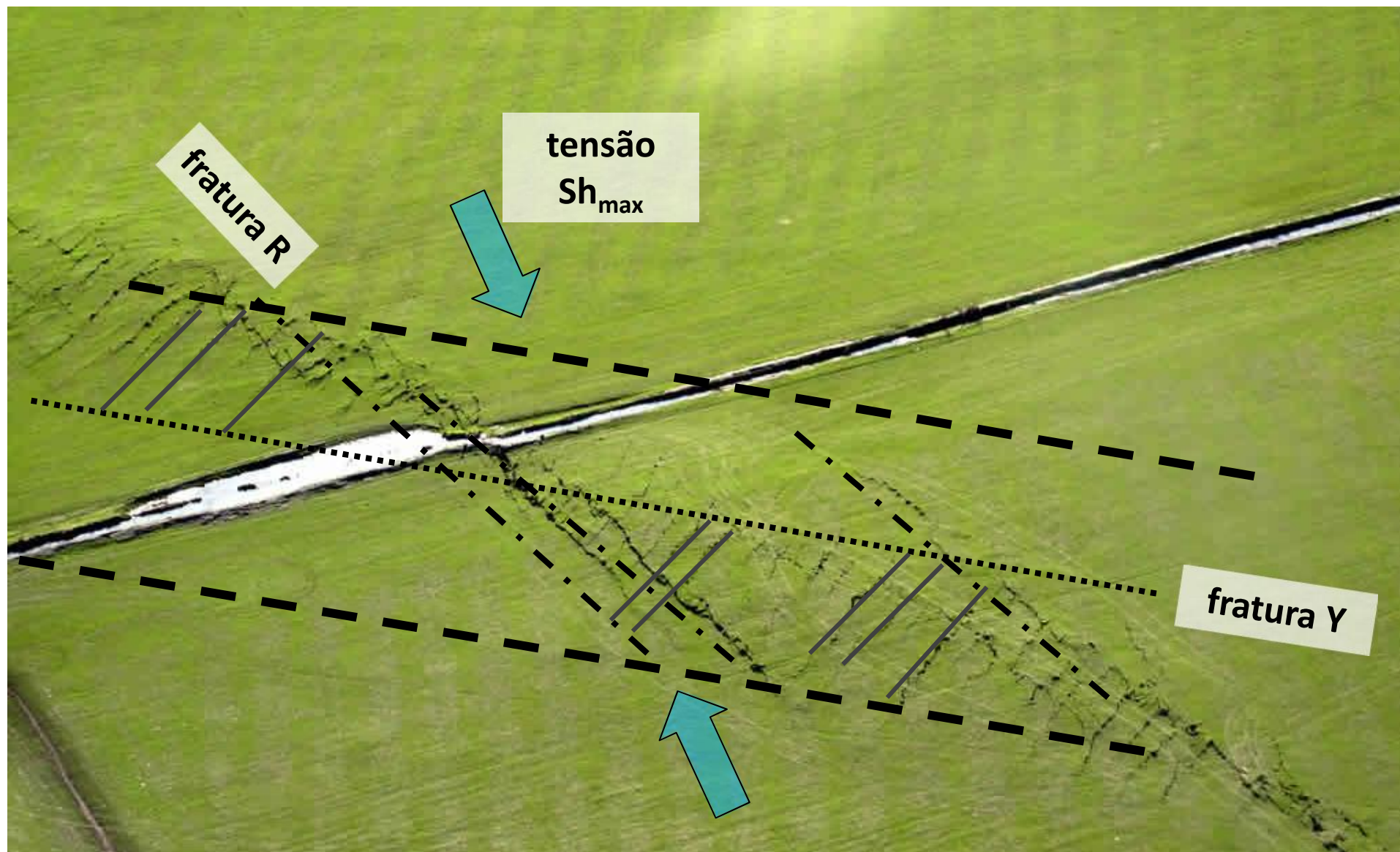
- fratura de tensão (ou partição) T: fratura de extensão ou distensão
- fratura de cisalhamento de RIEDEL (sintética ou R)
- fratura de cisalhamento conjugada de RIEDEL (antitética ou R')
- fratura de cisalhamento P (sintética secundária)
- fratura de cisalhamento X (sintética secundária)
- fratura de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



- T = fraturas de tensão
- R = cisalhamento de Riedel
- P = cisalhamento P
- Y = cisalhamento Y
- R' = cisalhamento conjugado de Riedel



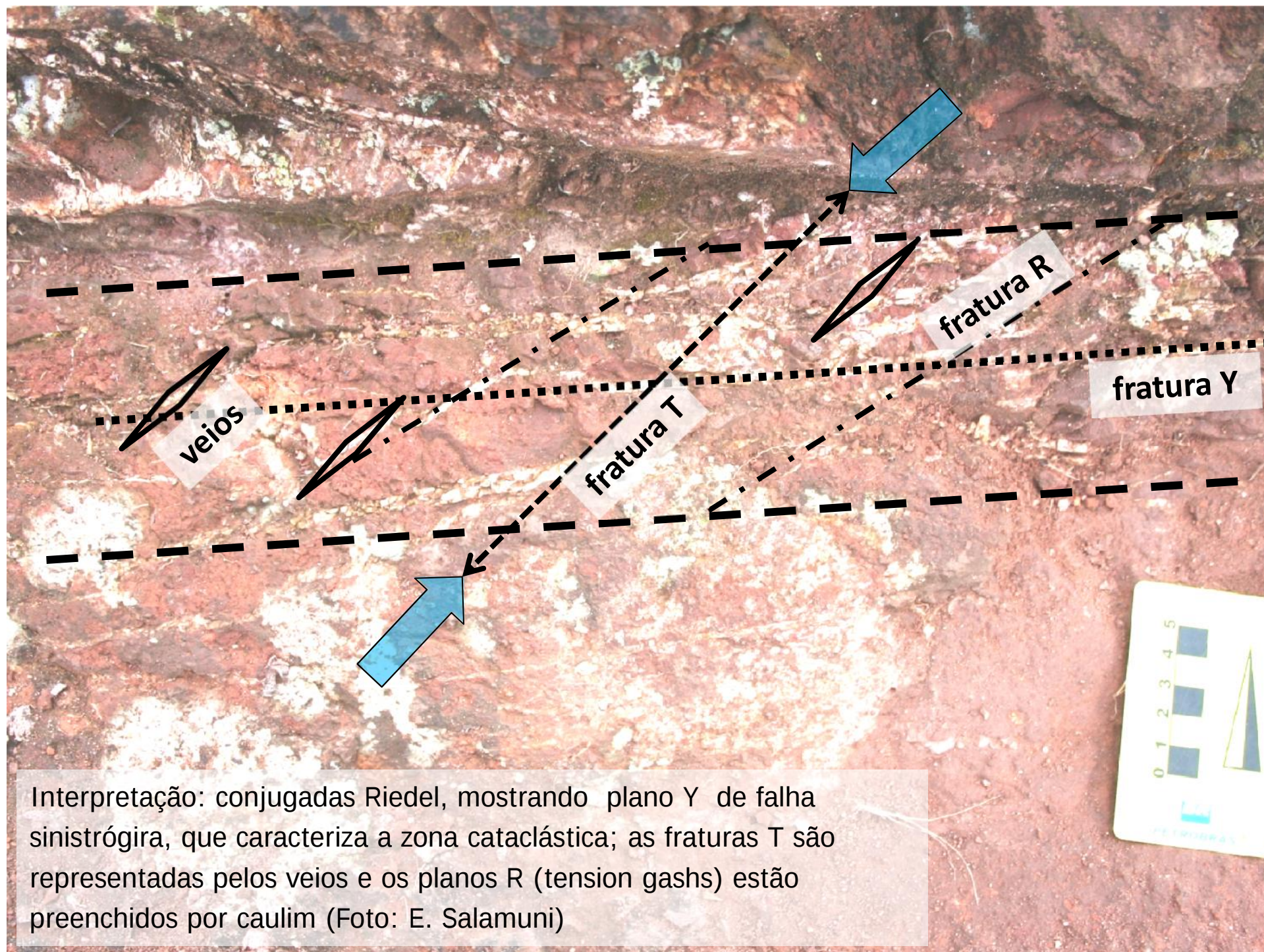
falha neotectônica na Nova Zelândia. Zona de falha, com fraturas escalonadas. (Foto: internet domínio público)



Interpretação: conjugadas Riedel, mostrando zona de falha dextrógiira, que caracteriza a zona brechada; as fraturas R (Riedel) são representadas pelos planos das fraturas escalonadas maiores e os planos X pelas fraturas paralelas menores. A fratura Y está inferida ou mal se percebe como ruptura, apenas como deformação do plano geodésico (Foto: internet domínio público).

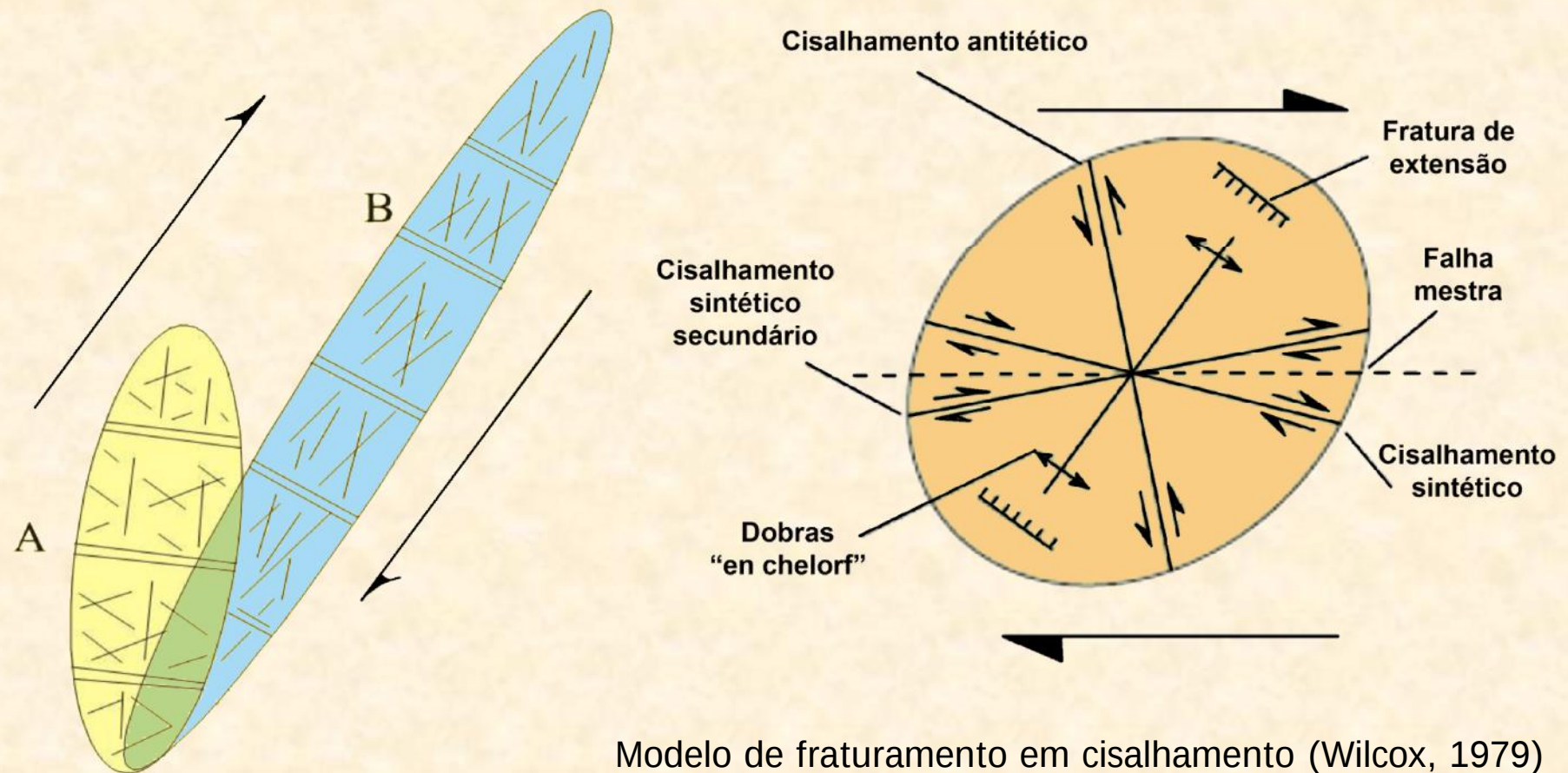


Riolitos da Bacia de Castro. Tectonito cataclástico em zona de falha, com fraturas conjugadas preenchidas por caulim (Foto: E. Salamuni)

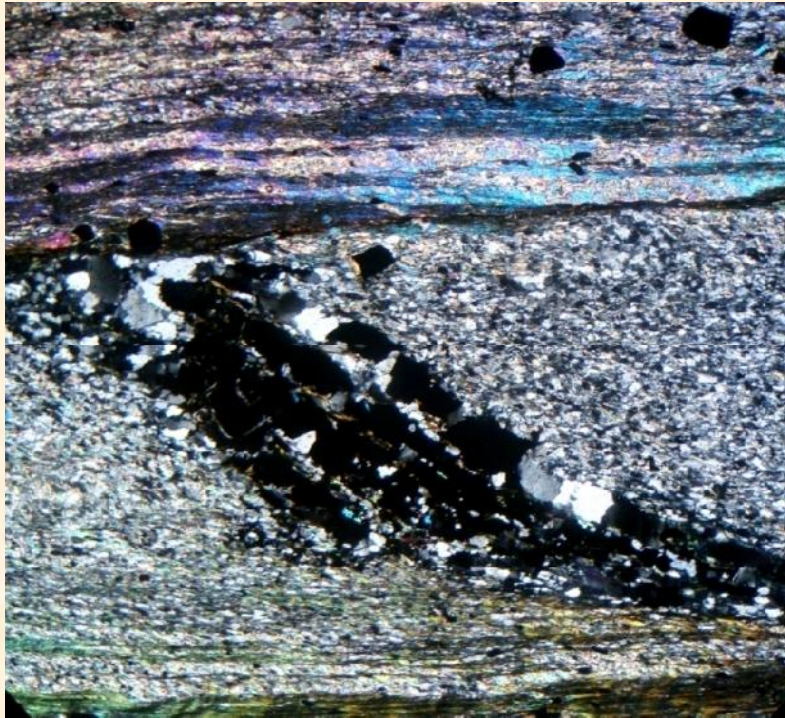


(b) Comportamento dúctil homogêneo

Ocorre fluxo plástico uniforme de material rochoso submetido às tensões resultantes do movimento tectônico.



(c) Comportamento dúctil heterogêneo



Deformação dúctil_: se diz quando as rochas apresentam comportamento plástico e sofreram deformação permanente.

A mudança é produzida na forma do cristal, por meio de um rearranjo químico no retículo cristalino, sem a ocorrência de microfalhas.

Xisto do Grupo Brusque, com estiramento mineral que mostra sentido de movimento

(Microfoto: Fernanda M. Gonçalves)



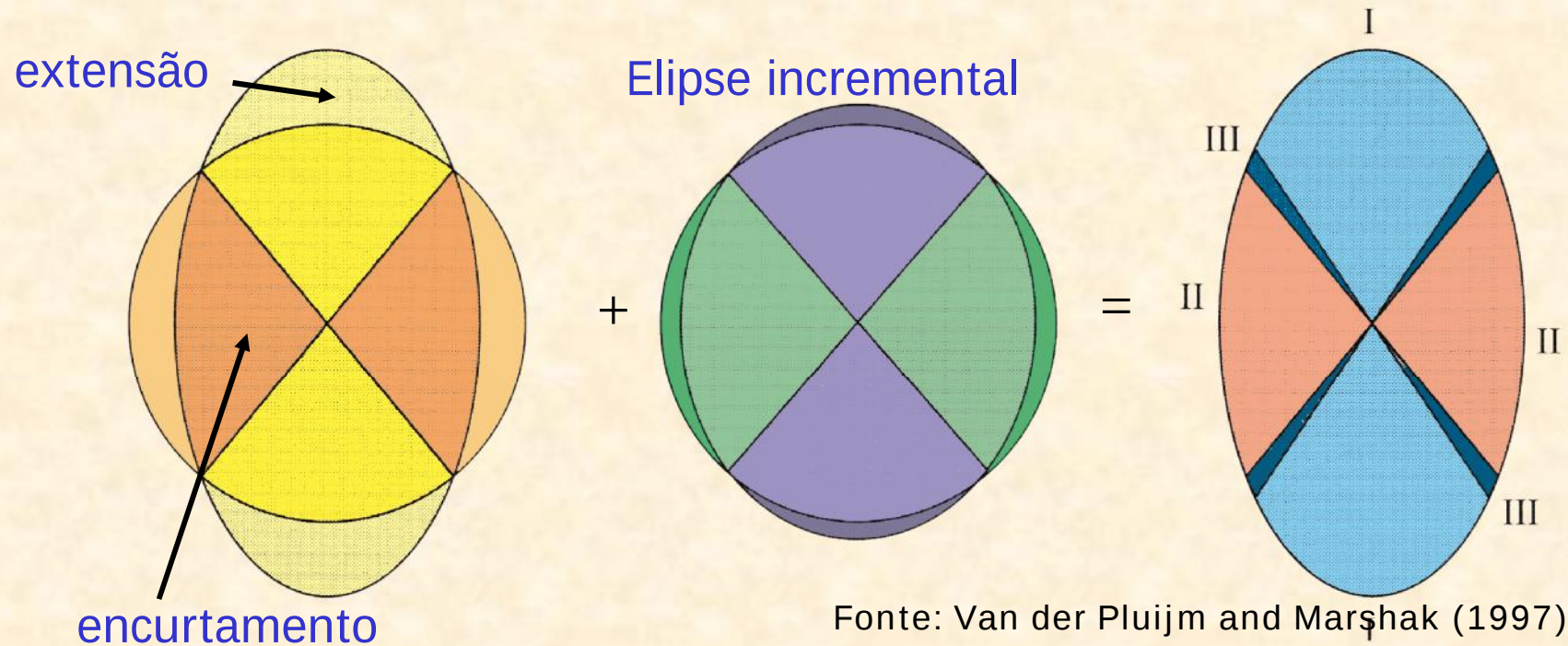
Comportamento dúctil heterogêneo em xistos da Formação Perau (PR). Observar dobras ptigmáticas e boudins em bandas mais deformadas em contrastes com bandas foliadas e pouco dobradas. Foto: E. Salamuni



Comportamento dúctil homogêneo em metagranitos (augen-gnaisses) do embasamento do Complexo Setuva (PR). Observar estiramento mineral que desenha a foliação / milonitização. Foto: E. Salamuni

ANEXOS

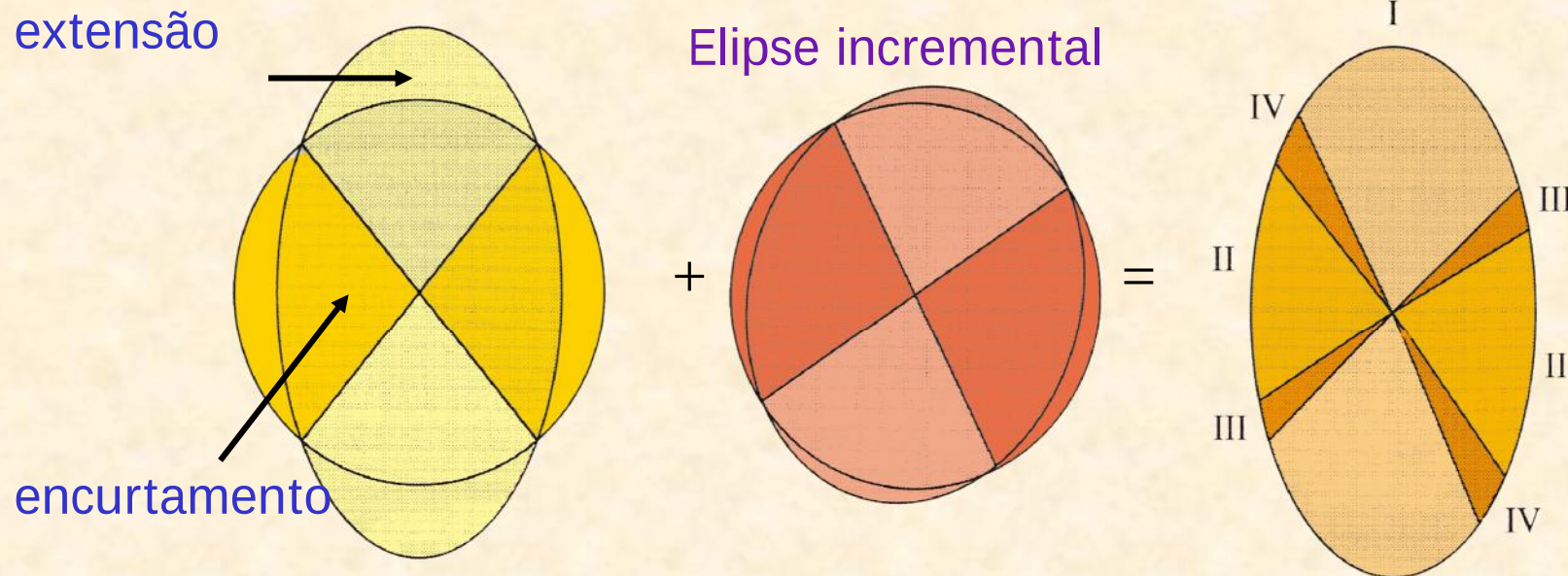
Sobreposição de deformação coaxial: uma elipse de deformação incremental de diferente magnitude é superimposta à primeira elipse



Três regiões ocorrem na elipse resultante:

- I: região de extensão continuada
- II: região de encurtamento continuado
- III: região de encurtamento inicial que passa a ser extensional

Sobreposição de deformações não-coaxiais: uma elipse de deformação incremental de diferente magnitude é superimposta à primeira elipse



A geometria é mais complexa:

Fonte: van der Pluijm and Marshak (1997)

Quatro regiões ocorrem na elipse subsequente:

- I: região de extensão continuada
- II: região de encurtamento continuado
- III: região de encurtamento inicial que passa a ter extensão
- IV: região de extensão inicial que passa a ter encurtamento