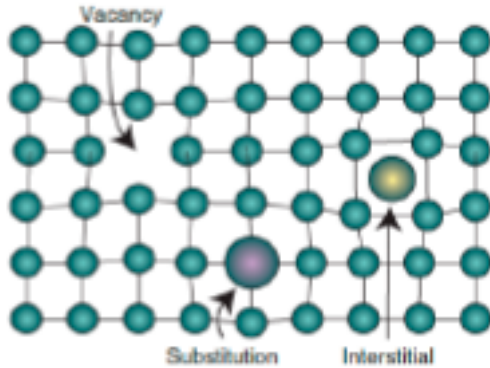


MICROTECTÔNICA

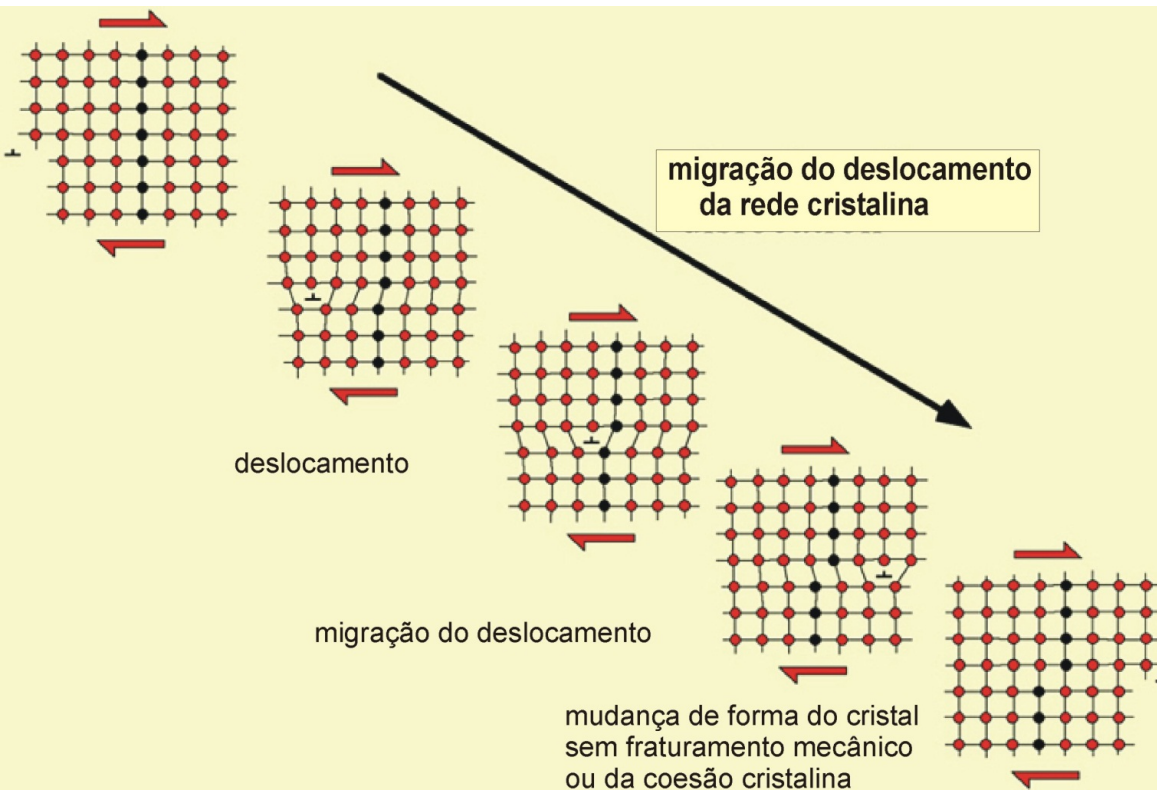
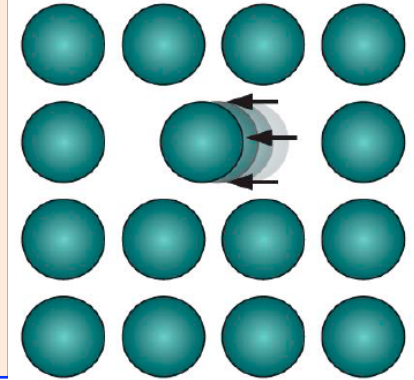
**PROCESSOS DE DEFORMAÇÃO INTRACRISTALINA E EVOLUÇÃO DA TEXTURA COM A
PROGRESSÃO DO METAMORFISMO E DA DEFORMAÇÃO**

PROCESSOS DE DEFORMAÇÃO INTRACRISTALINA E EVOLUÇÃO DA TEXTURA COM A PROGRESSÃO DO METAMORFISMO E DA DEFORMAÇÃO



Os pontos de defeitos do retículo cristalino são as vacâncias iônicas, substituição iônica ou a presença de íons intersticiais.

A migração das vacâncias iônicas através do retículo atômico é denominado de transferência de massa por difusão.

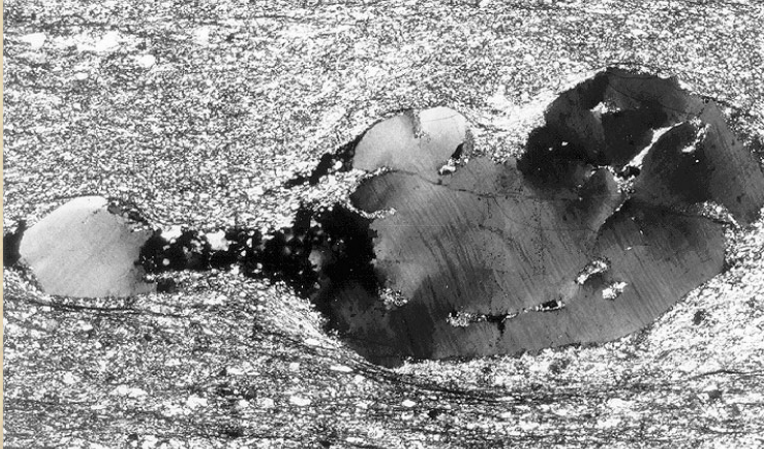


Cristais podem se deformar internamente, sem quebra, pela movimentação dos defeitos da rede cristalina. Uma rede cristalina que contém um certo número de deslocamentos similares será gentilmente encurvada e, como resultado, o cristal não se extingue homogeneamente e apresenta uma **extinção ondulante**, ou **lamelas de deformação**, ou **trilhas de inclusões fluidas**.

A **fluência dos deslocamentos** (*dislocation creep*) reduz a energia interna do cristal pela migração dos deslocamentos para os limites dos grãos.

É uma mudança na forma do cristal, sem quebra ou separação.

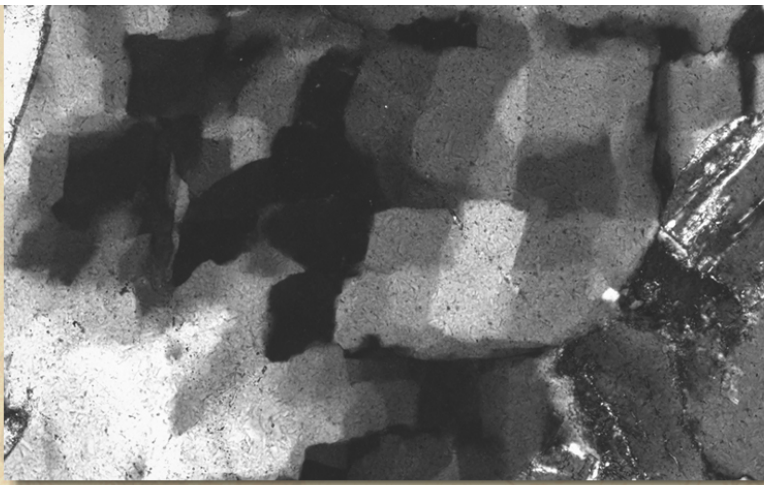
EVIDÊNCIAS DA DEFORMAÇÃO DA REDE CRISTALINA



Fenocrystal de
quartzo.
Boudin e
lamelas de
deformação
com extinção
ondulante.

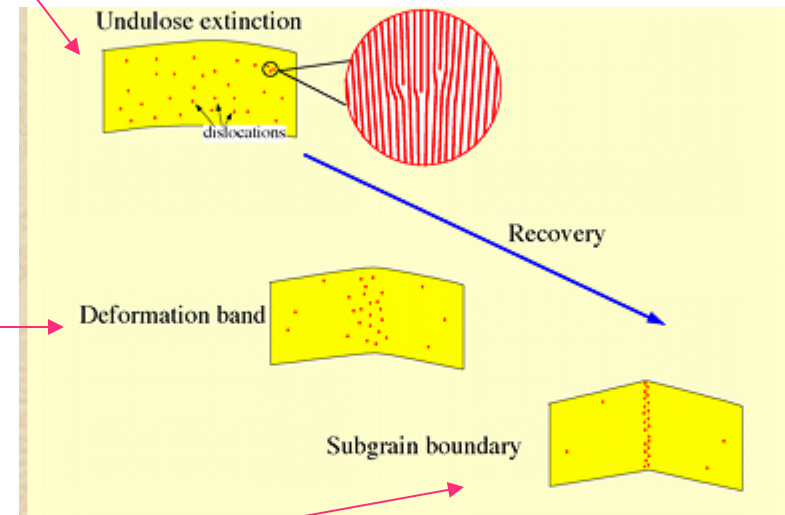


Desenvolvimento de
subgrãos a partir
das lamelas de
deformação. Trilha
vertical de inclusões
fluídas.



Estágio mais
desenvolvido
de sub-grãos
de quartzo a
partir de
extinção
ondulante.
Tipo-tabuleiro
de xadrez.

DESLOCAMENTOS DA REDE CRISTALINA E RECUPERAÇÃO (*RECOVERY*)



Processo de recuperação

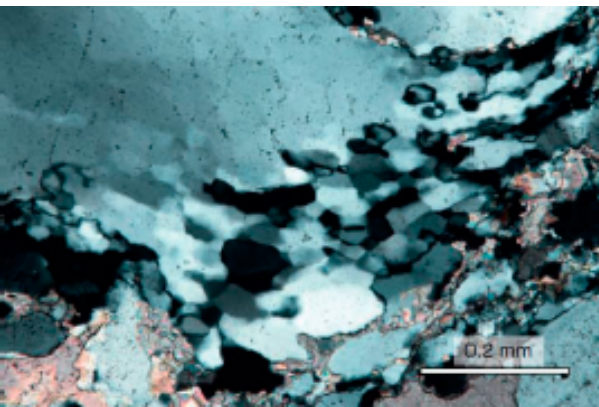
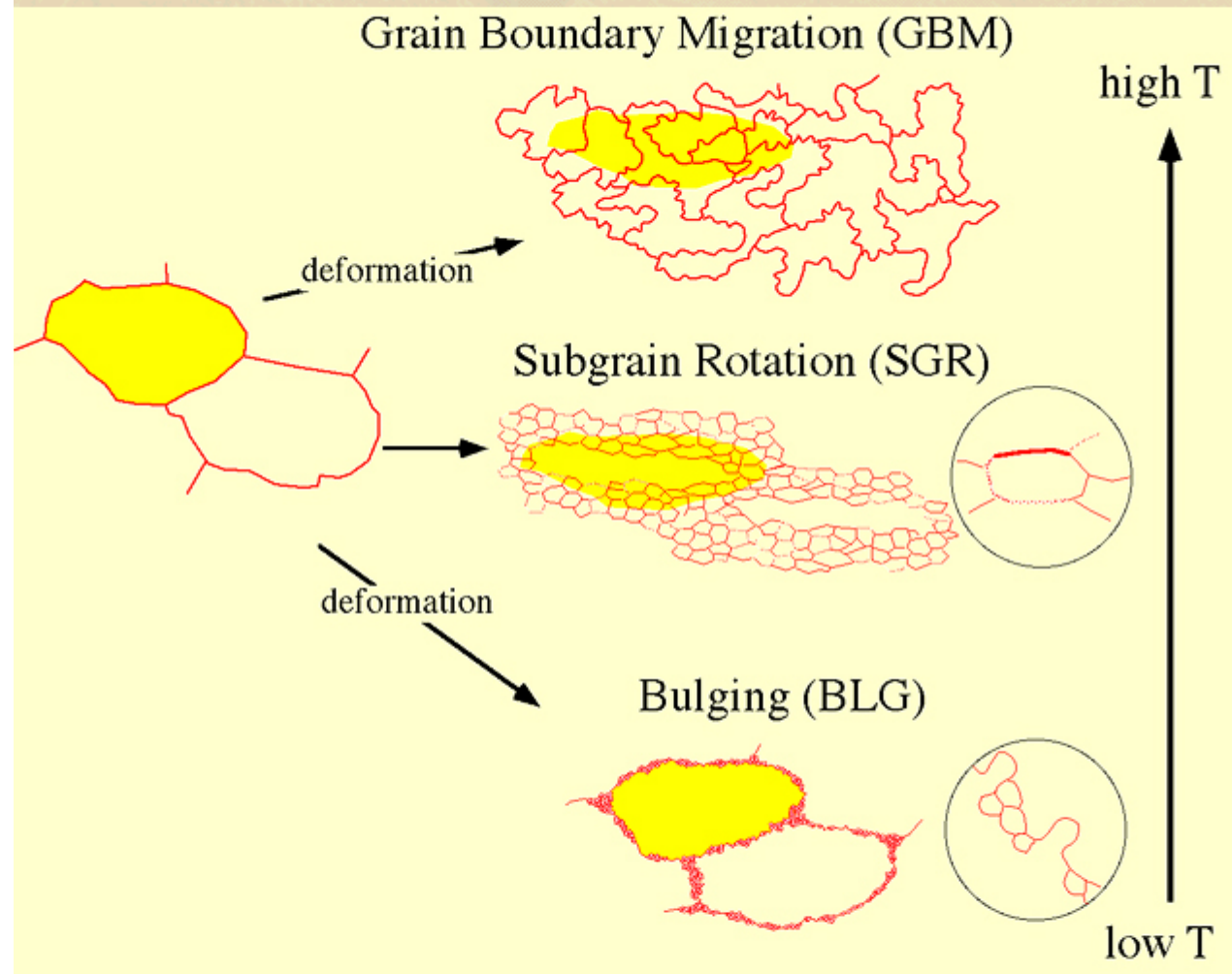
- A- distribuição aleatória dos deslocamentos e extinção ondulante;
- B- concentração dos deslocamentos, por recristalização e bandas de deformação;
- C- desenvolvimento de sub-grãos

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

A recristalização é um processo que contribui para a redução da densidade de deslocamentos da rede cristalina de um cristal deformado.

A **recristalização dinâmica** se dá quando grãos antigos, com alta densidade de deslocamentos internos são substituídos por outros, mais novos, com menor densidade de deslocamentos. É a **mobilidade no limite dos grãos** que contribui para reduzir a densidade de deslocamentos no cristal deformado.

Recristalização é a reorganização do cristal de uma fase mineral (mudança no tamanho, forma e orientação).

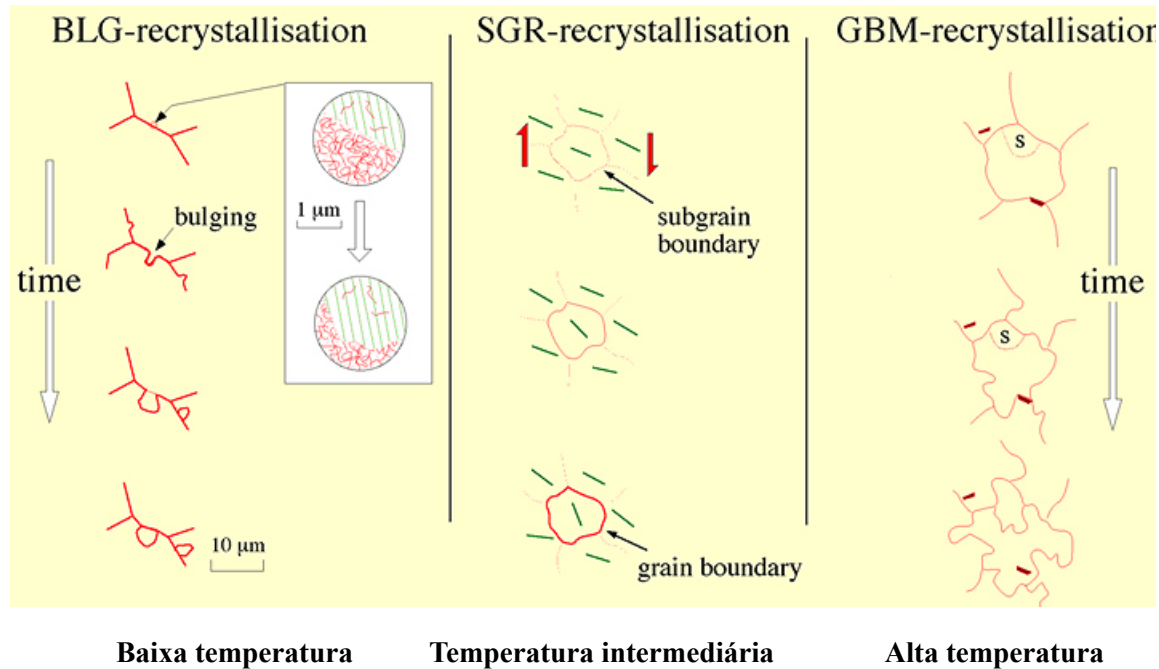


Principais mecanismos de recristalização dinâmica que podem operar durante a deformação e que são dependentes da temperatura: **i-bulging, ii- rotação de subgrão, iii- migração da borda de grãos**

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

Recristalizações

Bulging - *Rotação de sub-grão* - *Migração de borda*

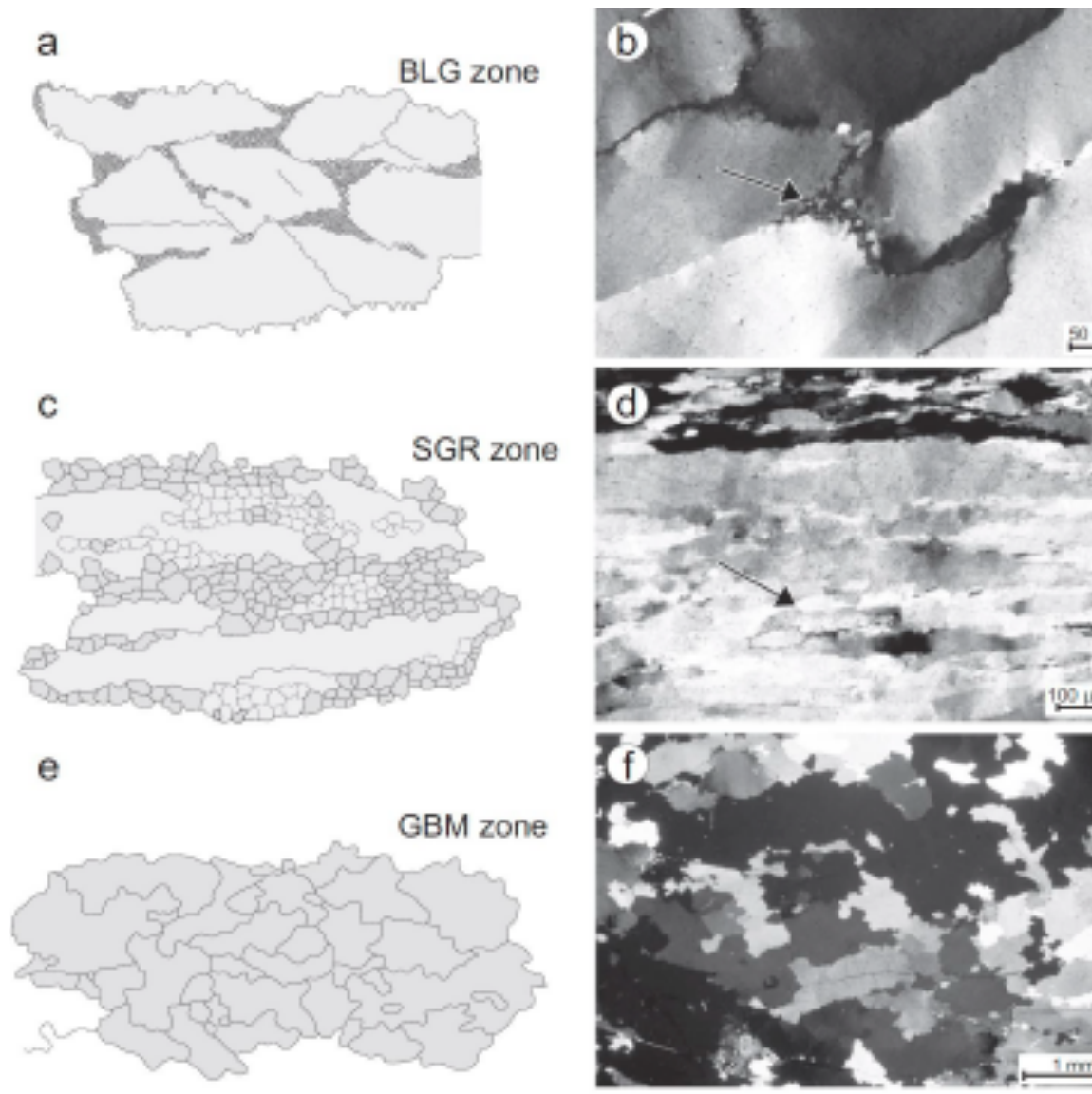


Sob altas temperaturas os limites dos grãos mais móveis, avançam e removem os deslocamentos internos e os limites dos grãos. Gera uma textura interlobada, ou amebóide, por **migração da borda dos grãos**.

Mobilidade na borda de grãos: grãos com alta densidade de deslocamentos internos facilitam a movimentação dos átomos nas bordas, o que promove a migração dos limites de grãos menos deformados para dentro dos mais deformados. Se a borda do cristal menos deformado invade, como uma protuberância, o cristal mais deformado gera um novo e independente cristal em um processo conhecido por **bulging**. Nele pode ocorrer também a **nucleação** de pequenos domínios com baixa densidade de deslocamento no interior de cristais muito deformados.

Quando os deslocamentos causam a deformação com reorientação da rede cristalina, o processo é de **recristalização por rotação de subgrãos**. O menor e novo grão se desenvolve pela progressiva desorientação de subgrãos, ou rotação de subgrãos.

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA DO QUARTZO



***T* entre 280-400°C**

BULGING

Recristalização nos limites dos grãos mais deformados e ao longo de microfraturas

***T* entre 400-500°C**

ROTAÇÃO DE SUB-GRÃOS

Microestrutura de subgrãos com distintas orientações mantendo um núcleo de *ribbon* ou porfiroclasto precedente.

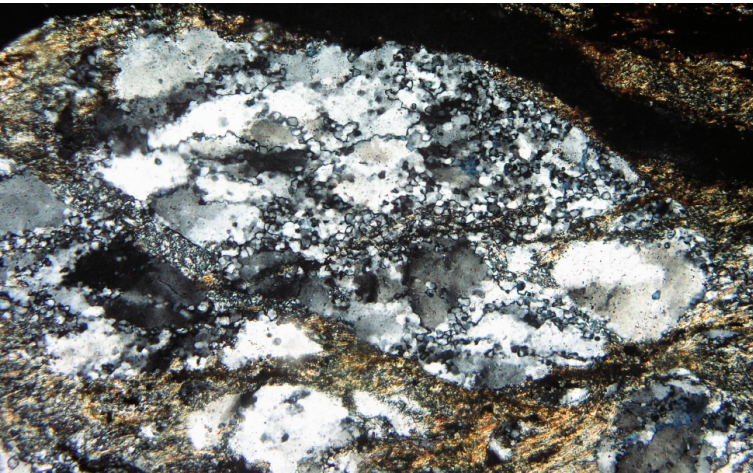
***T* maior 500°C**

MIGRAÇÃO DE BORDA DE GRÃO

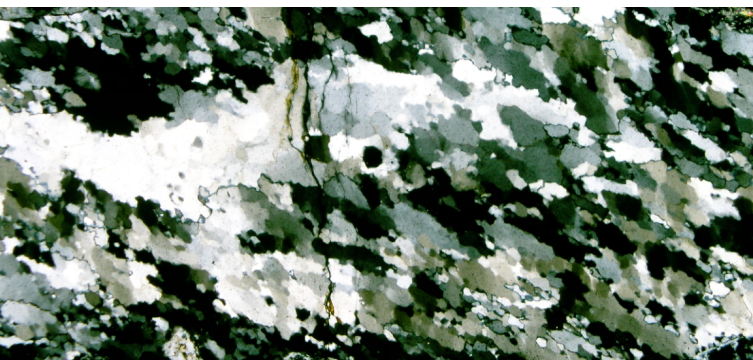
Grãos com formas e dimensões irregulares e com contornos lobados ou amebóides (suturados)

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA E DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO

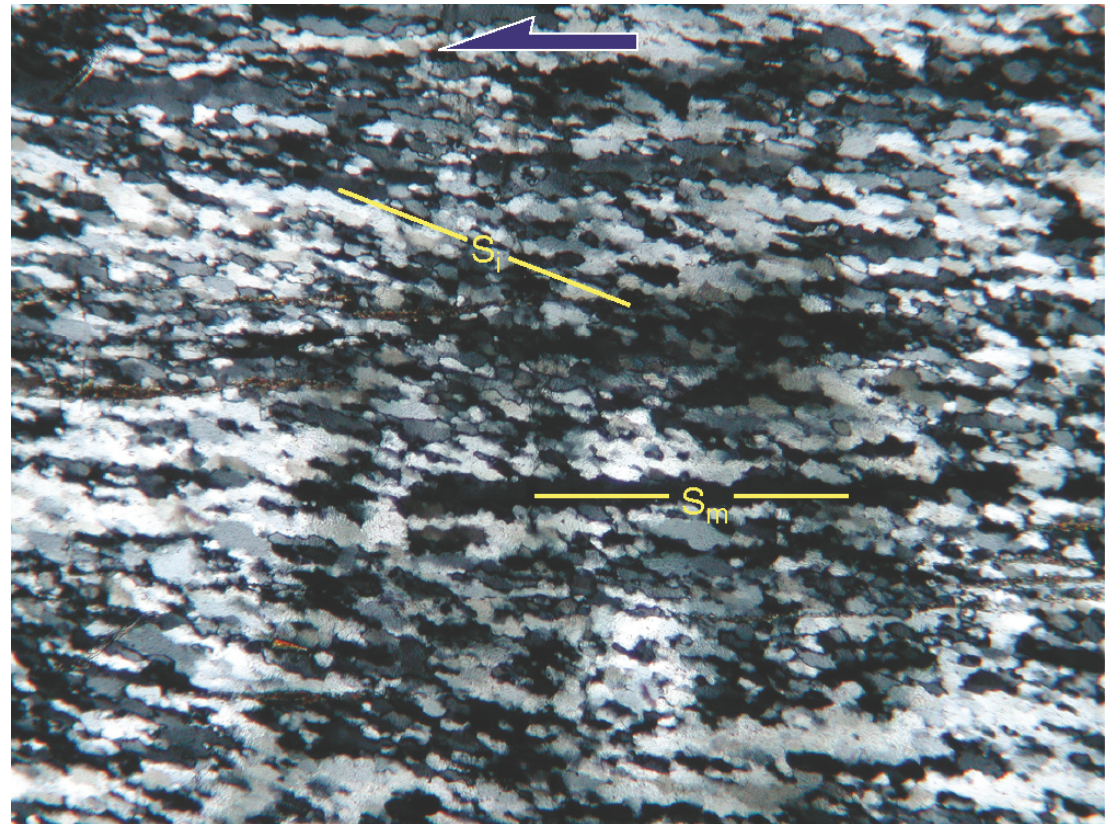
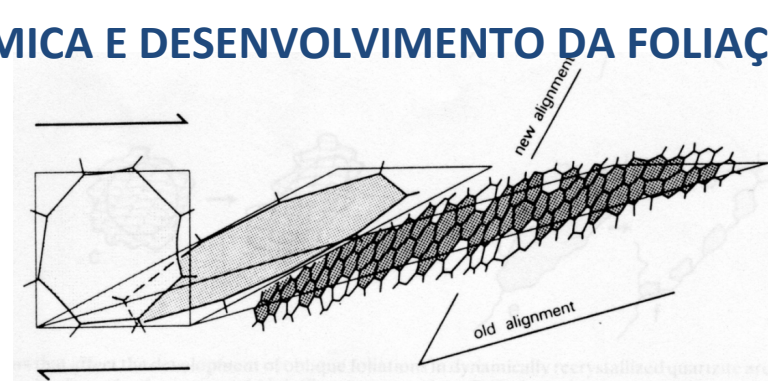
Porfiroclasto elipsoidal de quartzo recristalizado por *bulging* sob condições de baixa- T



Fábricas de forma e orientação preferencial de forma por domínios



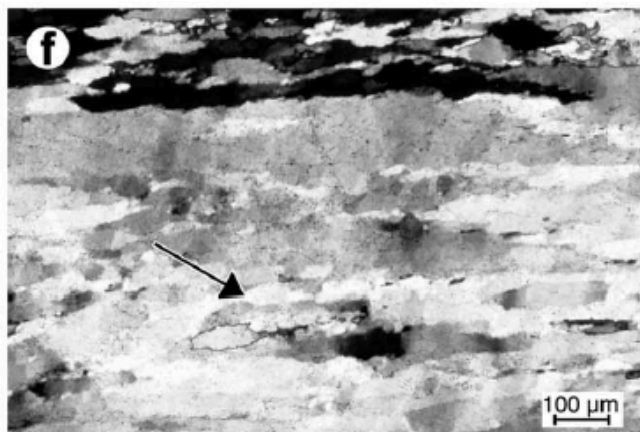
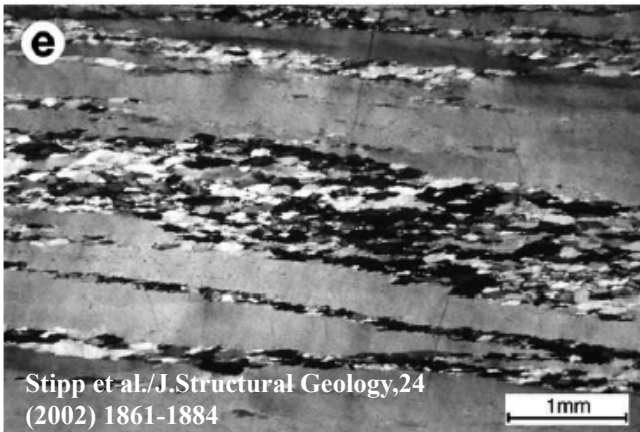
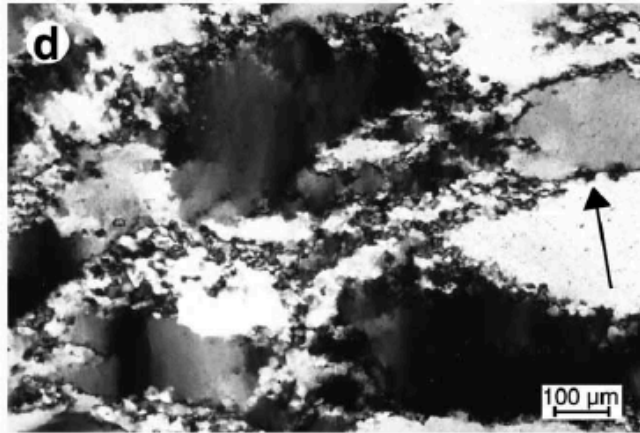
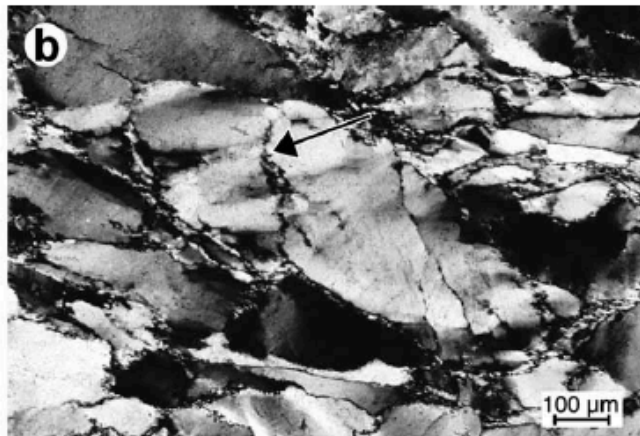
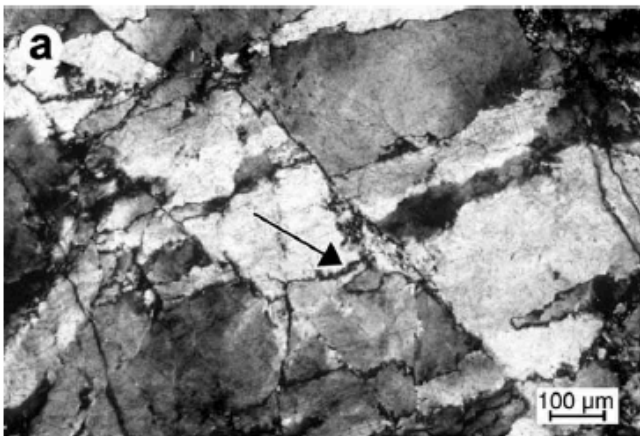
Orientação ótica e de forma da foliação precedente (S_1) e recristalização, por rotação de subgrãos, da foliação posterior ($T \sim 400 - 500 \text{ } ^\circ\text{C}$).



DEFORMAÇÃO CONTÍNUA E EVOLUÇÃO DA FOLIAÇÃO

Sub-grãos, com pronunciada fábrica de forma, definem uma nova foliação oblíqua. A relíquia da forma alongada do grão antigo pode ser reconhecida no envelope dos novos grãos de mesma orientação ótica.

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA E DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO



- a) **fluxo cataclástico**, $t \pm 250^\circ\text{C}$, fraturas, limites serilhados de grãos e *bulging*;
- b) **BLG**, $t \pm 300^\circ\text{C}$, extinção ondulante, limites serilhados de grãos e *bulging* nas bordas dos grãos e nas microfraturas;
- c) **BLG**, $t \pm 340^\circ\text{C}$, porfiroclastos alongados, extinção ondulante e *bulging* dominante;
- d) **BLG**, $t \pm 400^\circ\text{C}$, granulação maior dos novos cristais e limites suturados de grãos;
- e) **SGR**, $t \pm 490^\circ\text{C}$, *ribbons* alongados e faixas de grãos recrystalizados obliquamente, em uma segunda foliação;
- f) **SGR**, $t \pm 490^\circ\text{C}$, poligonização devido a rotação progressiva de subgrãos. A recrystalização interna dos grãos é da mesma dimensão dos subgrãos.

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA E DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO

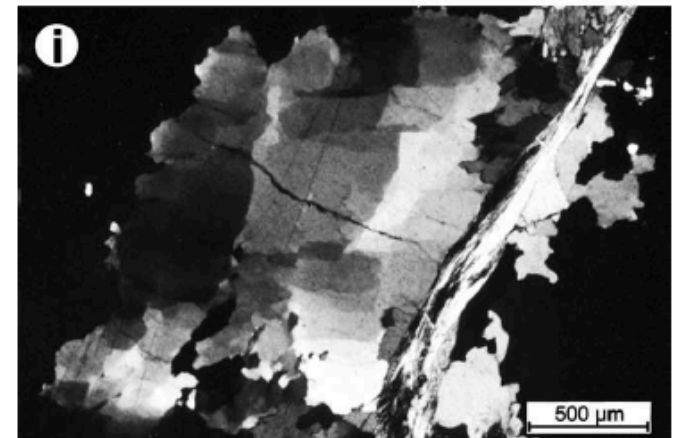
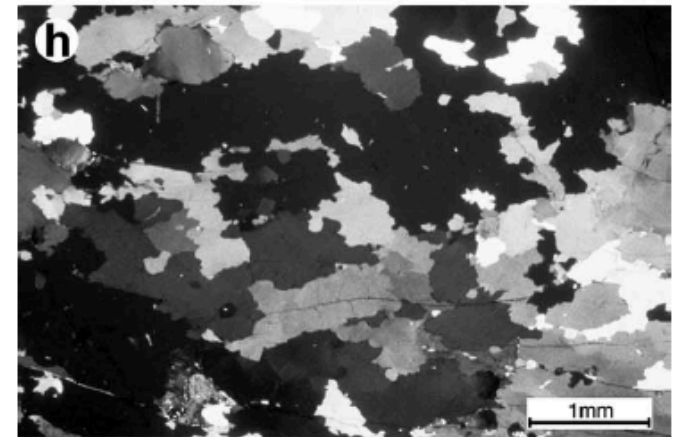
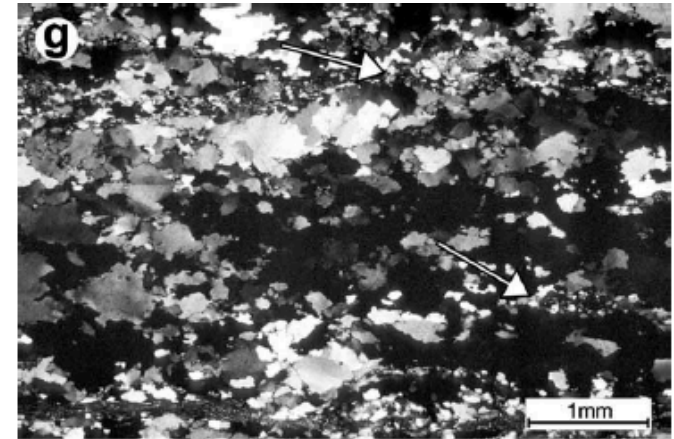
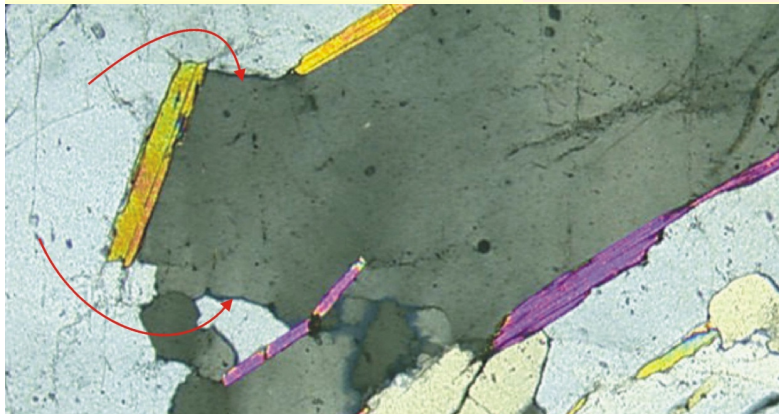
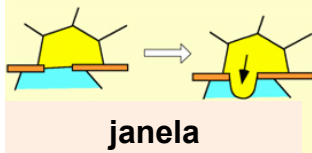
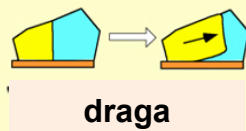
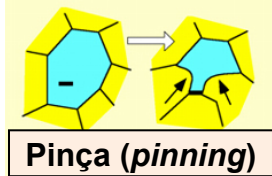
g) GBM, $t \pm 560^\circ\text{C}$, formas irregulares dos grãos. Micas podem causar *pinning* e diminuição da granulação;

h) GBM, $t \pm 650^\circ\text{C}$, textura ameboide;

i) GBM, $t \pm 650^\circ\text{C}$, extinção tipo tabuleiro de xadrez

Stipp et al./J.Structural Geology,24 (2002) 1861-1884

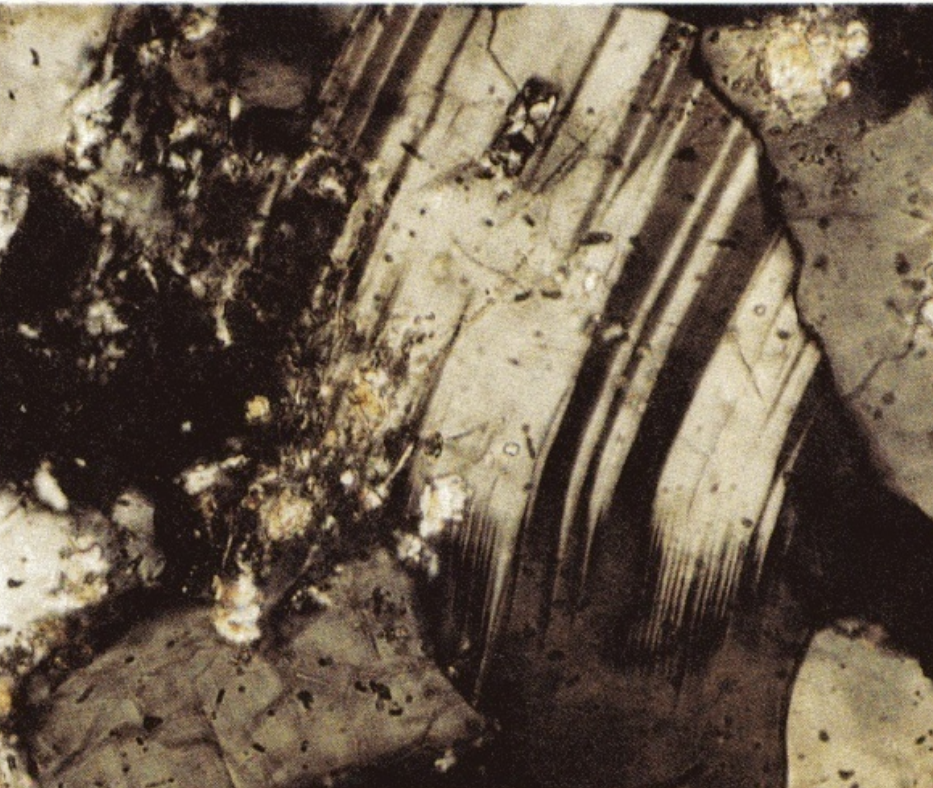
Microestruturas indicativas da direção de movimento durante a migração da borda dos grãos quando da recristalização dinâmica



DEFORMAÇÃO INTRACRISTALINA

GEMINAÇÕES DEFORMADAS

Pela forma distinguem-se as geminações deformadas das geminações de crescimento, sobretudo em plagioclásio e calcita. As geminações de crescimento no geral são retas e espaçadas, enquanto que as geminações deformadas adelgaçam-se com terminações afinadas ou “em punhal”.



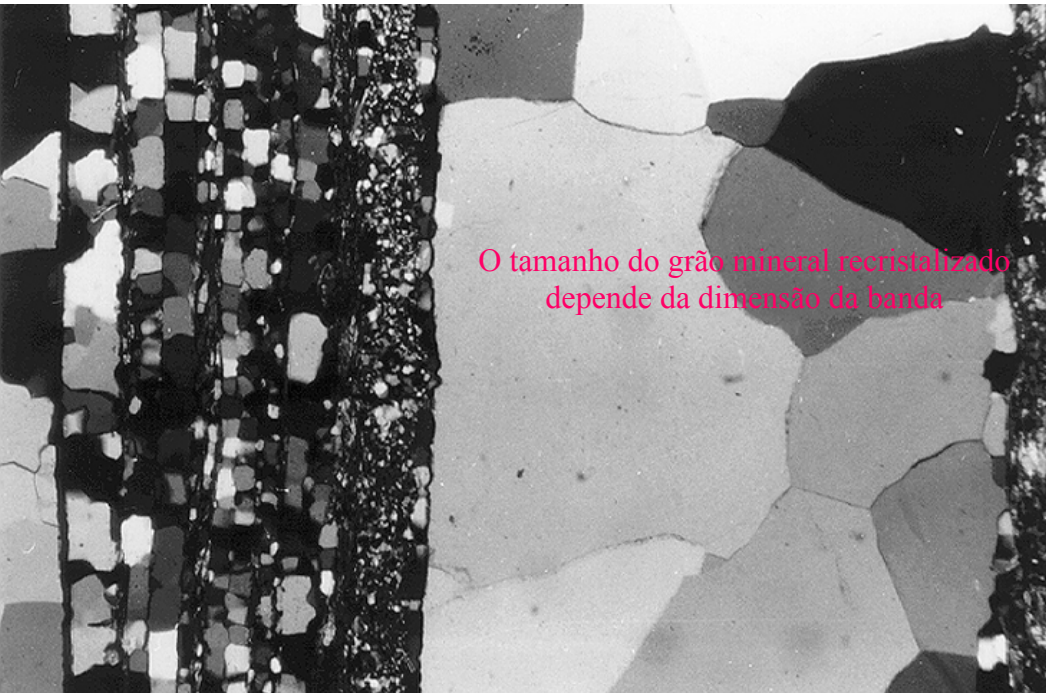
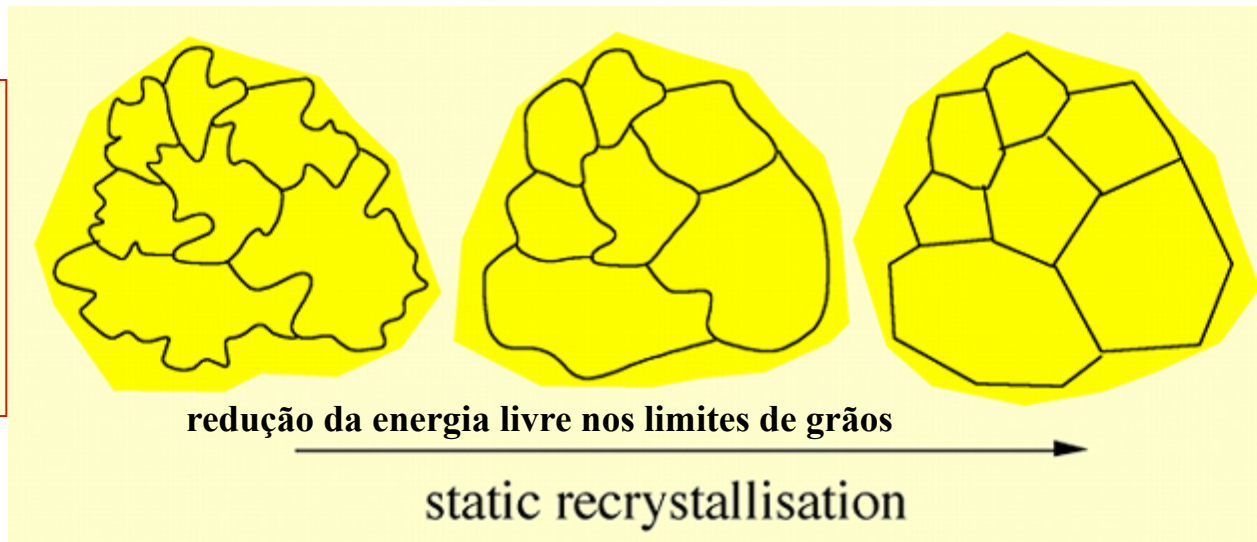
Plagioclásio com geminação deformada (encurvamento e afinamento em punhal)



Calcita com geminação deformada (intersecção)

MECANISMOS DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA: REDUÇÃO DE ÁREA NO LIMITE DE GRÃOS

A energia interna livre concentra-se nos limites dos grãos. A diminuição total da superfície de área dos limites de grãos, reduz essa energia. As formas curvilíneas menores são eliminadas e os novos grãos possuem forma poligonal.



RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA (*annealing*)

Ocorre quando a deformação de certo volume de rocha desacelera ou para, e o material ainda não atingiu o estágio de mínima energia interna livre (cristais ainda contém deslocções e limites de sub-grãos).

Sob baixa T , ou pequeno volume de água livre na rocha, a fábrica da deformação é preservada.

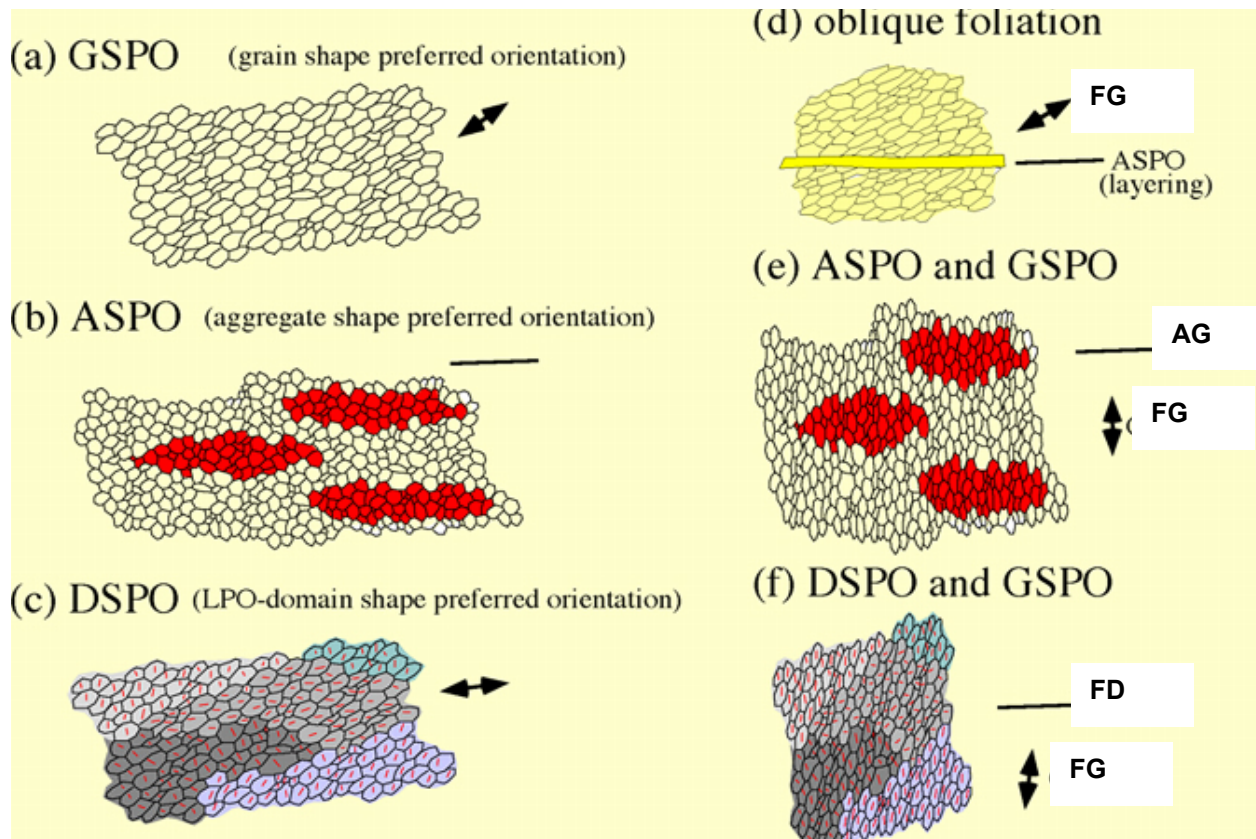
Sob alta T , ou água presente no limite dos grãos, a recuperação e recristalização continuam, na busca da menor configuração de energia interna livre.

Recristalização estática → fábrica de cristais com limites retos e poligonizados, ausência de sub-grãos e de extinção ondulante. Ocorre em rochas que foram submetidas a fortes deformações.

FOLIAÇÃO METAMÓRFICA

MECANISMOS DO DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO

Fábricas de forma



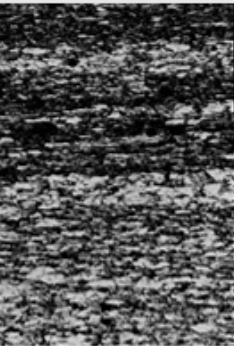
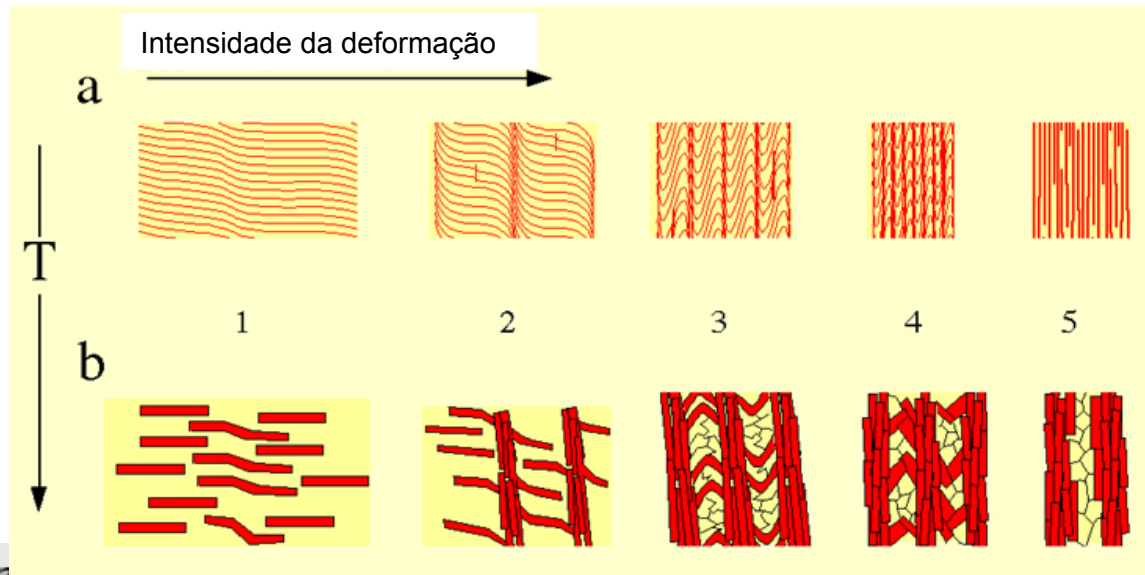
Orientação preferencial de forma (GSPO – *grain shape preferred orientation*).

Se a fábrica é composta por grãos minerais alongados ou discóides, equidimensionais e orientados, ela é denominada de **fábrica de forma de grãos** (GSPO – *grain shape preferred orientation*).

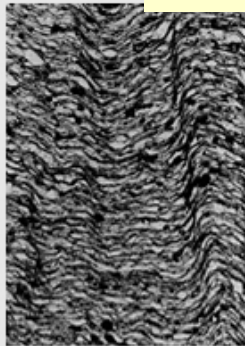
Orientação preferencial de agregados de grãos (ASPO – *aggregate shape preferred orientation*).

Grãos que possuem uma certa orientação preferencial podem formar domínios em uma fábrica denominada **orientação preferencial de forma por domínios** (DSPO – *domain shape preferred orientation*)

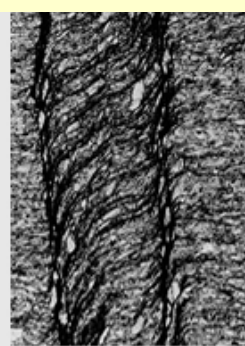
DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO



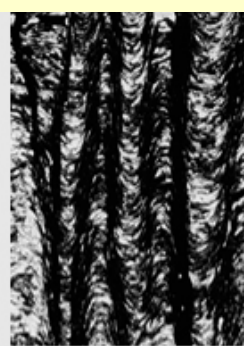
a 1



2



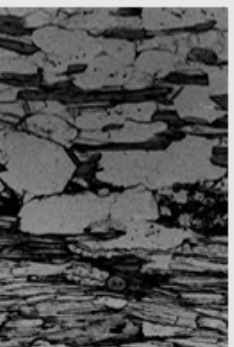
3



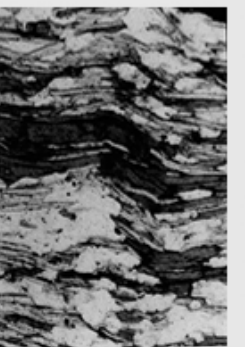
4



5



b 1



2



3



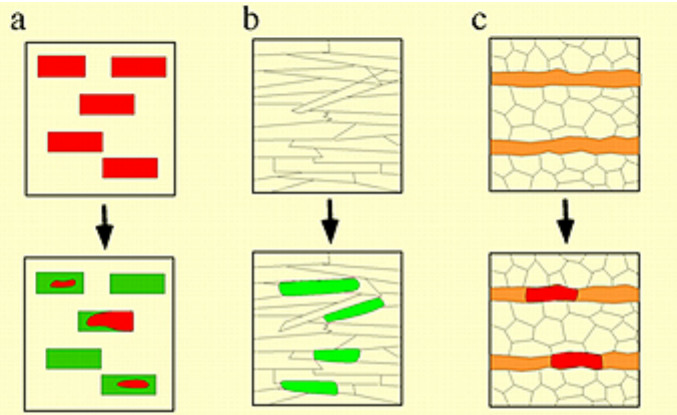
4



5

Estágios de desenvolvimento de foliação, a partir de clivagem de crenulação, com aumento de temperatura e/ou aumento na intensidade da deformação. Notar o predomínio gradual da S_2 sobre a S_1 , a preservação de micas dobradas em *microlithons* e a subsequente recristalização estática em arcos poligonais; o bandamento diferenciado, como produto final, equivale a xistosidade contínua.

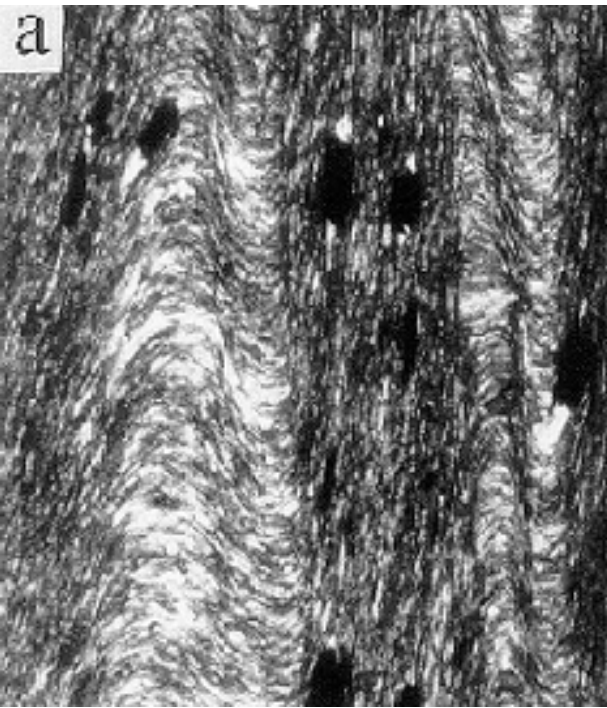
DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO: RECRISTALIZAÇÃO ESTÁTICA E CRESCIMENTO MIMÉTICO



a- substituição de minerais da antiga foliação mimetizando sua forma e estrutura;

b- crescimento mimético de novo mineral (biotita), em uma fábrica de forte orientação preferencial (muscovita);

c- minerais novos mimetizando o bandamento composicional (Cdr, Std, Grt podem crescer, estáticamente, em bandas ricas em ions de Al^{3+})



Clivagem de crenulação por domínios (micas S_1 dobradas) – fácies xisto verde

Xisto crenulado com micas recrystalizadas por crescimento mimético – início de fácies anfibolito

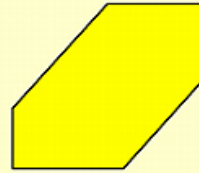
Micas como dobras fantasmas polygonizadas ou em arcos polygonais – fácies anfibolito

NOMENCLATURA DA TEXTURA METAMÓRFICA

O sufixo **blástico** é utilizado para a recristalização, em estado sólido, durante o metamorfismo.

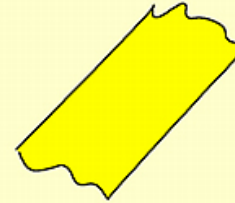
Grãos ricos em inclusões são poiquiloblásticos, ou de crescimento esqueletal.

FORMA DOS GRÃOS



euhedral

(idiomorphic)
(automorphic)



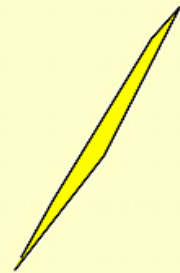
subhedral

(hypidiomorphic)
(hypautomorphic)



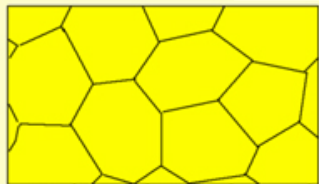
anhedral

(allotriomorphic)
(xenomorphic)

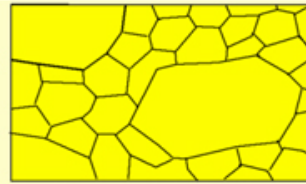


acicular

Forma dos agregados de grãos



equigranular - polygonal
(=granoblastic=foam structure)



inequigranular - polygonal



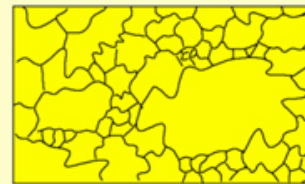
seriate - polygonal



equigranular - interlobate
(=granoblastic)



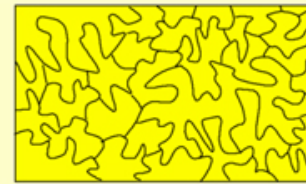
inequigranular - interlobate



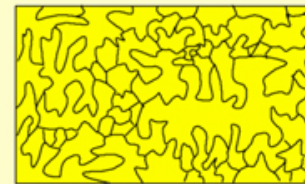
seriate - interlobate



equigranular - amoeboid



inequigranular - amoeboid



seriate - amoeboid

Textura granoblástica poligonal (equi – inequigranular e seriada)

Textura granoblástica interlobada (equi – inequigranular e seriada)

Textura amebóide (equi – inequigranular e seriada)

Texturas definidas pela forma dos grãos

granoblástica,
lepidoblástica
nematoblástica.

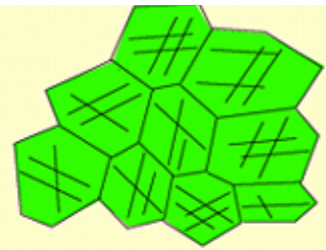
tamanho dos grãos

porfiroblástica

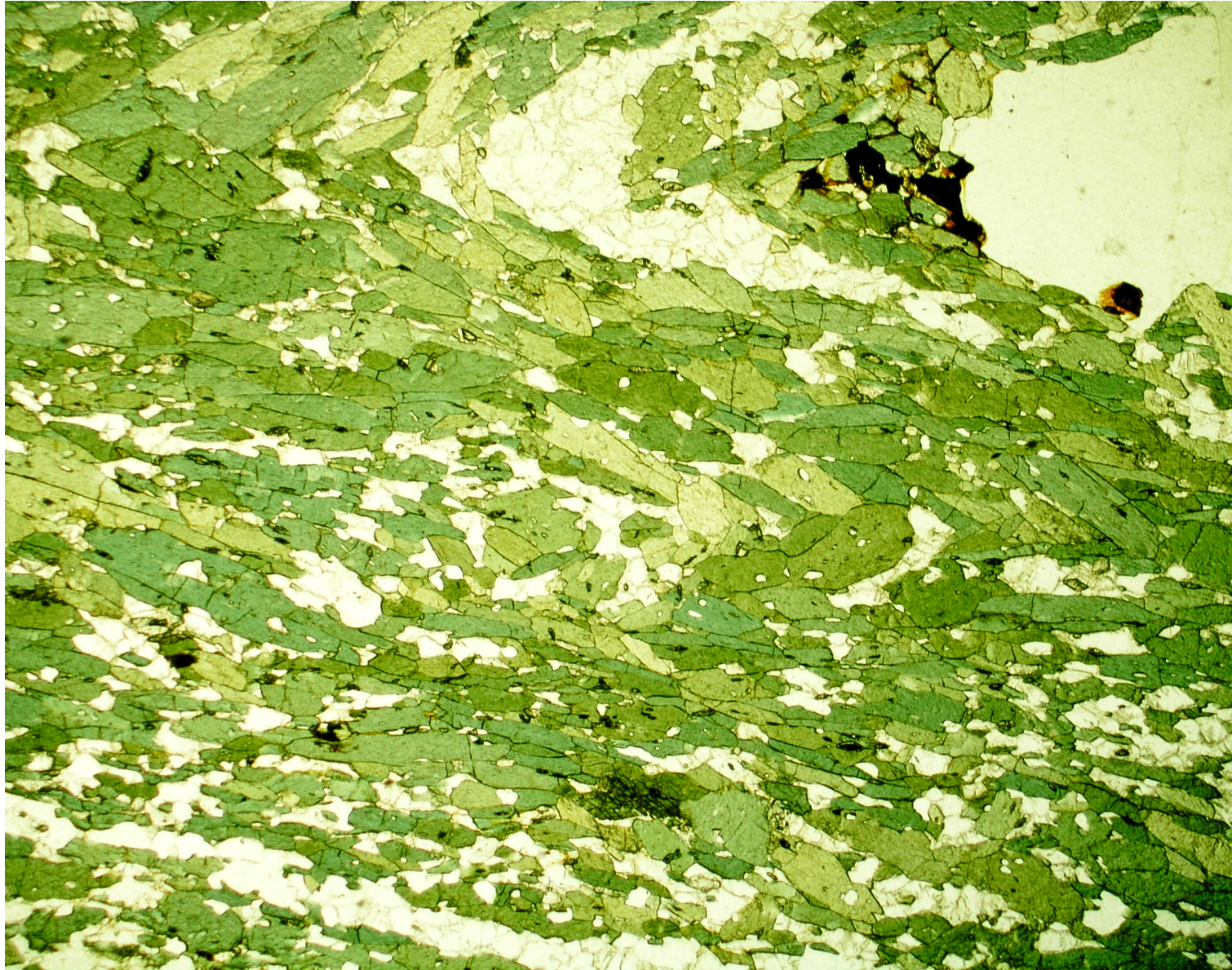
intensidade da deformação plástica e recristalização

milonítica

Textura nematoblástica



hornblende



Contato dos grãos de hornblenda na clivagem (110) – domínio de menor energia interna livre.

Notar os limites lobados, bem encurvados entre as fases minerais félsicas (quartzo e plagioclásio) com o anfibólio.

Texturas granoblástica e lepidoblástica

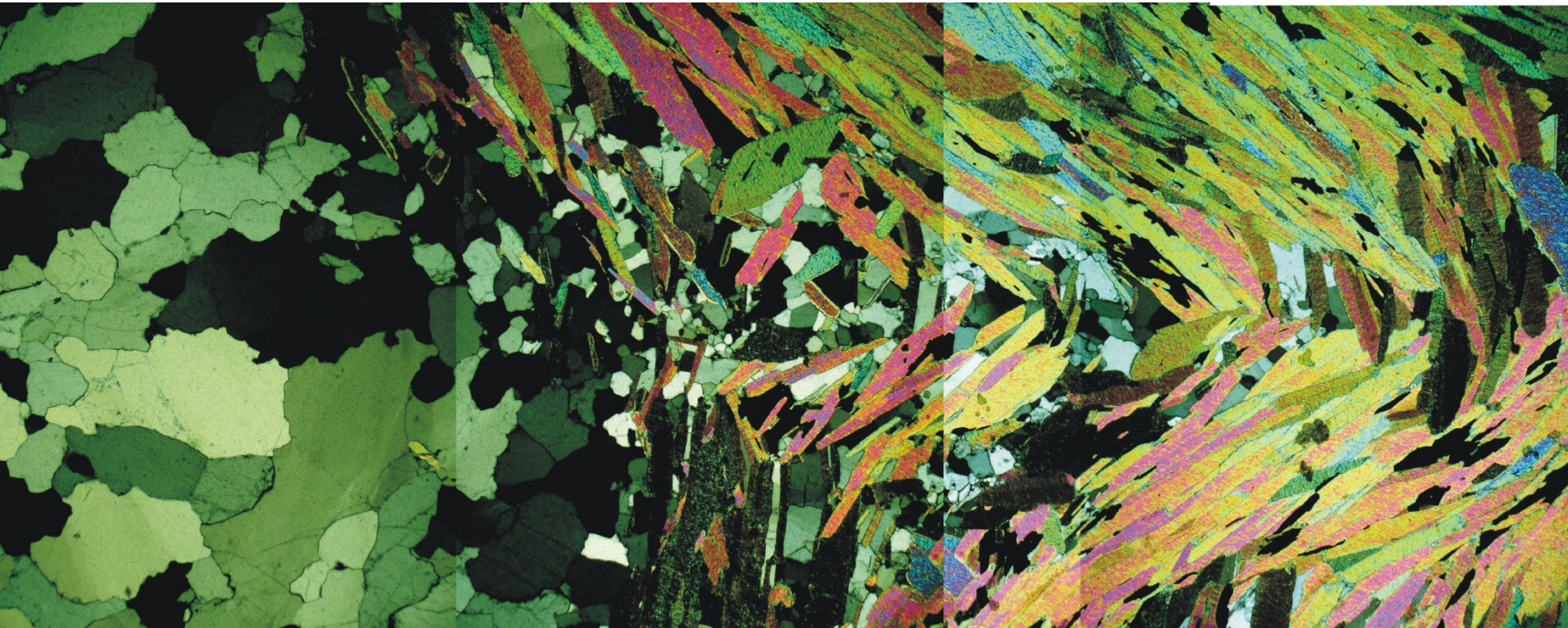
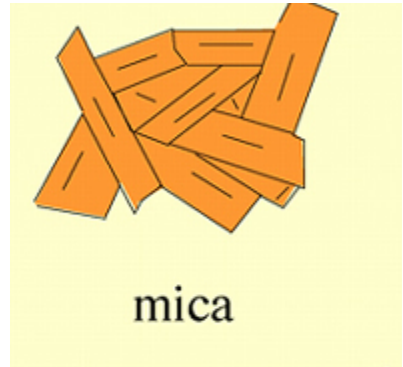


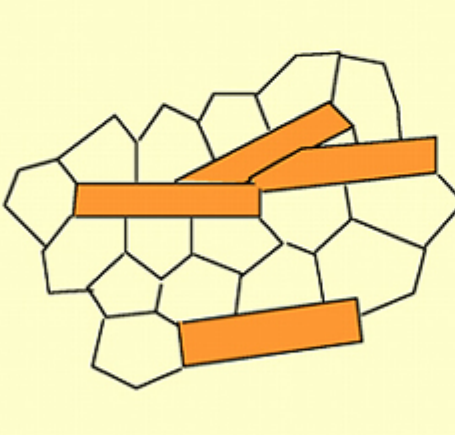
Textura granoblástica equigranular - os limites de grãos estão com energias internas semelhantes e mínima.

Grãos com fábrica de forma acumulam deslocamentos.

Tendência da orientação da clivagem (001) paralela ao plano principal de anisotropia. Textura lepidoblástica vista ao longo da clivagem (010).

Recristalização estática – micas não dobradas e em arcos poligonais definem a charneira

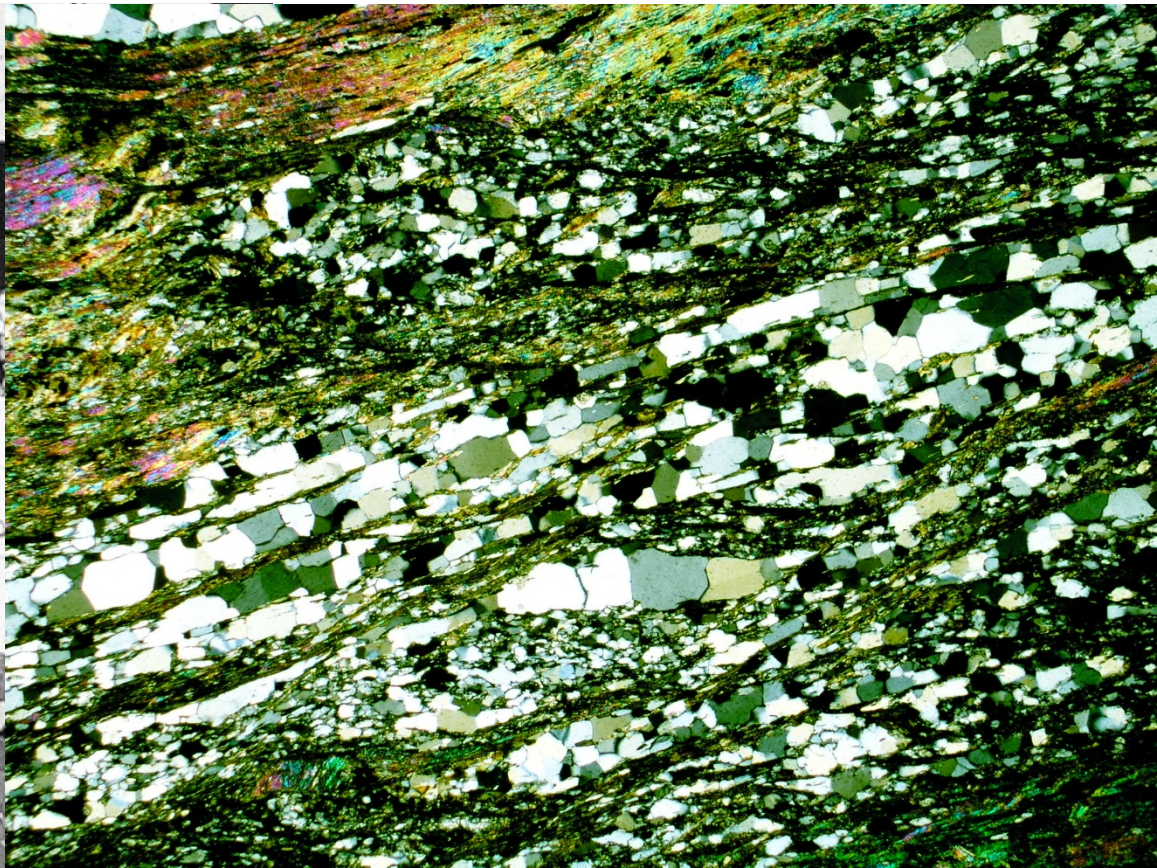
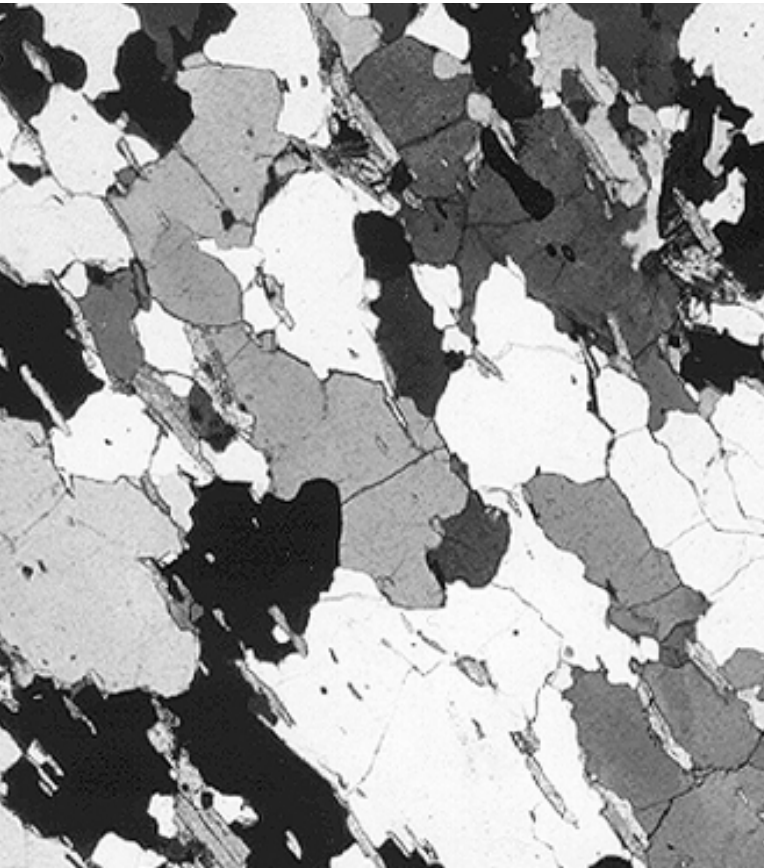




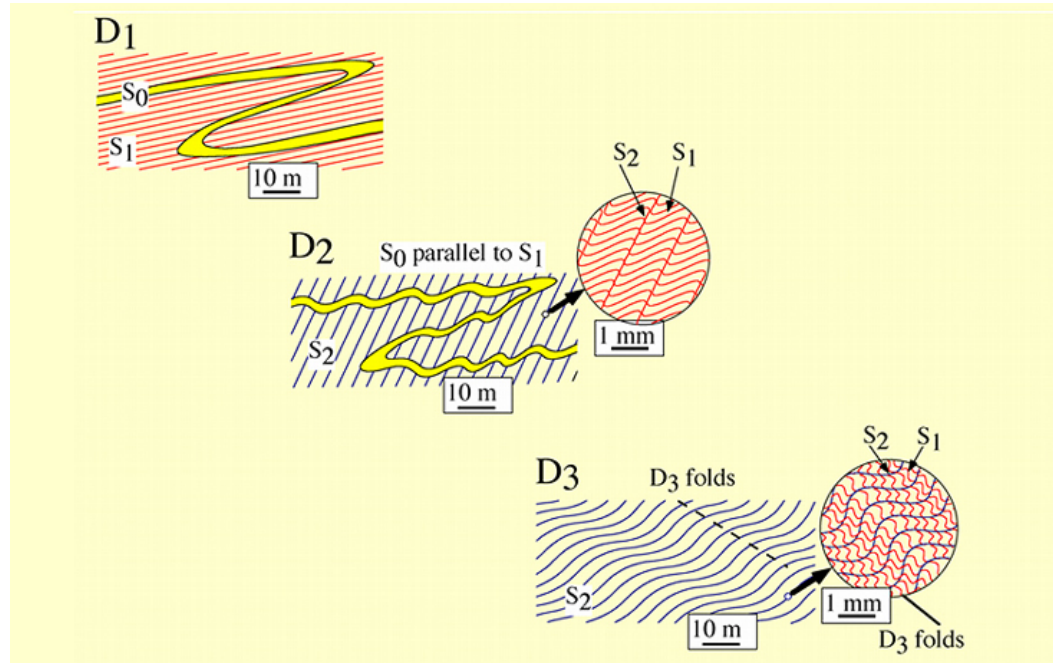
Texturas granoblástica e lepidoblástica

Textura granoblástica com lamelas orientadas e homogêneas dispersas de micas.

Lâminas granoblásticas (espessura, granulação, forma dos grãos, extinção, orientação de forma e orientação ótica) alternadas com lâminas lepidoblásticas. Foliação por bandamento diferenciado (geometria do bandamento, elementos estruturais).



FOLIAÇÃO E RELAÇÕES DE SUPERPOSIÇÃO



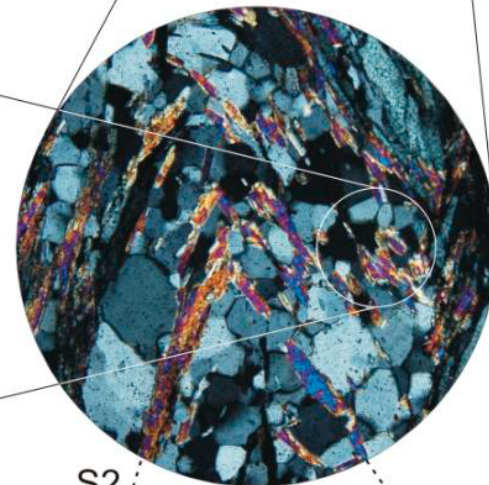
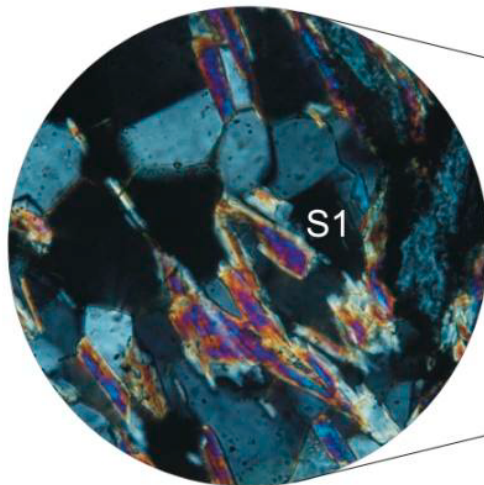
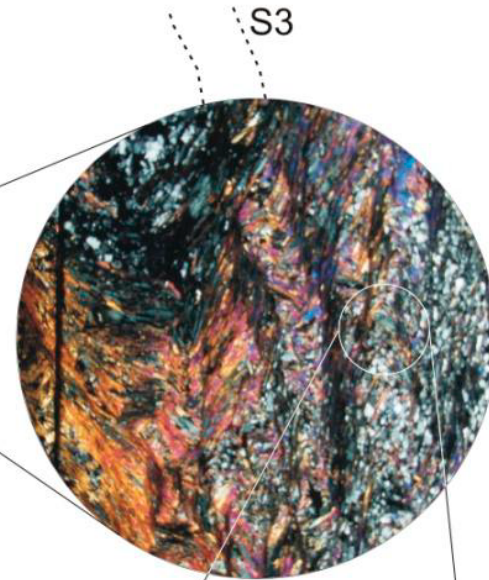
A superposição de dobramento é evidenciada pela deformação do plano-axial (foliação) precedente.



FOLIAÇÃO E RELAÇÕES DE SUPERPOSIÇÃO



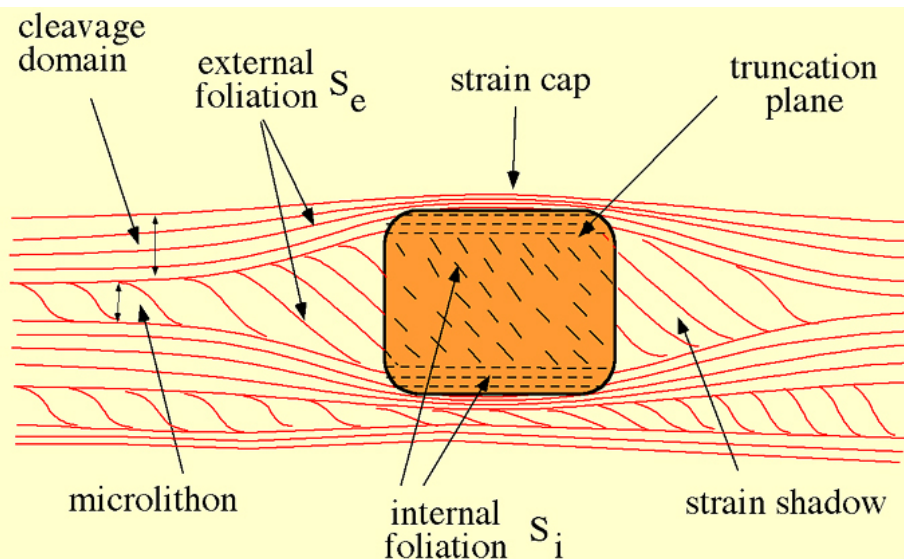
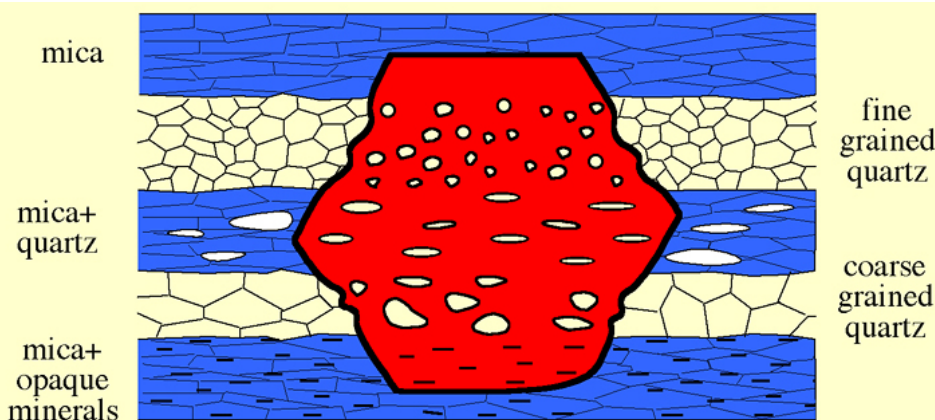
CRITÉRIOS TEXTURAIS DE SUPERPOSIÇÃO DE FASES DE DEFORMAÇÃO



PORFIROBLASTOS

NUCLEAÇÃO E CRESCIMENTO DE PORFIROBLASTO

O processo de crescimento de um porfiroblasto é principalmente controlado pela difusão, seja em estado sólido, seja através de fluidos presentes nos limites dos grãos. Os minerais não reagentes e adjacentes ao porfiroblasto em crescimento, tendem a ser removidos por dissolução e difusão, quanto maior for a temperatura do metamorfismo. Em condições de médio-baixo grau metamórfico os minerais que não participam da reação de formação do porfiroblastos e não são removidos, serão sobrecrecidos, e restam como **inclusões passivas**.



Se a rocha possuía uma fábrica precedente, ela pode ser parcialmente preservada pelos grãos inclusos, por mimetismo de fábrica. Podem ser incluídos traços de foliação e estruturas mais complexas (dobras e crenulações). Minerais opacos e quartzo, zircão, monazita, rutilo, apatita, titanita e epidotos, são inclusões frequentes em porfiroblastos de Al-silicatos. As demais fases (micas, estauroлита, feldspatos, etc), reagentes na formação do porfiroblasto (p. ex. granada), restam como inclusões quando em excesso.

Cuidado! - sobrecrecimento destes minerais podem parecer inclusões.

ROTAÇÃO DE PORFIROBLASTO

Objetos rígidos em uma matriz homoganeamente deformada podem sofrer uma rotação em relação aos eixos instantâneos de *stress* (ISA). Isso se aplica aos objetos alongados e orientados obliquamente aos eixos de encurtamento de uma deformação progressiva coaxial, ou um objeto unidimensional, ou pouco alongado, em uma deformação progressiva não-coaxial.

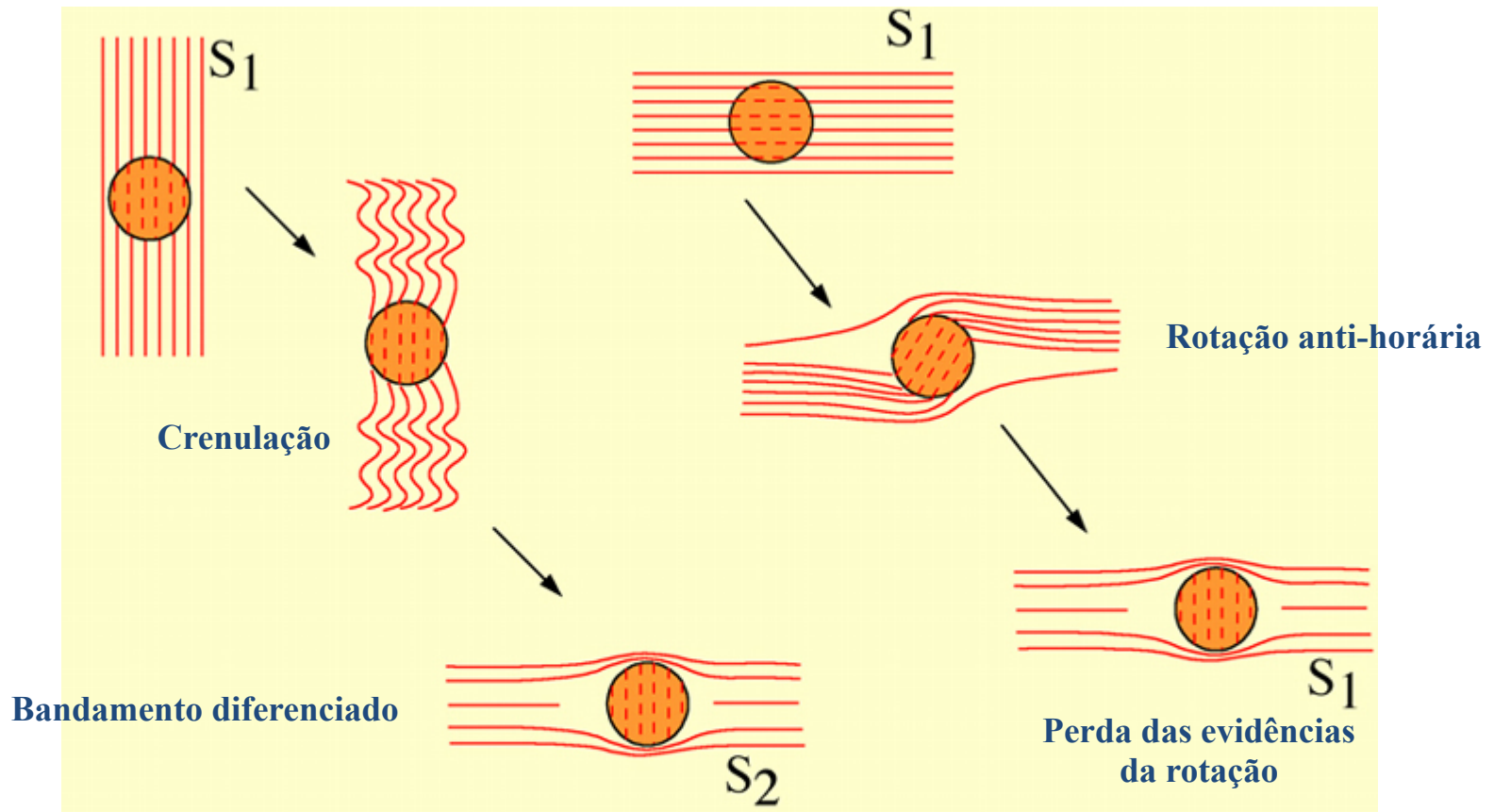
A descontinuidade entre S_i e S_e não permite conclusões sobre a rotação do porfiroblasto

Se não há mais conexão entre S_i e S_e , essas microfábricas podem representar diferentes foliações (S_1 e S_2), ou diferentes estágios de desenvolvimento de uma única foliação metamórfica, em um processo contínuo de deformação coaxial ou não-coaxial.

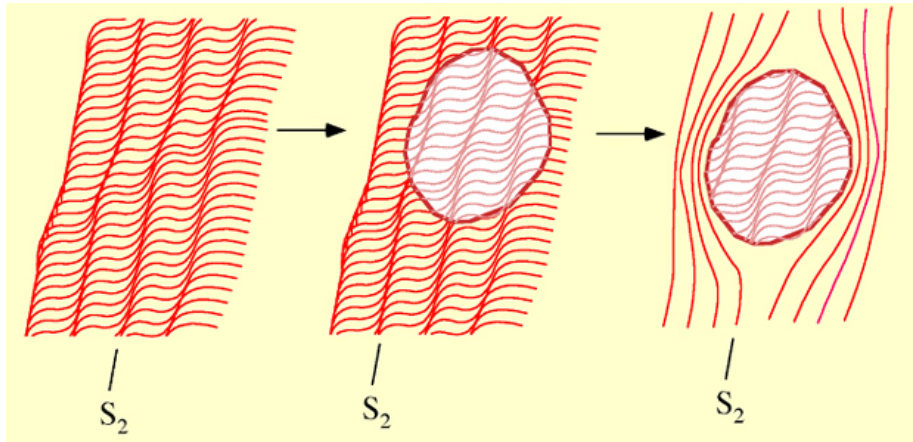
Sem a continuidade entre as foliações S_i e S_e não se demonstra a rotação.

DEFORMAÇÃO COAXIAL

DEFORMAÇÃO NÃO-COAXIAL



NUCLEAÇÃO - CRESCIMENTO - INCLUSÕES



Superposição de uma clivagem de crenulação sobre antiga foliação S_1 .

Crescimento de porfiroblasto mimetizando a clivagem de crenulação.




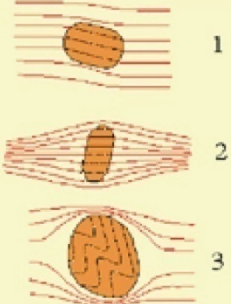
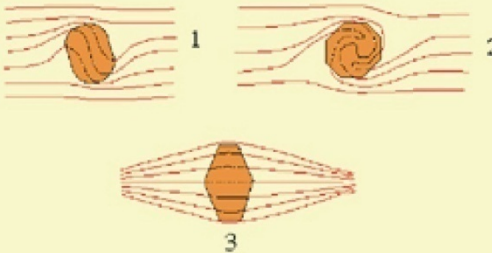



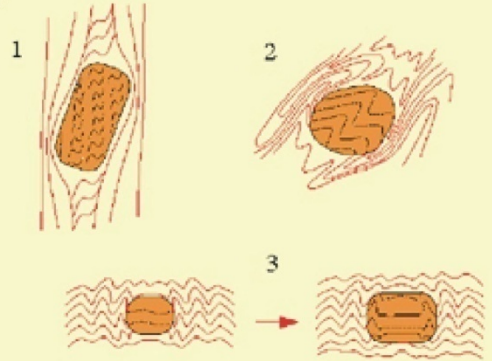

Deformação e crescimento mineral – clivagem de crenulação evolui para bandamento diferenciado → xistosidade contínua e bandamento diferenciado são defletidos em torno do porfiroblasto.

$$S_2 = S_e .$$

Trilha de inclusões $S_i = S_1 \rightarrow$ registro do estágio deformacional e metamórfico anterior.

RELAÇÕES PORFIROBLASTO-MATRIZ

Pré, inter, sin, ou pós-cinemáticos em relação a um dado elemento estrutural, como por exemplo a foliação S2.
São comumente denominados de porfiroblastos pré, inter, sin, ou pós- tectônicos

pré-cinemático	inter-cinemático	sin-cinemático	pós-cinemático
<p>A</p> 	<p>C</p> 	<p>E</p> 	<p>G</p> 
<p>B</p> 	<p>D</p> 	<p>F</p> 	<p>H</p> 
<p>Inclusões erráticas</p>	<p>Deflexão da Se ao redor do porfiroblasto Presença de zonas de sombra de pressão</p> <p>Si descontínua com a Se</p>	<p>Inclusões com fábrica de foma (Si)</p> <p>Si contínua com a Se</p>	<p>Sem deflexão da Se e sem zona de sombra de pressão</p>

Deformação sem dobramento da foliação externa

Deformação com dobramento da foliação externa

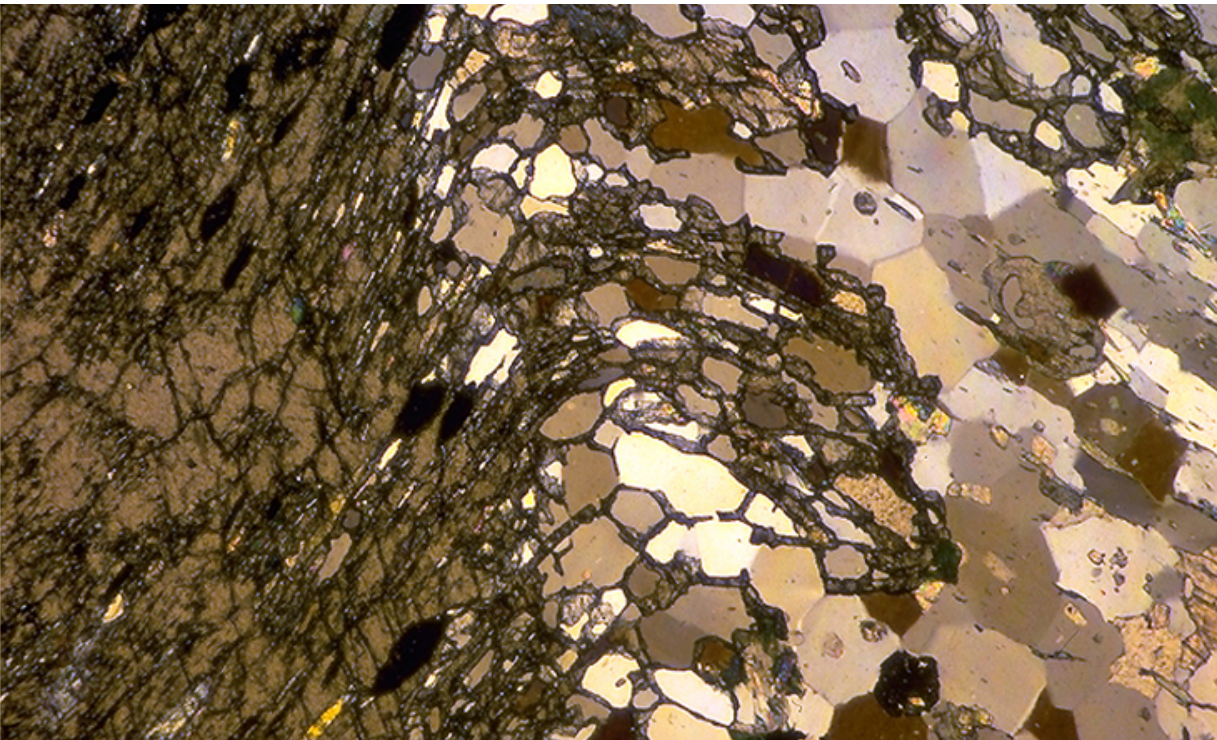
RELAÇÕES PORFIROBLASTO-MATRIZ

Porfiroblastos pré-tectônicos relacionam-se a forte deflexão da xistosidade externa e possuem inclusões aleatórias

Porfiroblastos inter ou cedo-tectônicos crescem passivamente sobre a microestrutura anterior, preservando-a, como foliação interna (Si), da deformação subsequente

Porfiroblastos sin-tectônicos crescem durante a fase de deformação. A fábrica de inclusões (Si) no geral está encurvada e contínua com a fábrica externa ao porfiroblasto (Se) e evidencia as modificações de forma e posição do porfiroblasto, durante o crescimento. A distinção entre os porfiroblastos inter/sin-tectônicos é delicada, na medida em que reflete estágios da progressão da deformação e da recristalização mineral metamórfica, bem como incrementos posteriores da deformação, ou rompimentos porfiroblasto-matriz com a rotação.

Porfiroblastos pós-tectônicos crescem estaticamente, no fim da deformação. A forma das inclusões, ou a foliação-Si, é igual e contínua com a fábrica externa, ou foliação Se

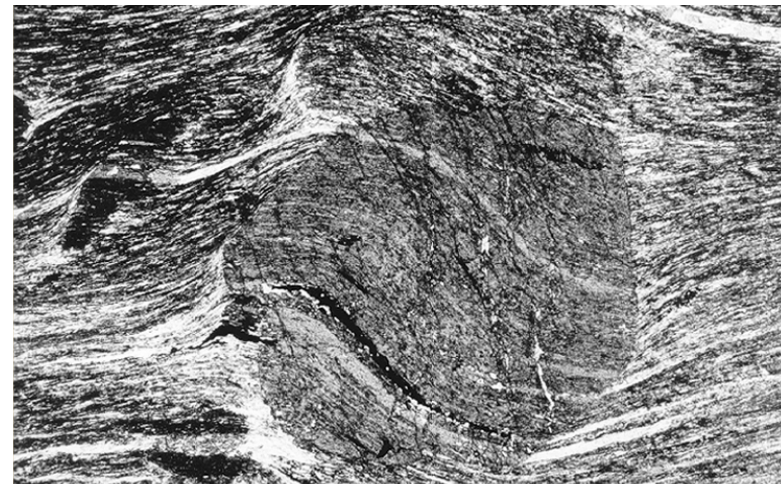
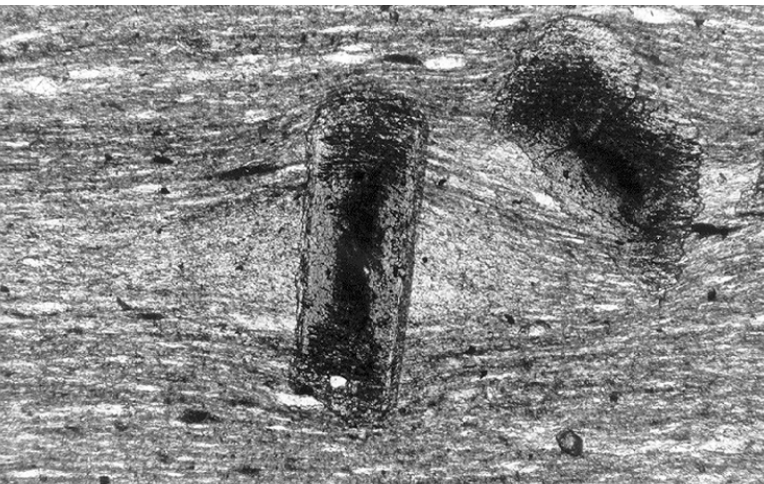


Porfiroblasto de granada com borda esqueletal e foliação externa contínua com a foliação interna – **porfiroblasto sin-cinemático**

Os cristais de quartzo na borda da granada são incorporados dentro do porfiroblasto com granulação reduzida. Registram um crescimento estático (textura granoblástica poligonal, sem extinção ondulante).

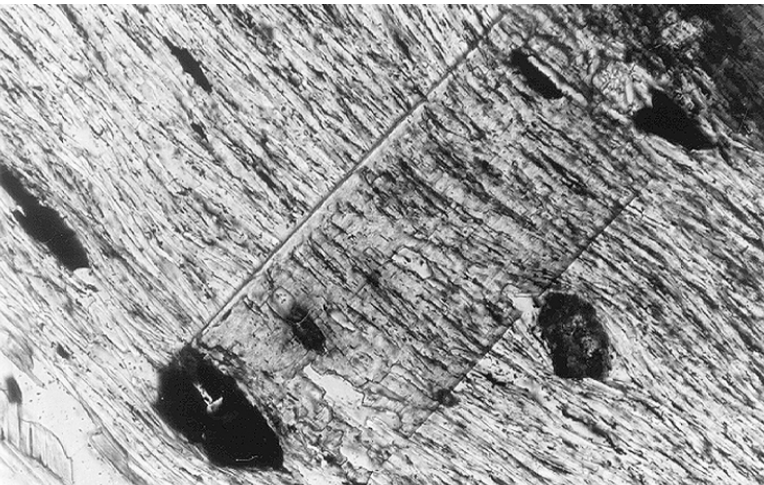
A borda esqueletal de Grt e intersticial aos grãos de quartzo poligonizados, restringem o crescimento do quartzo. Evidenciam o crescimento da borda granada sincrônica à recristalização do quartzo.

PORFIROBLASTOS SINTECTÔNICOS

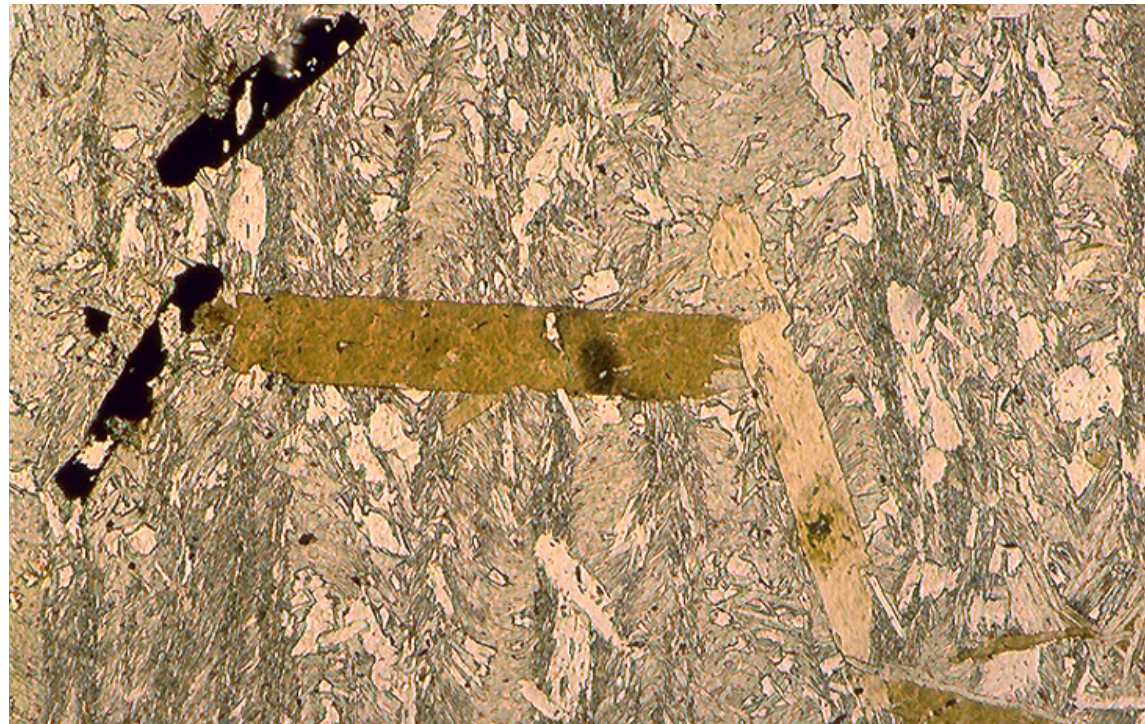


PORFIROBLASTOS PÓS-TECTÔNICOS

Notar a ausência de encurvamentos da foliação externa no contorno do porfiroblasto e a ausência de zonas de sombra de pressão.

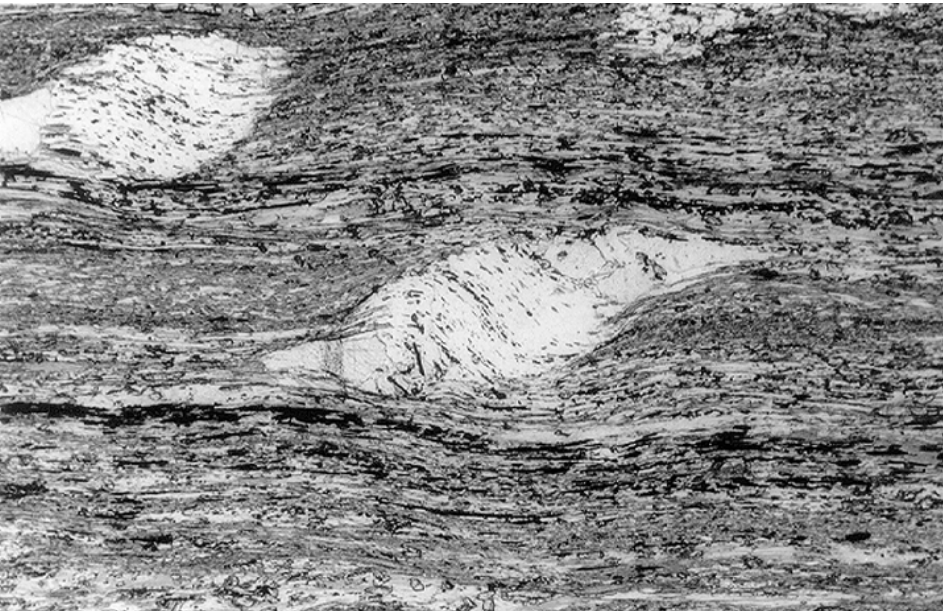


Cristal **pós-tectônico** de cloritóide sobrepondo uma xistosidade contínua.

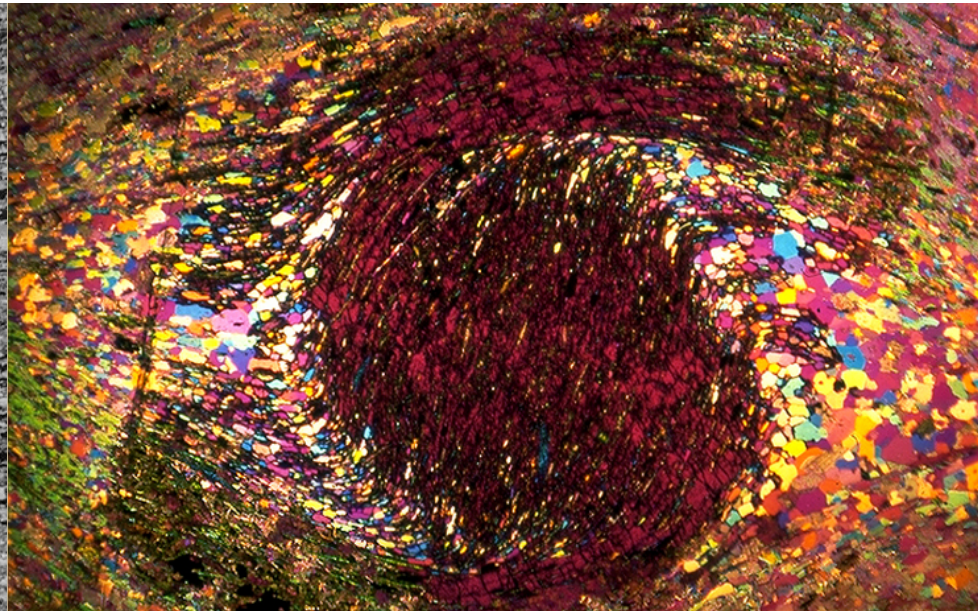


Biotita e ilmenita, **pós-tectônicas**, cortando uma clivagem de crenulação

ROTAÇÃO DE PORFIROBLASTO - Si OBLÍQUA



Porfiroblasto sintectônico de albita com Si sigmoidal e zona de sombra de pressão assimétrica de quartzo.
Rotação horária



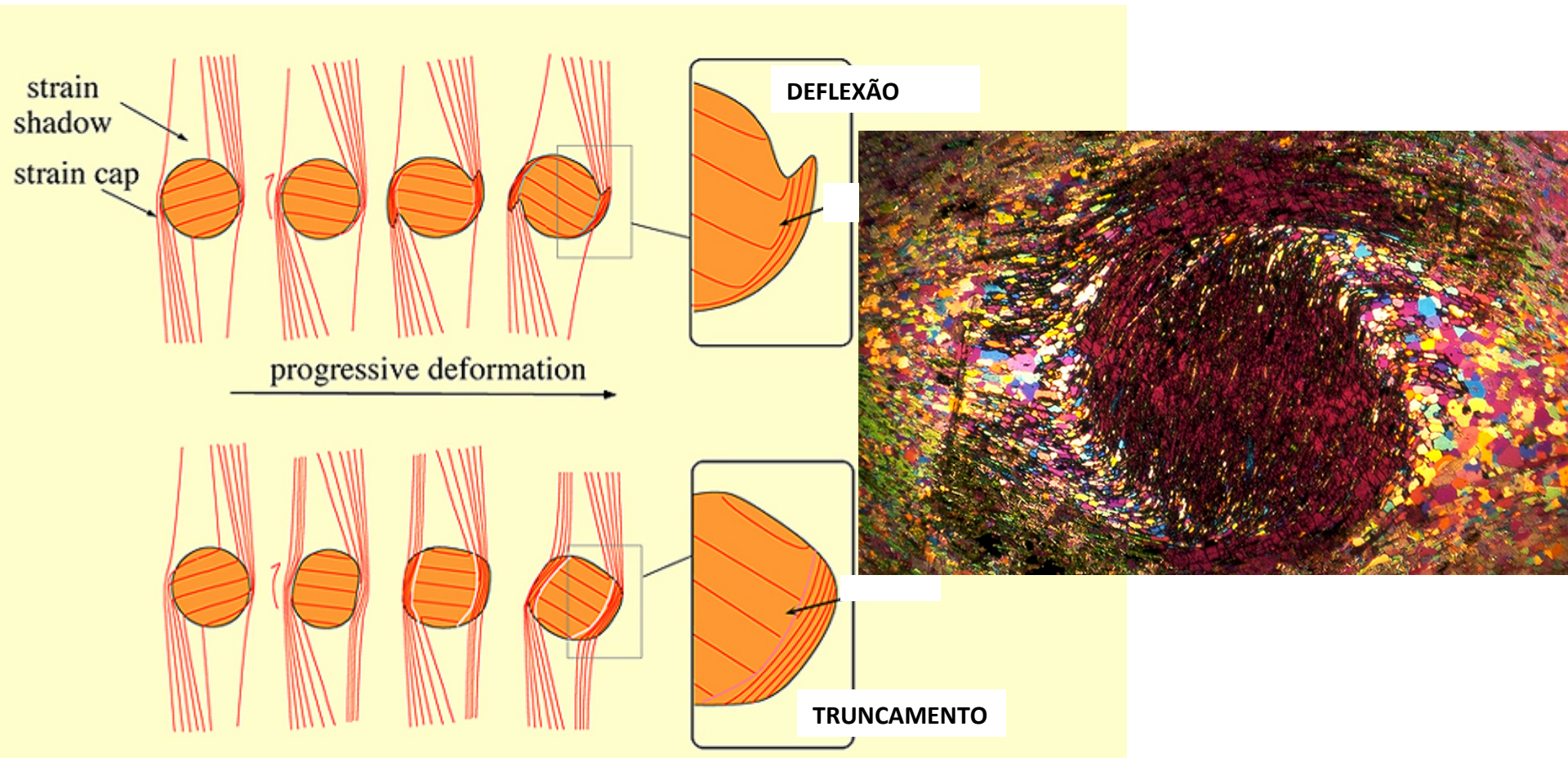
Grt sintectônica com crescimento esquelético na zona de sombra de pressão. **Rotação anti-horária** e *strain cap* (boné de sobrecrecimento estacionário)

ROTAÇÃO DE PORFIROBLASTO E SOBRECRESCIMENTO

O desenvolvimento de planos de deflexão e ou de planos de truncamento, em porfiroblastos sintectônicos, podem indicar um crescimento periódico do porfiroblasto, sob uma deformação não-coaxial.

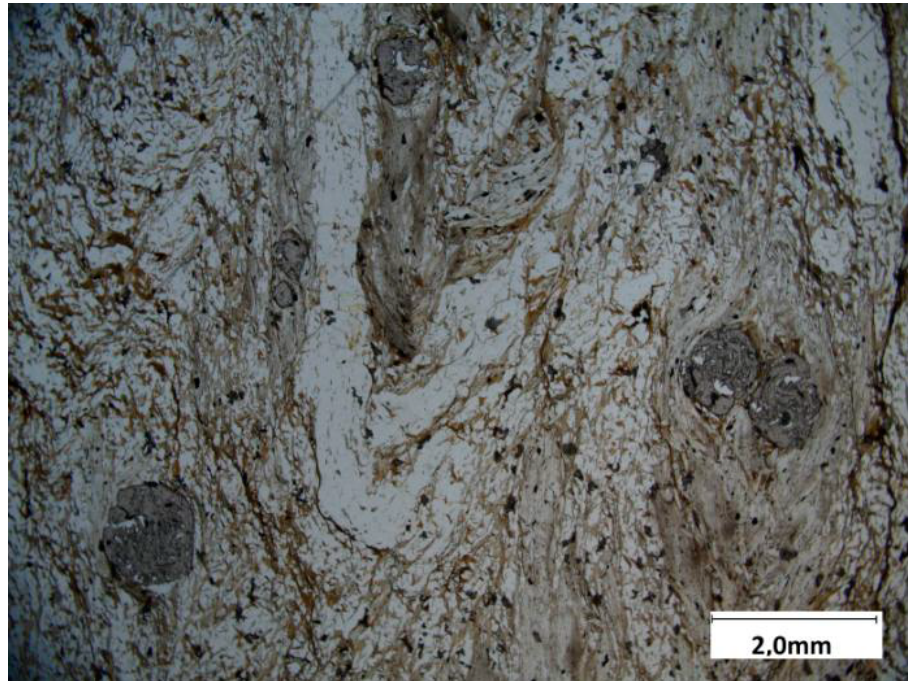
Crescimento contínuo progressivo: o *strain cap* e a zona de sombra de pressão desenvolvem-se progressivamente e o porfiroblasto cresce, continuamente sobre o manto micáceo e desenvolve uma deflexão contínua da Si.

Crescimento episódico: o desenvolvimento do porfiroblasto pode ser temporariamente interrompido, com sua dissolução local do no nível do manto micáceo. Com a retomada do crescimento o porfiroblasto trunca a foliação interna.



PORFIROBLASTOS INTERTECTÔNICOS A SINTECTÔNICOS

Porfiroblasto sintectônico com rotação horária de cerca de 90° e sobrecrecimento em zona de sombra de pressão



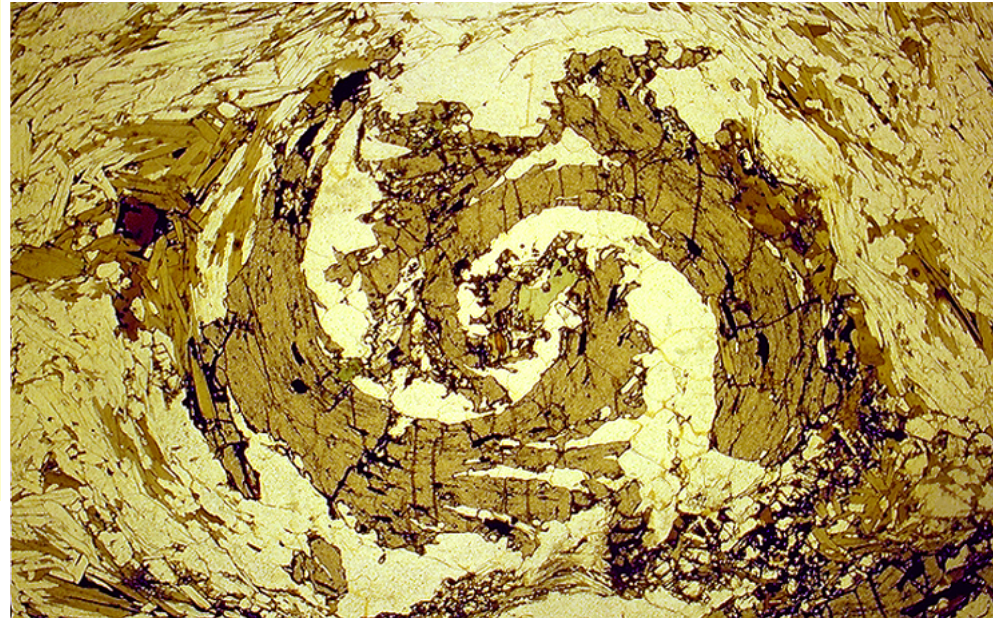
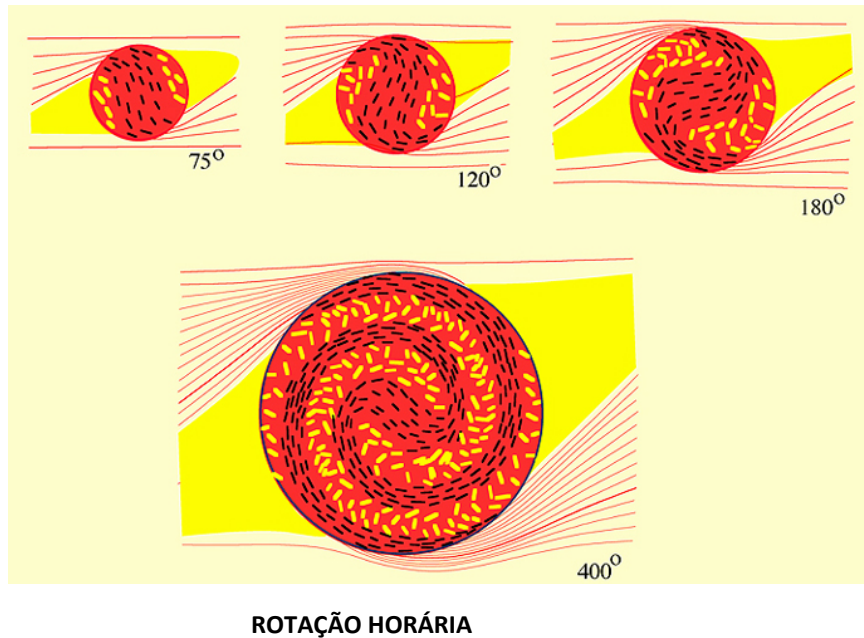
Porfiroblastos amalgamados

Porfiroblasto de granada com rotação anti-horária e crescimento episódico



ROTAÇÃO DE PORFIROBLASTO - Si EM ESPIRAL

Porfiroblastos com Si espiralada podem ocorrer em granada, estauroлита, albita, etc., mas as espirais bem desenvolvidas, com rotação relativa superior a 180° - **microestruturas tipo *snowball*** – aparentemente restringem-se a formas circulares - granadas .

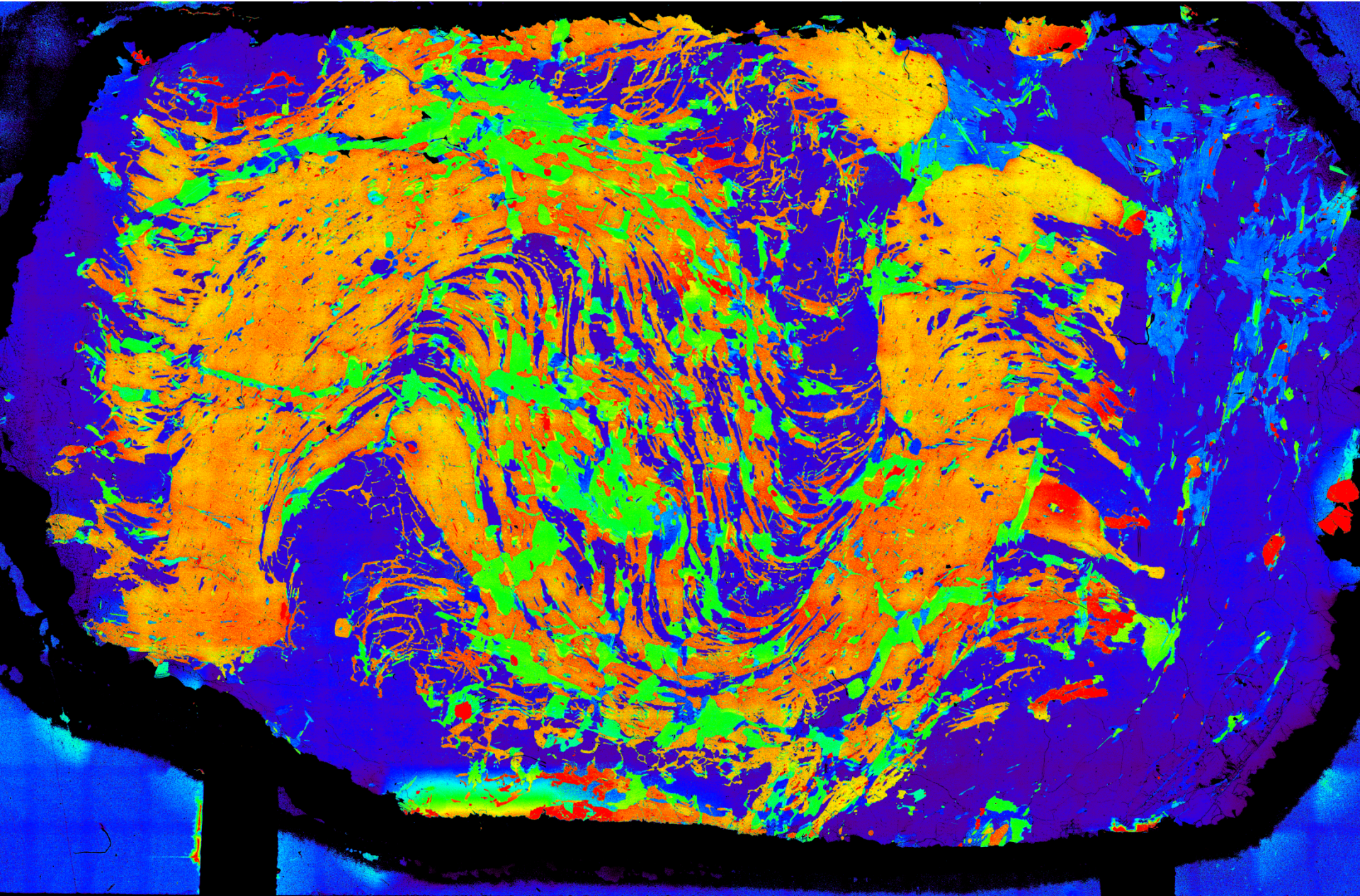


Passchier & Trouw/Microtectonics (1996)

Essas estruturas são interpretadas como porfiroblastos sintectônicos, crescidos sob fluxo não-coaxial e que foram rotacionados em relação a S_e e aos eixos instantâneos de *stress*. Mas a rotação do porfiroblasto é admitida com segurança quando:

i- o sentido de rotação é confirmado por outro indicador cinemático; ii- as amplitudes das espirais de Si são cada vez menores em direção a borda do cristal; iii- as dobras de Si possuem plano-axial fortemente encurvado; iv- espirais de Si podem resultar de inclusões da zona de sombra de pressão; v- o ângulo relativo de rotação excede 180° .

GRANADA SINTECTÔNICA ESPIRALADA COM MICROESTRUTURAS CONFLITANTES



P kbar

