

# Zonas de cisalhamento 2 – cataclasitos e milonitos

GMG0338 – Geologia Estrutural II

**Prof. Claudio Salazar Mora**

**01/10/2020**

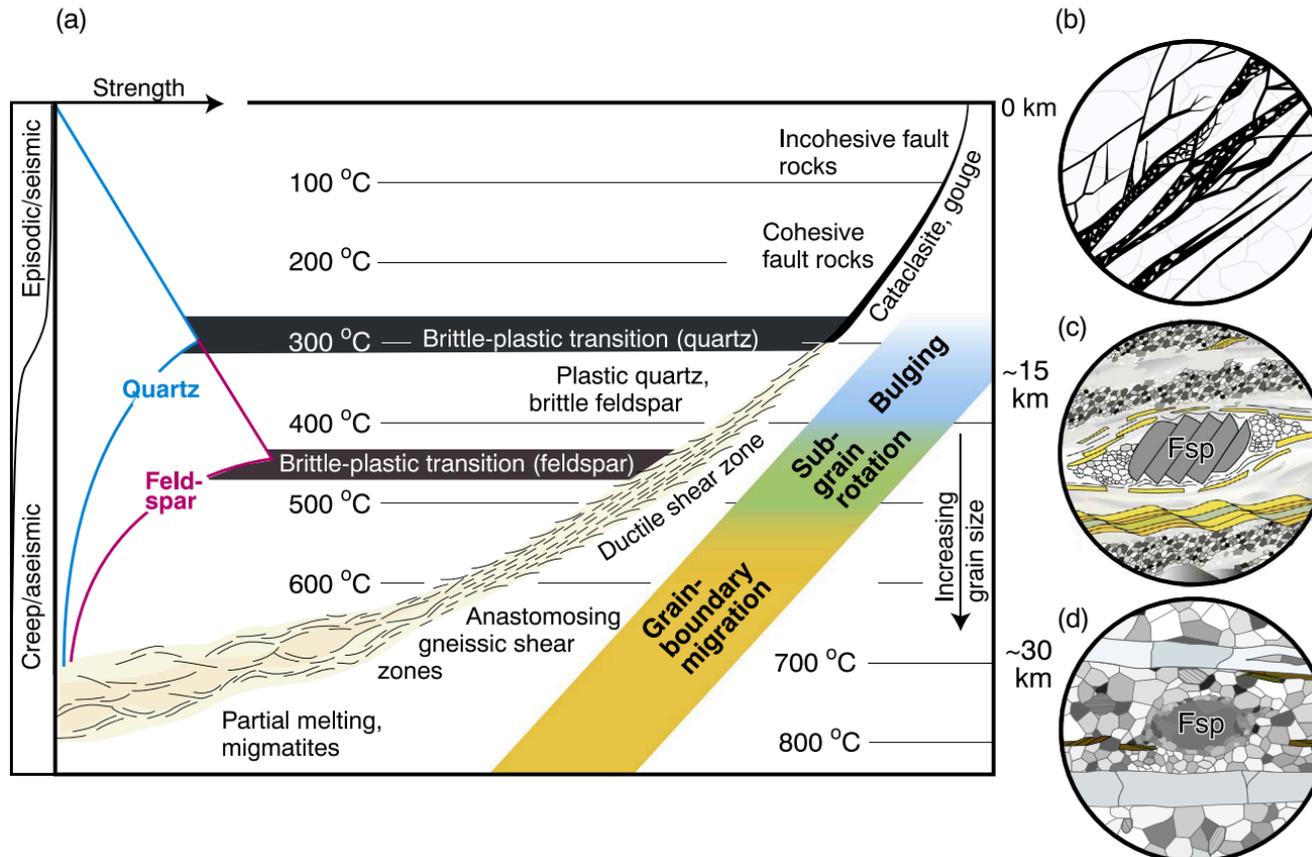
# Temas da aula

1. Rochas de falha e classificação
2. Cataclasitos e aspectos microtectônicos
3. Milonitos e aspectos microtectônicos
4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

# 1. Rochas de falha e classificações

As rochas que são produzidas pela deformação dentro de falhas e de zonas de cisalhamento formam o grupo das **rochas de falha**.

Através do estudo das rochas de falha podemos inferir os mecanismos de deformação atuantes durante a deformação. Além disso, essas rochas são importantes para os estudos de falhas, no sentido permitirem ou não a circulação de fluidos.



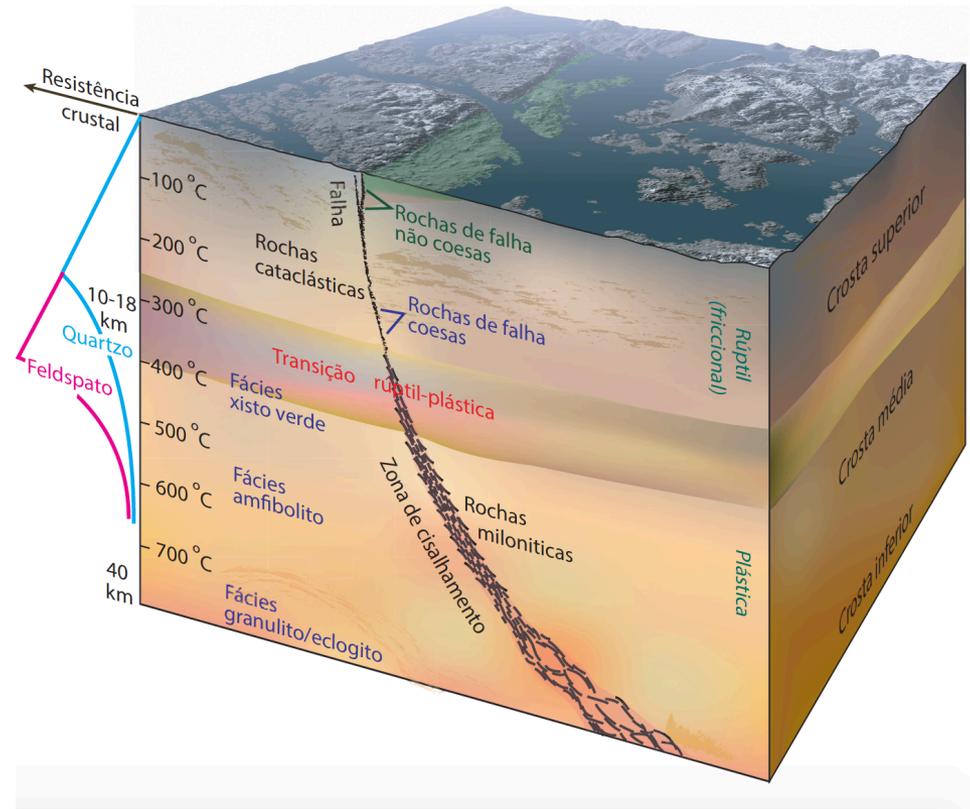
# 1. Rochas de falha e classificações

TABLE 1: *Textural classification of fault rocks*

|                     |   | Não - foliadas  | Foliadas  |  |                                   |  |
|---------------------|---|---|---|--|-----------------------------------|--|
| Não-coesas          |   | <b>Brecha de falha</b><br>(visible fragments >30% of rock mass)   | ?   |  |                                   |  |
|                     |   | <b>Gouge de falha</b><br>(visible fragments <30% of rock mass)  | ?   |  |                                   |  |
| Coesas              | Vidro   | <b>Pseudotaquilito</b>  | ?   |  |                                   |  |
|                     | Na matriz da rocha, domina cominuição dos grãos sobre o crescimento dos grãos por recuperação | <b>Brecha de moagem</b> (fragments > 0.5 cm)  | <b>Protomilonito</b><br>———<br>MYLONITE SERIES<br>———<br><b>Milonito</b><br>———<br><b>Ultramilonito</b> | 0 - 10%<br>10 - 50%<br>50 - 90%<br>90 - 100% | Proporção de matriz sobre clastos |  |
|                     |   | <b>Brecha de moagem fina</b> (0.1cm < frags. < 0.5cm)   |   |  |                                   |  |
|                     |   | <b>Microbrecha de moagem</b> (fragments < 0.1 cm)   |   |  |                                   |  |
|                     |   | <b>Protocataclasito</b><br>———<br>CATACLASITE SERIES<br>———<br><b>Cataclasito</b><br>———<br><b>Ultracataclasito</b> |   |  |                                   |  |
| Crescimento de grão | ?   | <b>Blastomilonito</b>   |   |  |                                   |  |

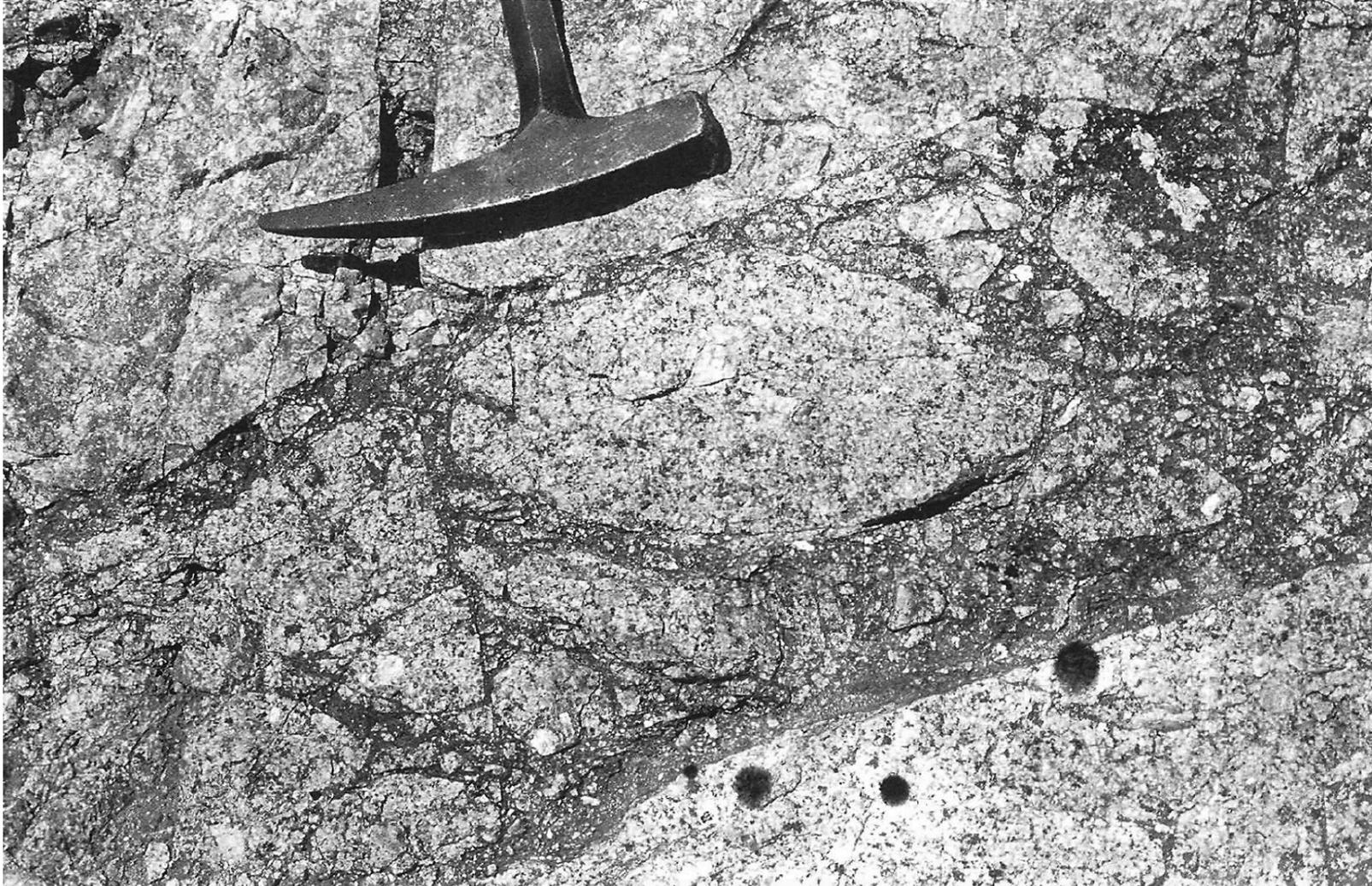
## 2. Cataclasitos

- A série dos cataclasitos tem mais de 10% de matriz envolvendo os clastos;
- Cataclasitos tem bastante evidências de deformação rúptil, mas podem conter também mecanismos dúcteis dependendo da profundidade;
- São caracterizados por clastos com terminações angulosas envoltos em uma matriz mais fina (de composição condizente à rocha parental) apresentando um caráter fractal;
- Sílica (qtz), óxidos de ferro, calcita, clorita podem precipitar de fluidos sin-tectônicos, garantindo a coesão;



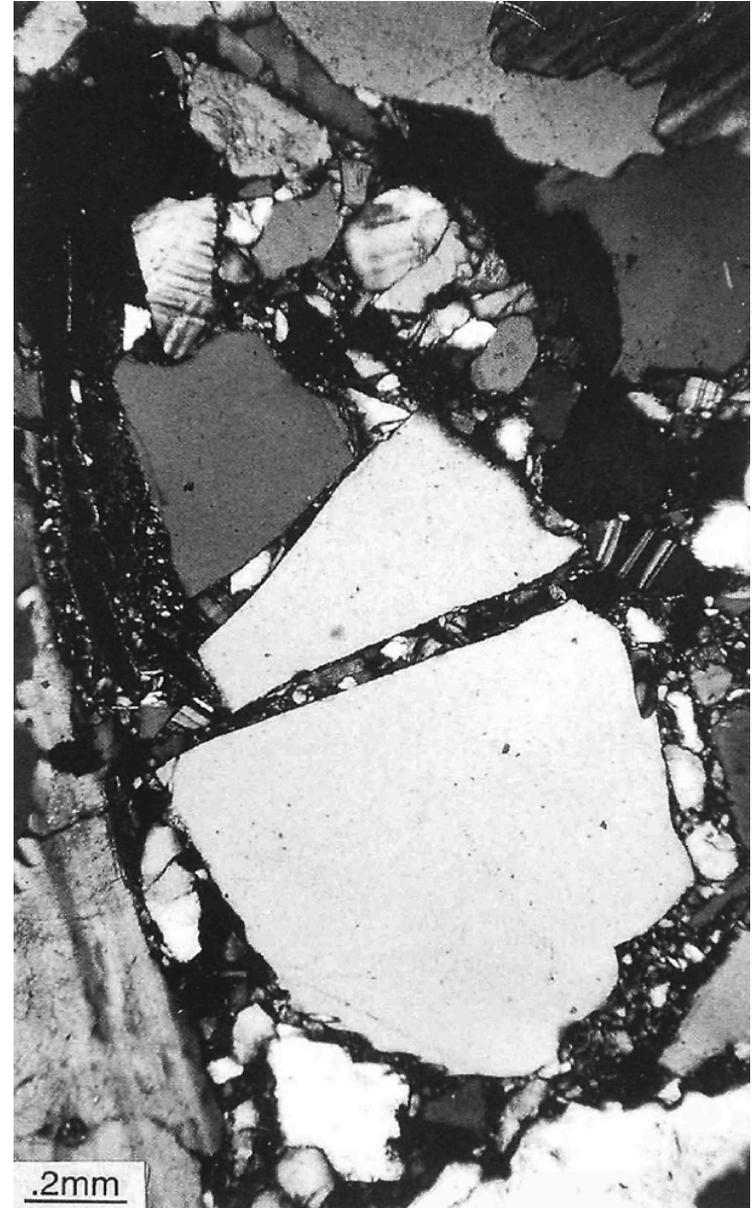
Trata-se de uma moagem da rocha parental por microfraturamentos, geração de clastos angulosos que rotacionam e transladam e que geram diminuição mecânica, gerando cada vez mais % de matriz fina.

## 2. Cataclasitos



Geração de cataclasito em rochas graníticas. Observem as terminações angulosas dos clastos e a geração de uma matriz mais fina por moagem.

## 2. Cataclasitos



Mesmo granito em lâmina delgada: grão angulosos, matriz fina, microfraturas.

# 2. Cataclasitos

Cataclasitos da ZC Camburu, no planalto do Juqueriquerê, litoral norte de SP

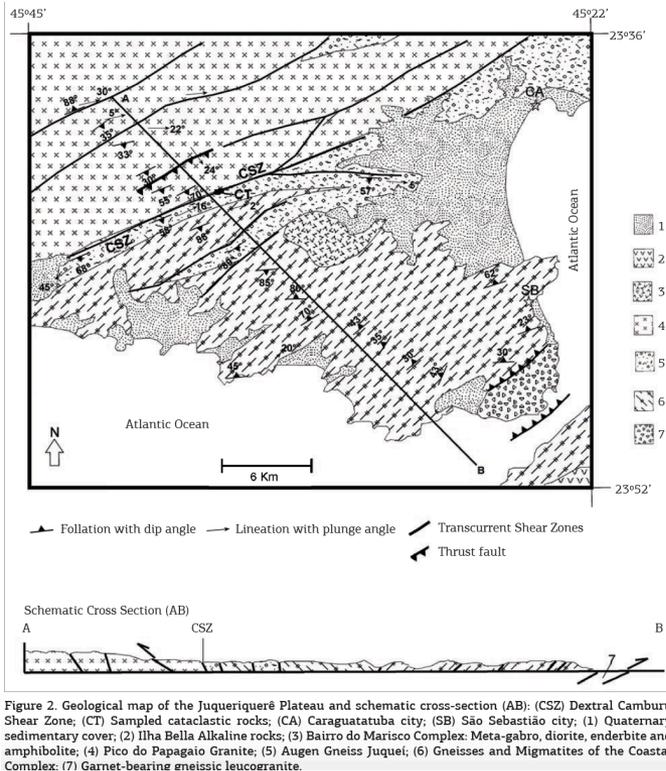
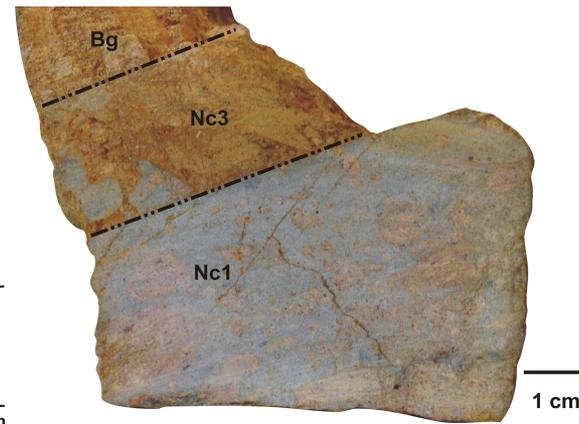
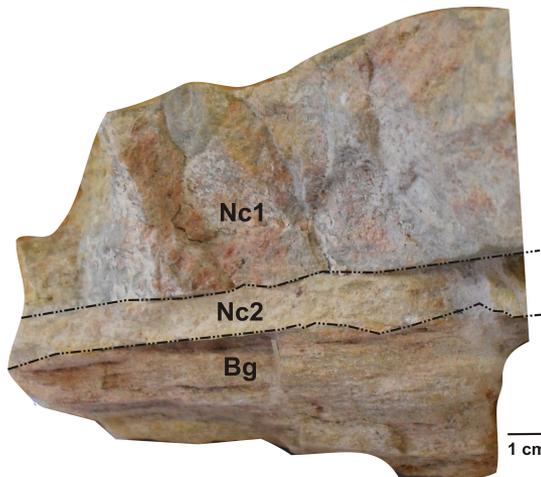
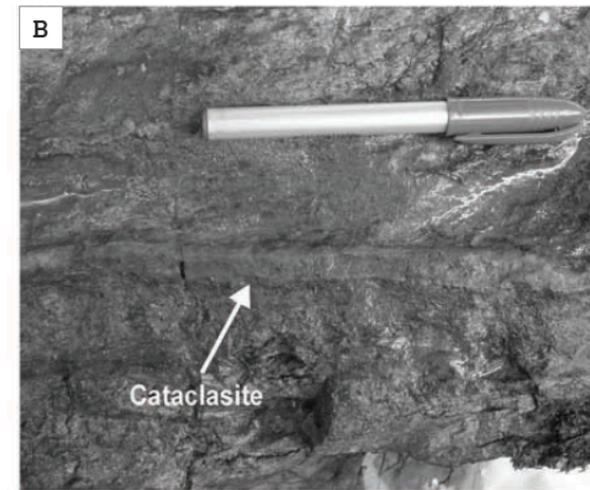
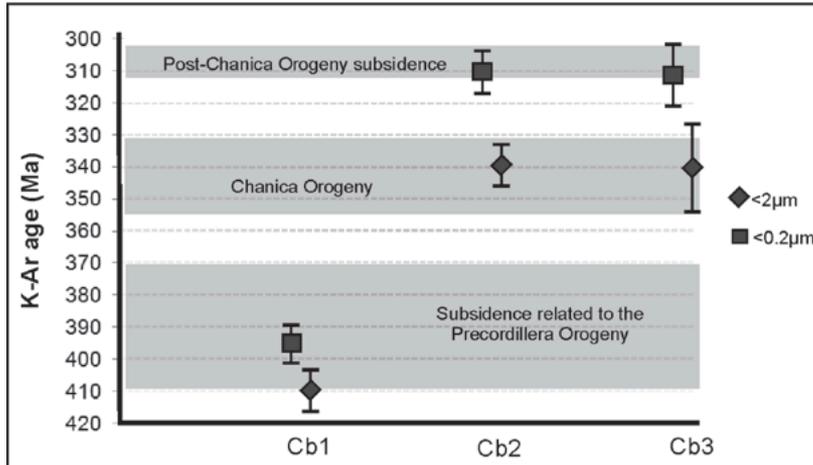


Figure 2. Geological map of the Juqueriquerê Plateau and schematic cross-section (AB): (CSZ) Dextral Camburu Shear Zone; (CT) Sampled cataclastic rocks; (CA) Caraguatatuba city; (SB) São Sebastião city; (1) Quaternary sedimentary cover; (2) Ilha Bella Alkaline rocks; (3) Bairro do Marisco Complex: Meta-gabro, diorite, enderbite and amphibolite; (4) Pico do Papagaio Granite; (5) Augen Gneiss Juquel; (6) Gneisses and Migmatites of the Coastal Complex; (7) Garnet-bearing aneissic leucogranite.

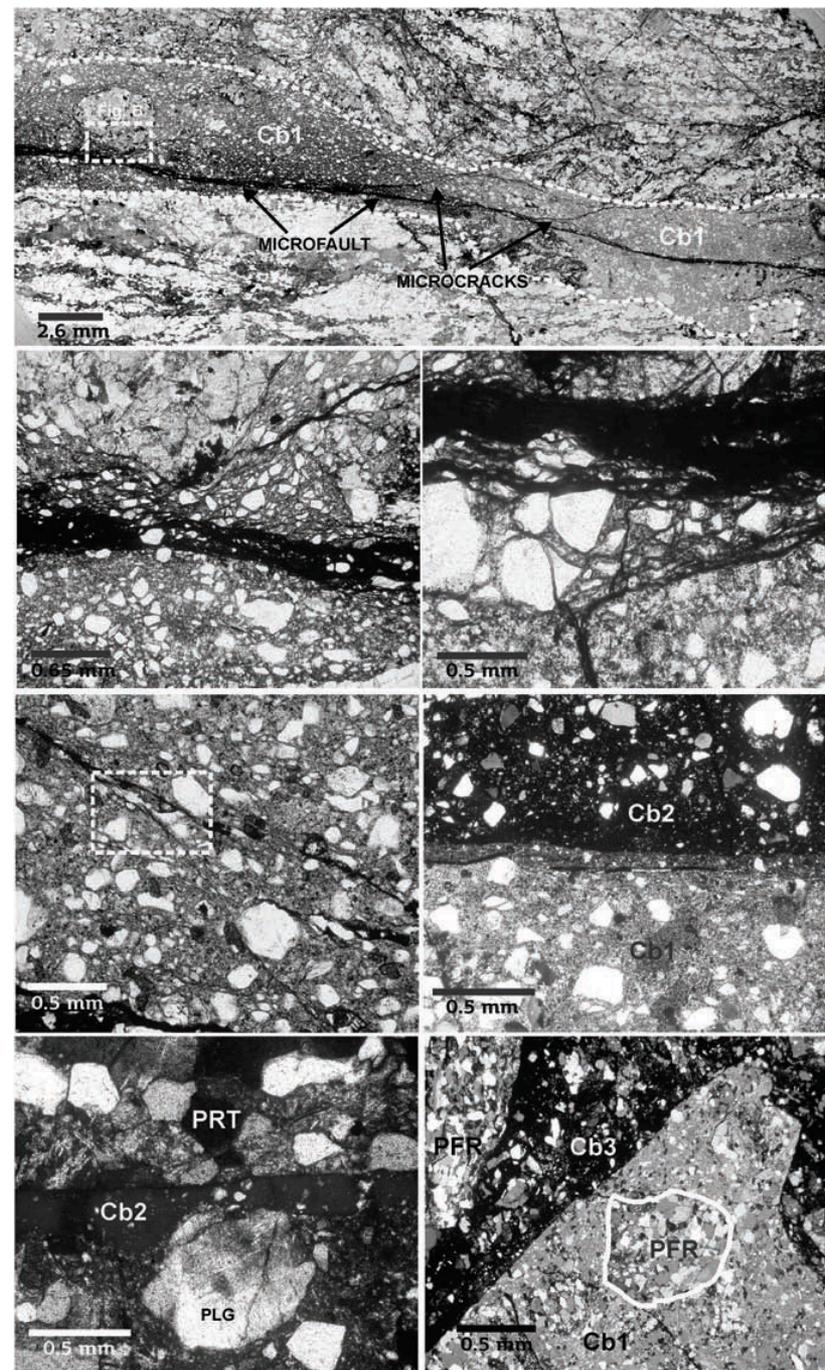


## 2. Cataclasitos

Cataclasitos da ZC Camburu, no planalto do Juqueriquerê, litoral norte de SP



A possível fonte do material que fez com que os cataclasitos se mantivessem coesos foi a atuação de reações que alteram o feldspato para micas, o que libera bastante sílica.



## 2. Cataclasitos

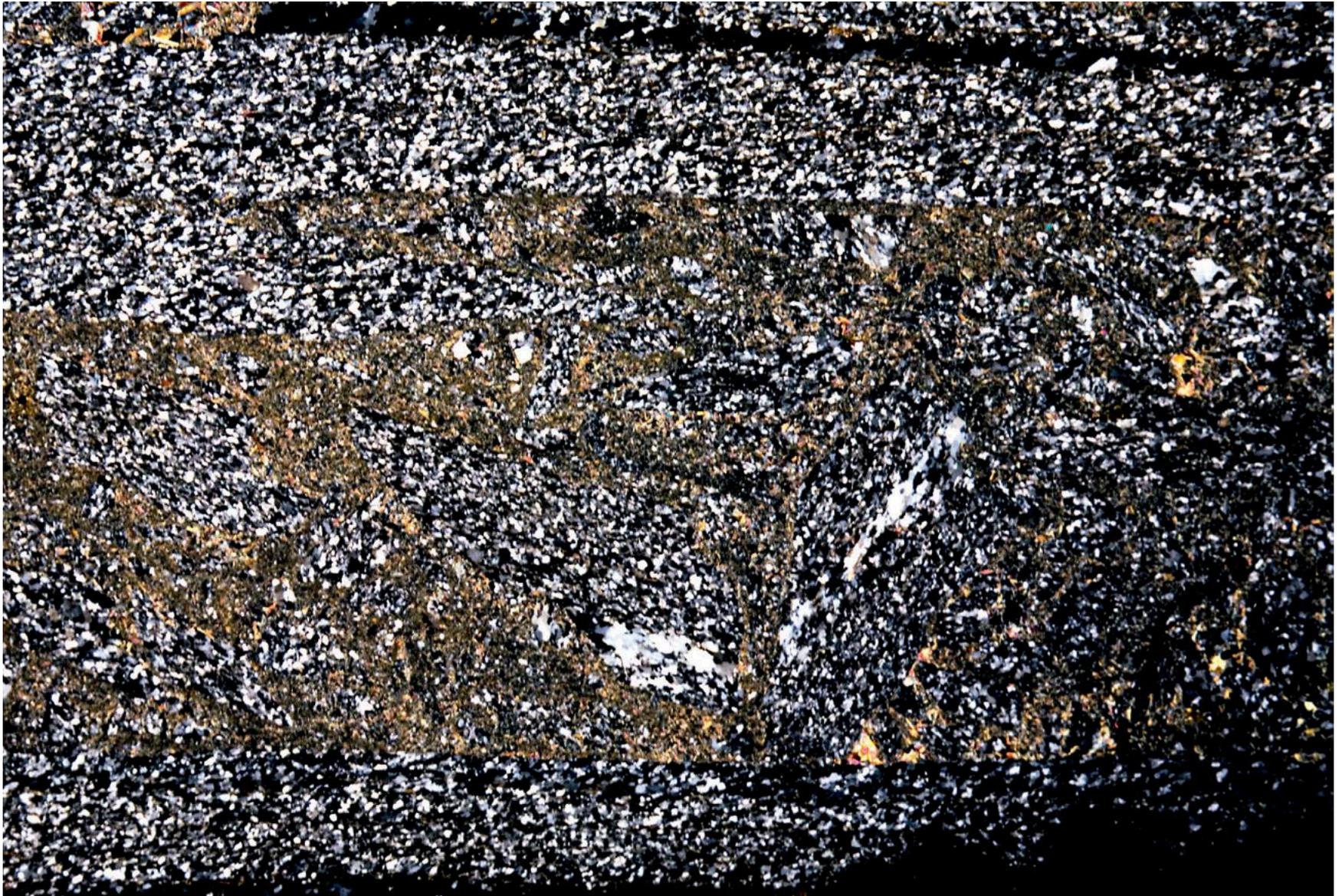
Outros exemplos



Transição de uma rocha fraturada (canto inferior esquerdo), passando por uma microbrecha de falha (centro) até um cataclasitos contendo micas (superior direito). Largura foto: 3mm

## 2. Cataclasitos

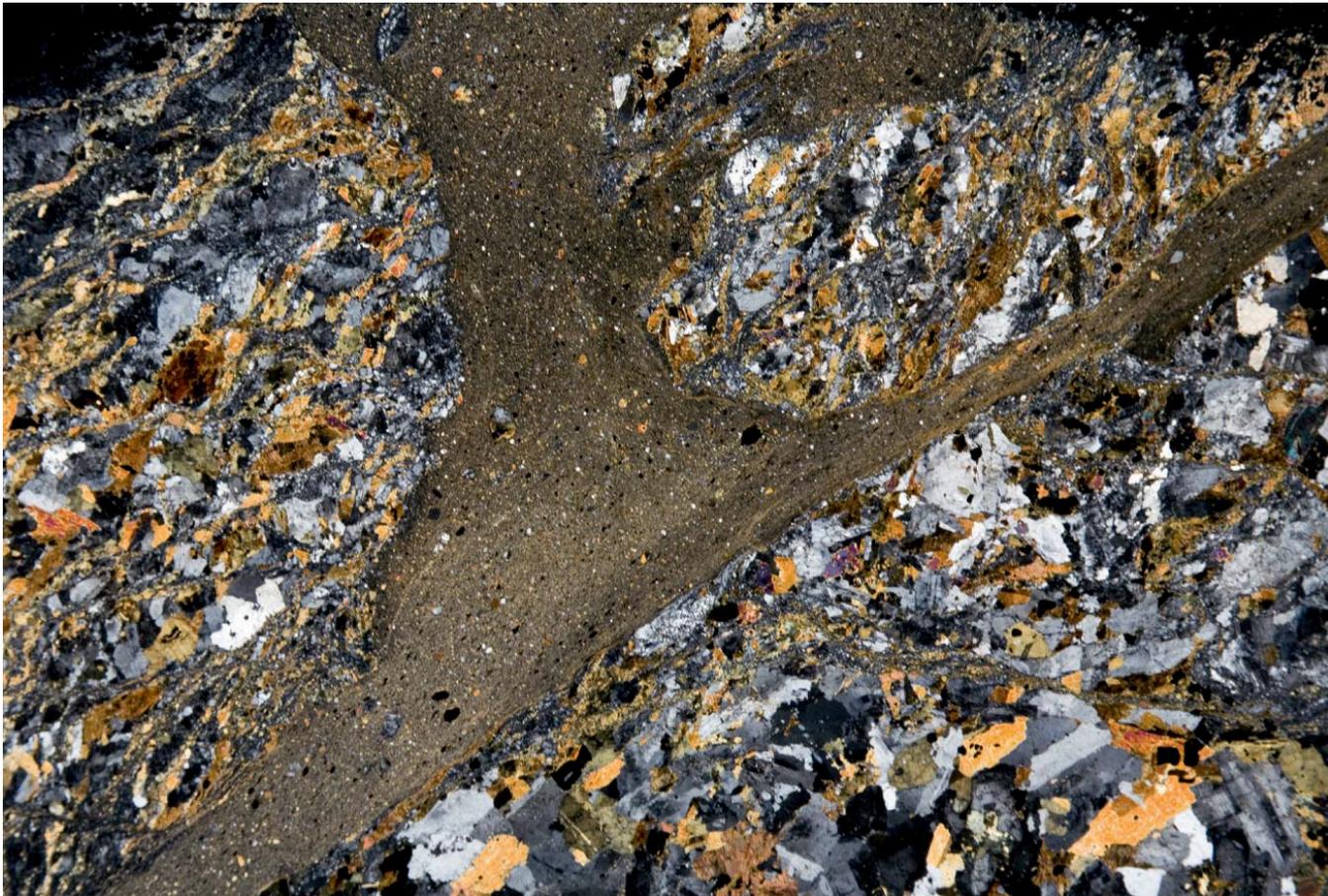
Outros exemplos



Cataclasito desenvolvido a partir de um granito milonítico. Largura da foto: 16mm

## 2.1 Pseudotaquilitos

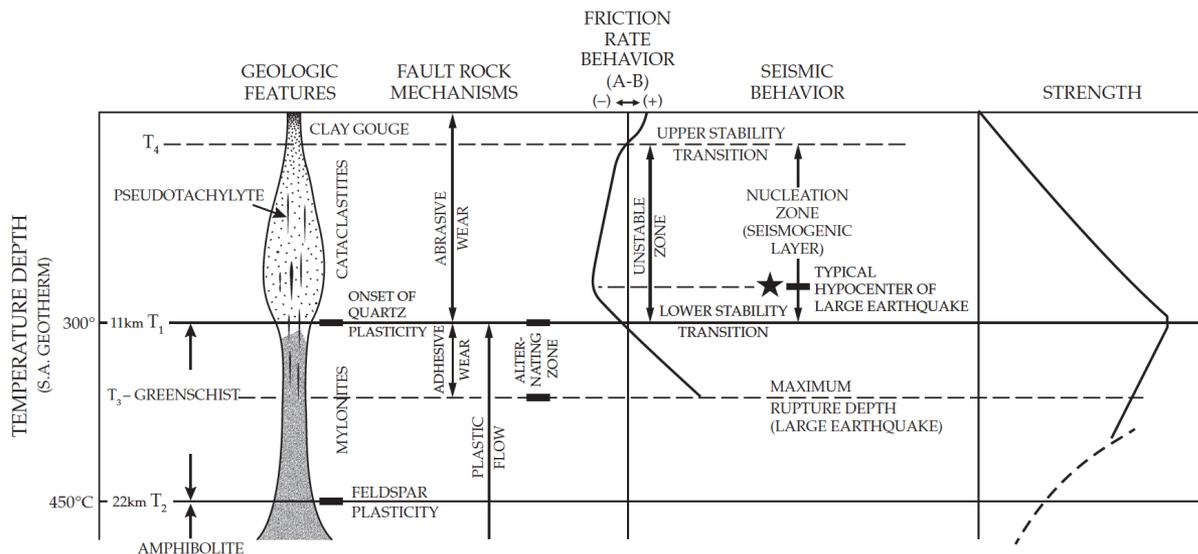
- São rochas coesas com matriz vítrea, isto é, sem cristalinidade;
- Geralmente são camadas finas, de cores marrom, preta ou cinza;
- Ocorrem caracteristicamente como veios, e tem uma transição brusca com a rocha hospedeira;
- Contêm clastos angulosos da rocha hospedeira envolto pela matriz vítrea.



Pseudotaquilito em granodiorito deformado. Notar a superfície de geração (cortando do canto superior direito ao inferior esquerdo) com um veio de injeção propagando para “NW”. Largura 20 mm.

## 2.1 Pseudotaquilitos

- A formação de um pseudotaquilito exige uma forte movimentação sísmica sob condições consideráveis de pressão;
- O calor friccional do falhamento funde a rocha na superfície do falhamento, algo conhecido como *frictional melting*;
- Portanto, pseudotaquilitos são representantes de um *melt* formado por fricção durante um evento sísmico;
- Estão na zona sísmica (mais rúptil) da crosta, sendo seguidos, em profundidade pelos milonitos (dúcteis) em uma zona assísmica.



**Fig. 3.44.** Synoptic model of a continental shear zone. See the text for explanation. (Modified from Scholz, 1988b.)

## 2.1 Pseudotaquilitos



Pseudotaquilito em veio em rocha granulítica e milonítica. Largura da foto: 20mm.



Dique máfico sigmoidal em granito milonítico. Sombras de pressão com *melt*.

### 3. Milonitos

---

Porfiroclasto tipo delta com rotação anti-horária.



# 3. Milonitos

De acordo com a classificação, milonitos são:

- Rochas coesas;
- Rochas cuja natureza da matriz é por cominuição devido à recristalização dinâmica;
- São protomilonitos quando têm de 10-50% de matriz envolvendo porfiroclastos;
- São milonitos, quando têm de 50-90%;
- Ultramilonitos, quando têm de 90-100%.
- O termo filonito pode ser utilizado quando o milonito deriva de rochas ricas em micas, como xistos;
- O termo blastomilonito refere-se a milonitos de alto grau metamórfico, muito afetados pela recristalização estática.

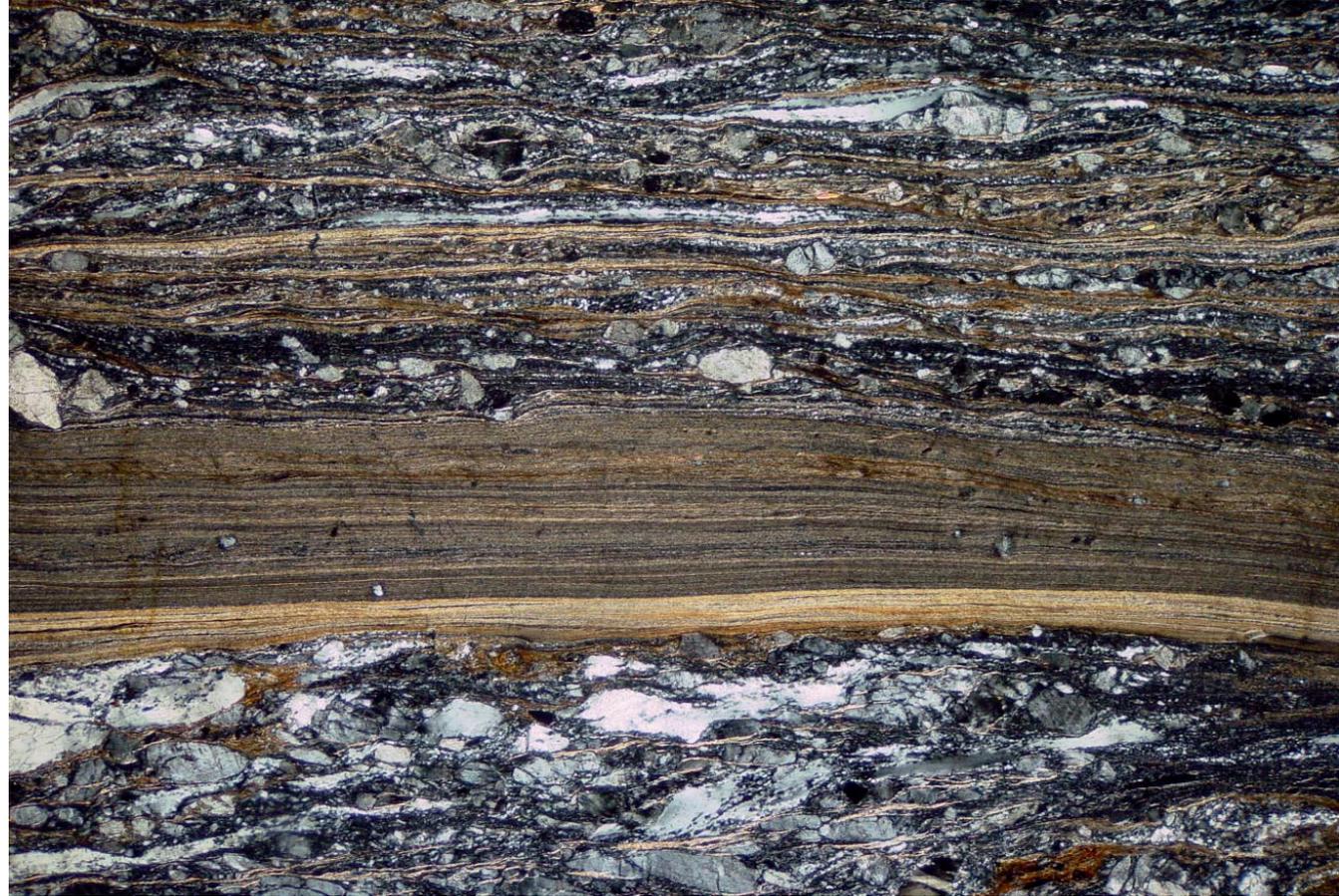
|                     |   | Não - foliadas   | Foliadas  |  |                                   |
|---------------------|---|--|---|--|-----------------------------------|
| Não-coesas          |   | <b>Brecha de falha</b><br>(visible fragments >30% of rock mass)                      | ?   |  |                                   |
|                     |   | <b>Gouge de falha</b><br>(visible fragments <30% of rock mass)                       | ?   |  |                                   |
| Coesas              | Vidro   | <b>Pseudotaquilito</b>   | ?   |  |                                   |
|                     | Na matriz da rocha, domina cominuição dos grãos sobre o crescimento dos grãos por recuperação | <b>Brecha de moagem</b> (fragments > 0.5 cm)   | <b>Protomilonito</b><br><hr/> <b>Milonito</b><br><hr/> <b>Ultramilonito</b> | <b>0 - 10%</b><br><hr/> <b>10 - 50%</b><br><hr/> <b>50 - 90%</b><br><hr/> <b>90 - 100%</b> | Proportão de matriz sobre clastos |
|                     |   | <b>Brecha de moagem fina</b> (0.1cm < frags. < 0.5cm)                                |   |  |                                   |
|                     |   | <b>Microbrecha de moagem</b> (fragments < 0.1 cm)                                    |   |  |                                   |
|                     |   | <b>Protocataclasito</b><br><hr/> <b>Cataclasito</b><br><hr/> <b>Ultracataclasito</b> | <b>PHYLONITE VARIETIES</b><br><hr/> <b>MYLONITE SERIES</b>                  |  |                                   |
| Crescimento de grão | ?   | <b>Blastomilonito</b>  |   |  |                                   |

### 3. Milonitos

**Milonito.** Aproximadamente 60% de matriz e 40% de porfiroclastos. Observar pares de foliação S/C e porfiroclastos do tipo sigma.

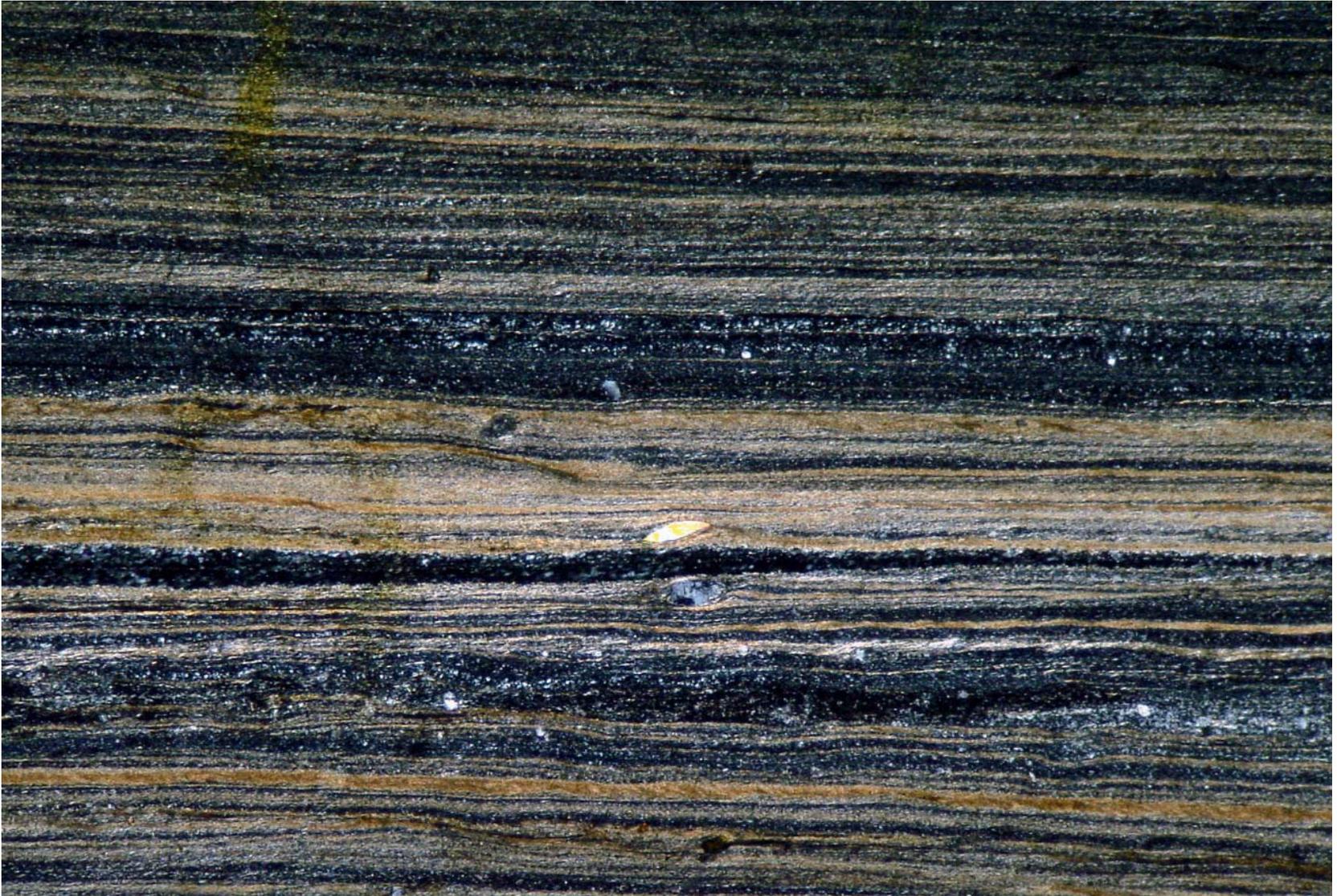
**Ultramilonito.** Transição brusca. Observar menos de 10% de porfiroclastos.

**Protomilonito** com feldspatos fraturados e quartzo alongado com extinção ondulante. Algumas micas amoldando os porfiroclastos. Porcentagem de matriz ~20%, mas ainda gradacional entre matriz e porfiroclastos (não fácil de distinguir).



**Cinemática:** Pares S/C e porfiroclastos assimétricos dão uma cinemática dextral, ou rotação horária.

### 3. Milonitos



Granito ultramilonítico com poucos porfiroclastos de feldspato e um porfiroclasto do tipo “peixe” de mica. Pode-se inferir cinemática?

Largura da foto 3mm

### 3. Milonitos

Dois pontos importantes antes de uma definição de milonito:

- o termo milonito deriva de *mill*, que quer dizer moer, triturar, esfarelar. Hoje sabe-se que não é bem isso que ocorre nos milonitos;
- o termo milonito, mesmo que comumente utilizado como *nome de rocha*, deve ser melhor utilizado como um termo estrutural, ao invés de litológico (i.e., um granito pode ser milonítico, um quartzito, um xisto, um anfíbolito...);

O termo “milonítico” pode ser utilizado em uma rocha quando:

- Houver uma forte presença de uma fábrica S/L, sendo L uma lineação de estiramento mineral;
- Houver a presença de uma matriz fina com porfiroclastos. Qtz, Chl, Bt e Ms presentes na matriz, recristalizados dinamicamente ou estaticamente. Flds, Grt, Hbl, Py formam porfiroclastos, geralmente com extinção ondulante evidenciando deformação cristalina;
- Houver a presença de uma *assimetria*, principalmente em milonitos de baixo grau, como pares S/C e C', mineral fishes, regra do degrau em porfiroclastos sigma, foliação oblíqua...

São rochas associadas a zonas de cisalhamento (no sentido de predominantemente dúcteis), que são submetidas às condições de metamorfismo durante e após a milonitização, e que dependem da taxa de deformação e da composição inicial.

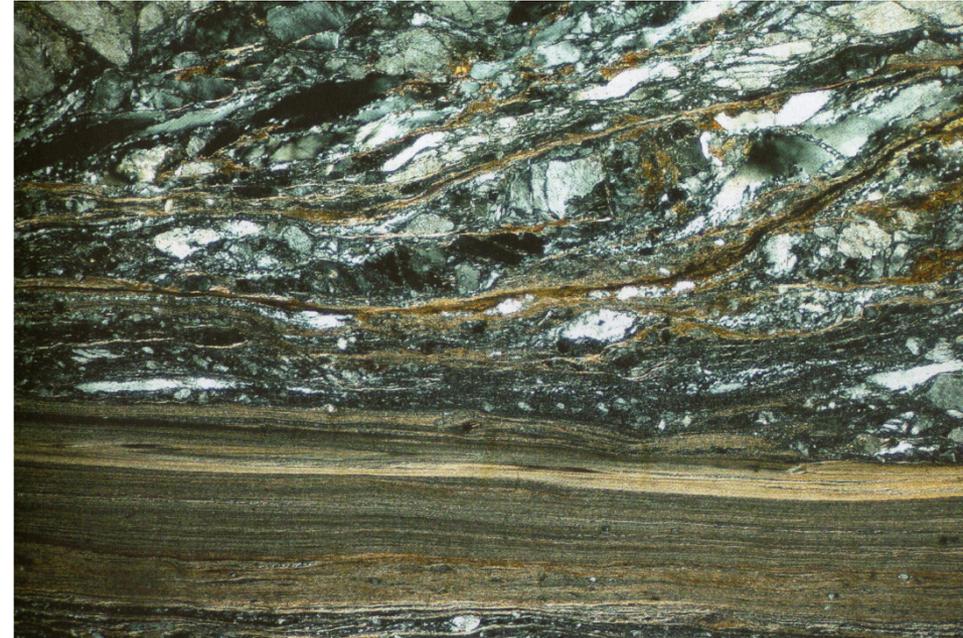
# 3. Milonitos

## 3.1 Milonitos de baixo grau

- Os milonitos de baixo grau ocorrem a temperaturas de 250°C a 500°C;
- Podem mostrar gradação a cataclasitos ou coexistirem com feições cataclásticas;
- O quartzo sofre processos cristaloplásticos (evidenciado pela extinção ondulante, bulging e rotação de subgrão com o aumento de T);
- Os feldspatos sofrem processos rúpteis, com fraturamentos. Podem apresentar extinção ondulante e deformação das geminações;
- Milonitos de baixo grau apresentam transições bruscas com proto-, milonitos e ultramilonitos;
- Milonitos de baixo grau são os que melhor preservam estruturas assimétricas;



Porfiroclasto fragmentado de feldspato, com zona de sombra de pressão e envolvido pela matriz fina e foliada



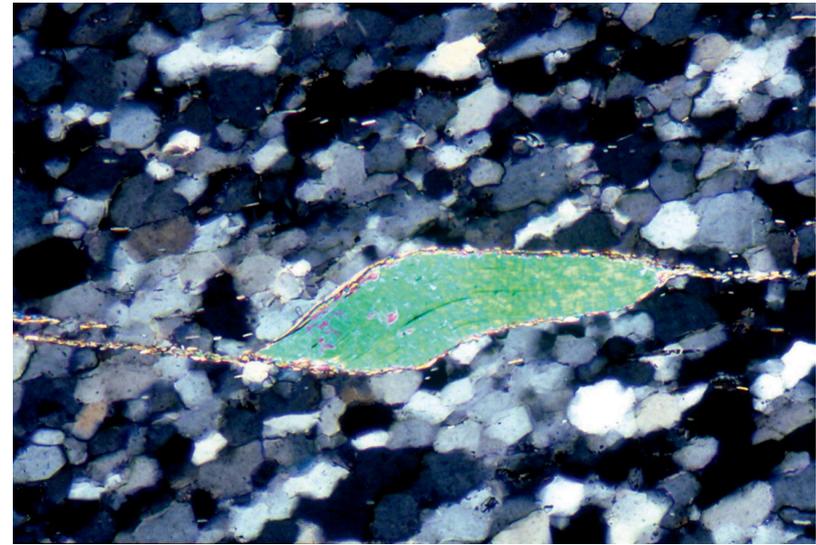
Brusca passagem entre protomilonito e ultramilonito derivados de granito. Sigmóide de foliação-rotação horária

# 3. Milonitos

## 3.1 Milonitos de baixo grau

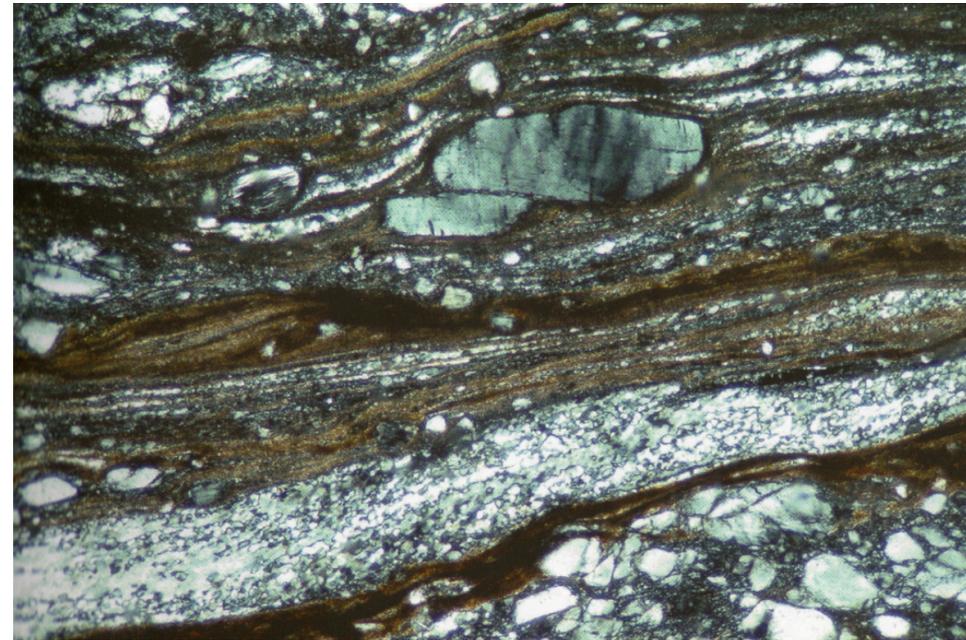
Quanto às micas:

- A biotita é reduzida a grãos muito finos na matriz;
- A muscovita tende a resistir e gerar *mica fishes*;



Fitas de quartzo com extinção ondulante e bandas de deformação cristal-plástica. Cristais de biotita da matriz estão intensamente reduzidos.

Bandas de cisalhamento (C') – rotação anti-horária.

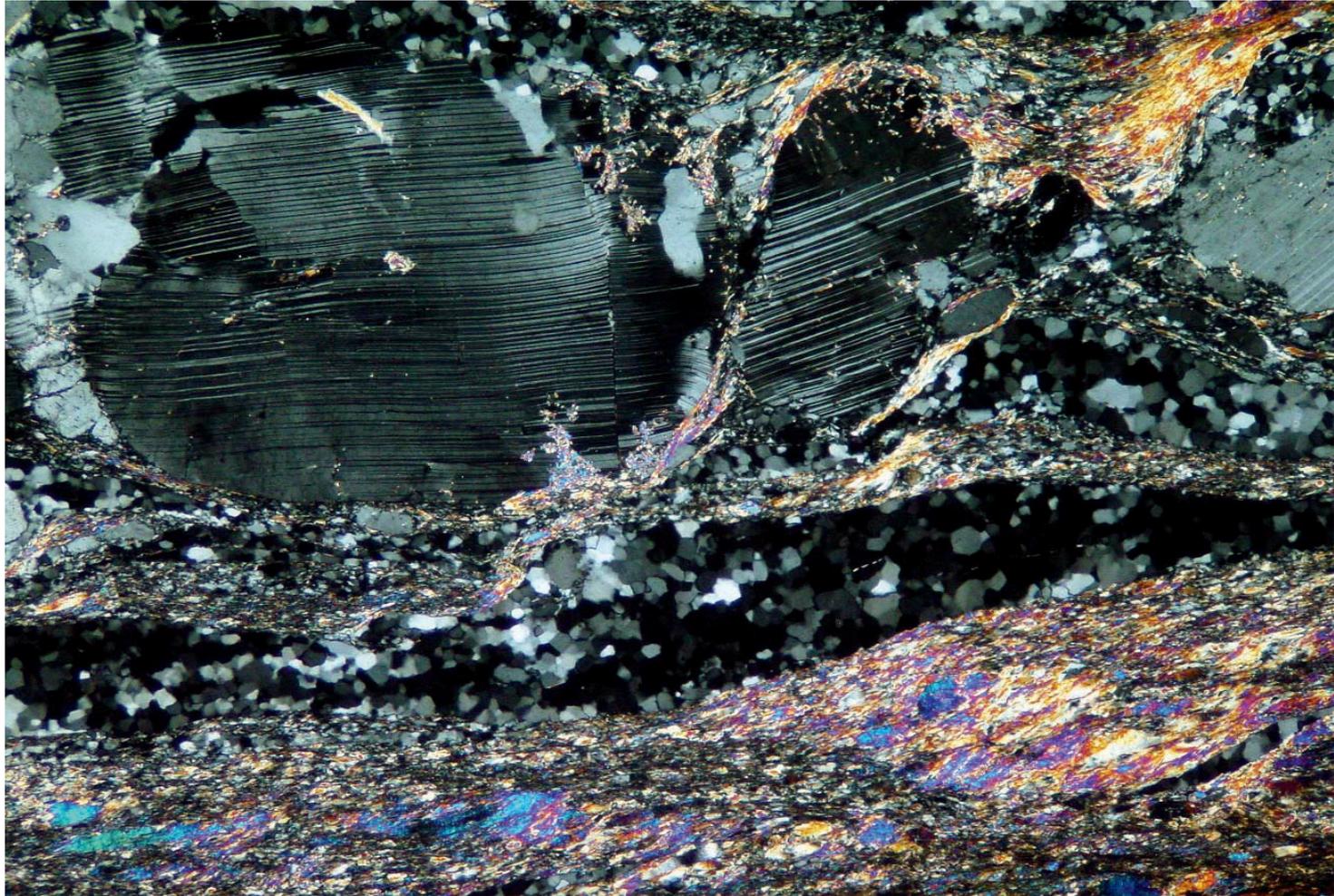


Porfiroclasto de feldspato com fraturamento sintético. Banda de quartzo finamente recrystalizada por rotação de sub-grãos e parcialmente por *bulging*. Foliação S-C.

Rotação horária.

# 3. Milonitos

## 3.1 Milonitos de baixo grau

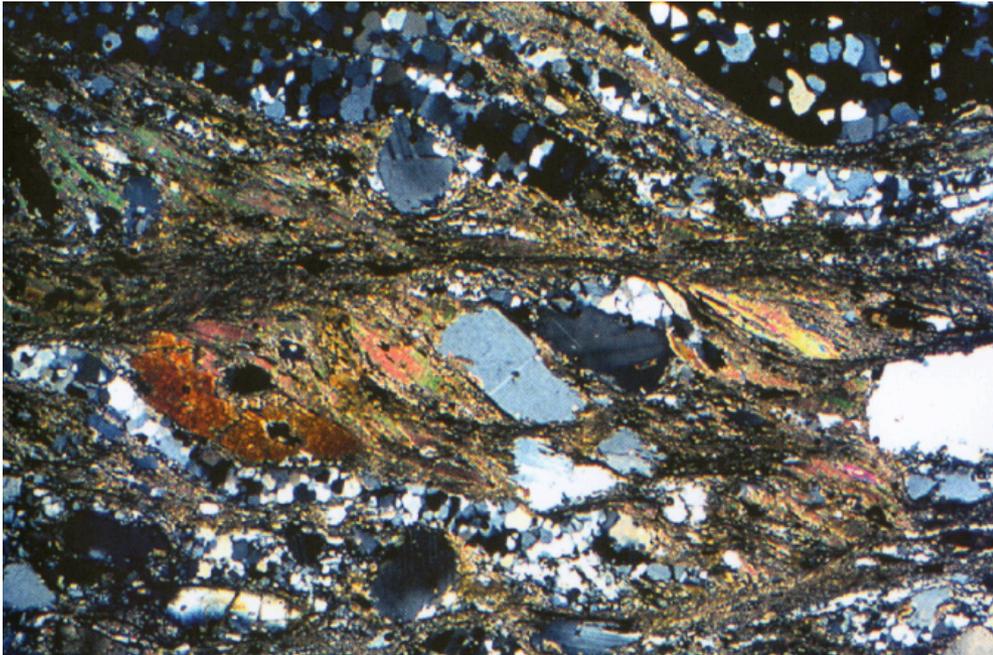


Porfiroclastos de plagioclásio mostrando extinção ondulante e geminações deformadas. O quartzo está recristalizado para um agregado granoblástico poligonizado (o crescimento por recristalização estática após a cominuição atinge no máximo 50 microns). Os minerais micáceos amoldam o profiroclasto, dão um padrão assimétrico e geram *mica fishes*.

# 3. Milonitos

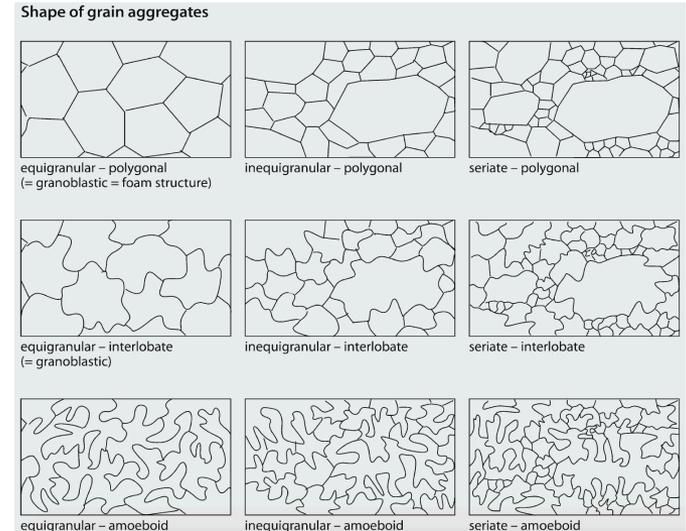
## 3.2 Milonitos de médio grau

- Os milonitos de **médio** grau ocorrem a temperaturas de 500°C a 650°C;
- O quartzo é completamente recristalizado, geralmente por rotação de subgrãos;
- O crescimento pro recristalização estática com geometria poligonal excede 50 microns;
- Os porfiroclastos de feldspato têm extinção ondulante e já não mais apresentam fraturamentos;
- Os porfiroclastos geram estruturas manteadas (bordas recristalizadas);
- As estruturas assimétricas começam a ficar mais raras.



Milonito derivado de Grt-Ky gnaiss. Quartzo bem recristalizado, granoblástico poligonal a interlobado. Porfiroclastos e vênulas de quartzo em estruturas S/C com peixes de muscovita.

Rotação anti-horária.



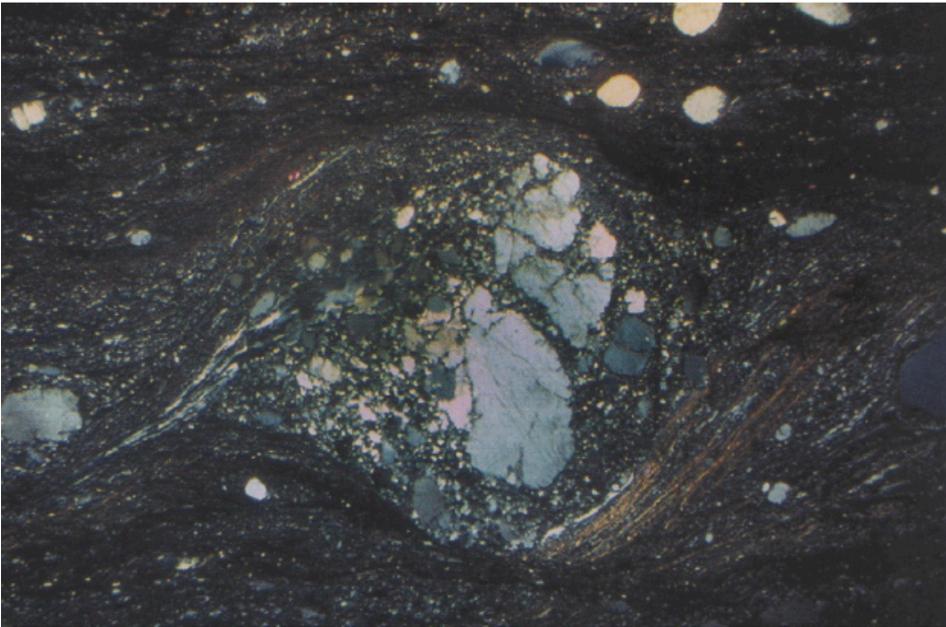
Qtz poligonal com tamanho moderado de grão!

# 3. Milonitos

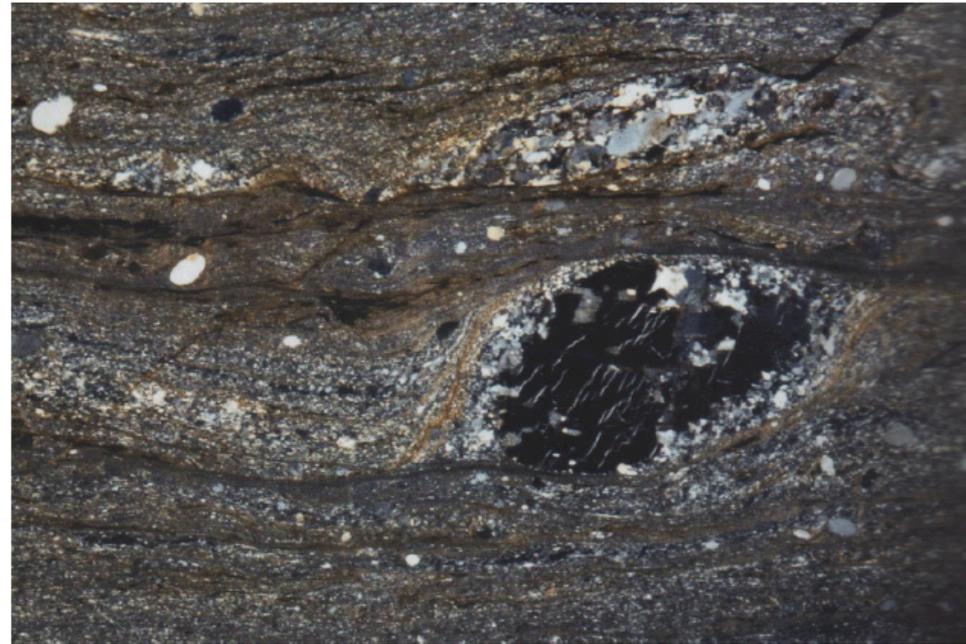
## 3.2 Milonitos de médio grau

Dextral ou sinistral?

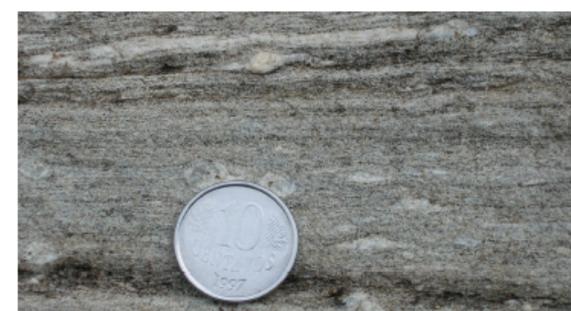
Estruturas manteadas – *core-and-mantle structures*



Porfiroclasto manteado com forma *delta* e com embainhamento horário. Manto de recristalização de K-feldspato.

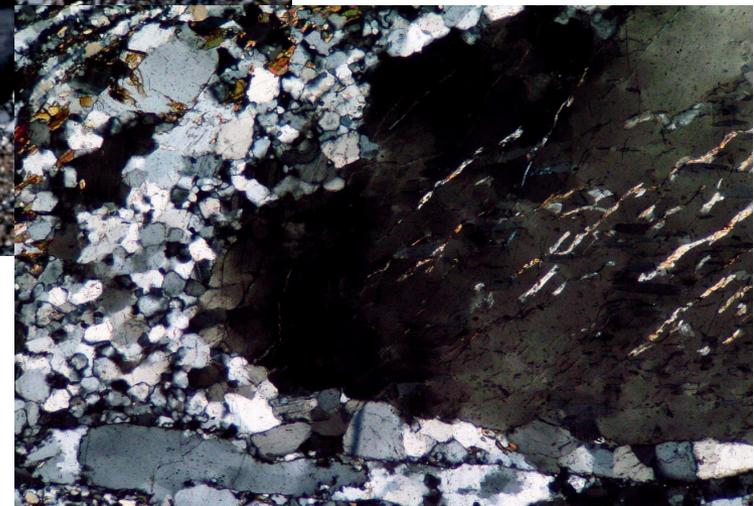


Porfiroclasto de K-feldspato manteado, com forma *sigma* e degrau para a direita (rotação horária). O manto de recristalização é mais espesso e assimétrico.



# 3. Milonitos

## 3.2 Milonitos de médio grau

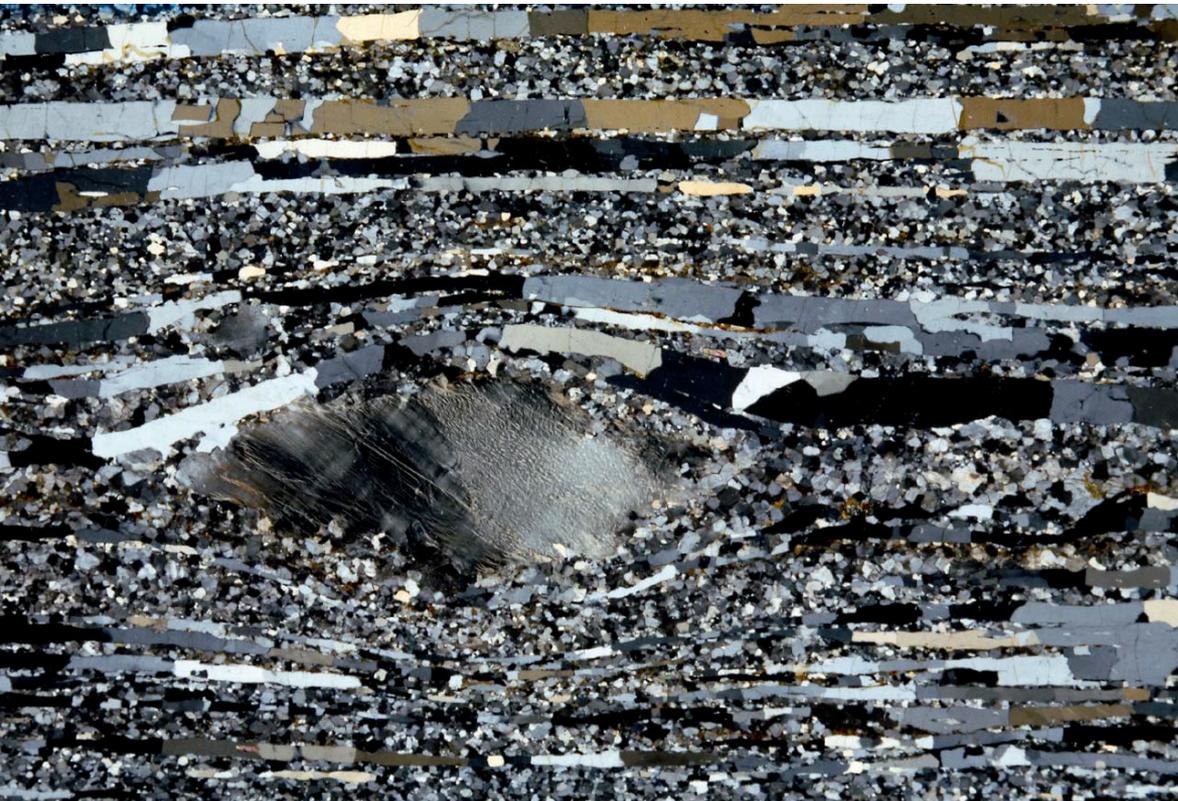


Porfiroclastos de feldspato manteados e com extinção ondulante . Geração por recristalização dinâmica e rotação de sub-grãos. Isso indica mais alta temperatura do que o quartzo!

# 3. Milonitos

## 3.3 Milonitos de alto grau

- São rochas formadas a temperaturas acima de 650°C;
- São relativamente incomuns por causa da sua pouca possibilidade de conservação;
- Devido às altas T, eles tendem a recrystalizar de forma estática (*grain boundary migration* de alta T), o que mascara todas as estruturas geradas durante a deformação dinâmica.

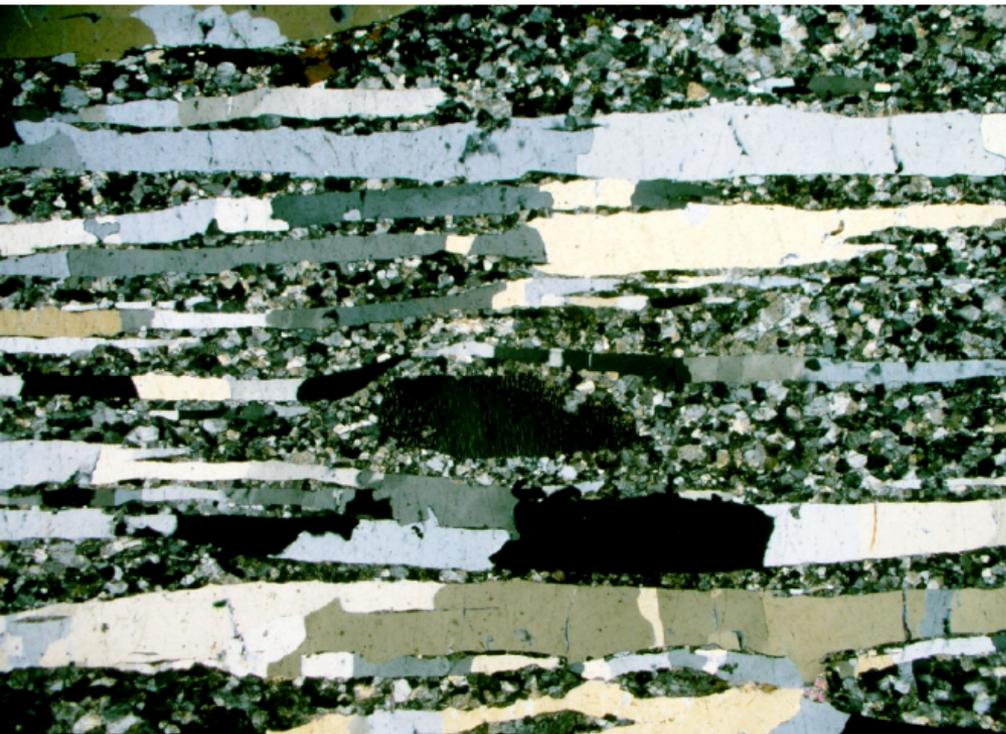


- Característico: *ribbons* de qtz. Qtz recrystalizado por GBM à grãos alongados e bordejados por feldspato recrystalizado;
- Quanto sobrevivem, os porfiroclastos de feldspato (recrystalizados) desviam um pouco a foliação de forma **simétrica**;
- Indicadores cinemáticos são muito raros.

Largura da foto 16 mm

# 3. Milonitos

## 3.3 Milonitos de alto grau



Porfiroclasto reliquear de feldspato antipertítico com extinção ondulante. Matriz de composição tonalítica, granoblástica equigranular poligonal, sem extinção ondulante.

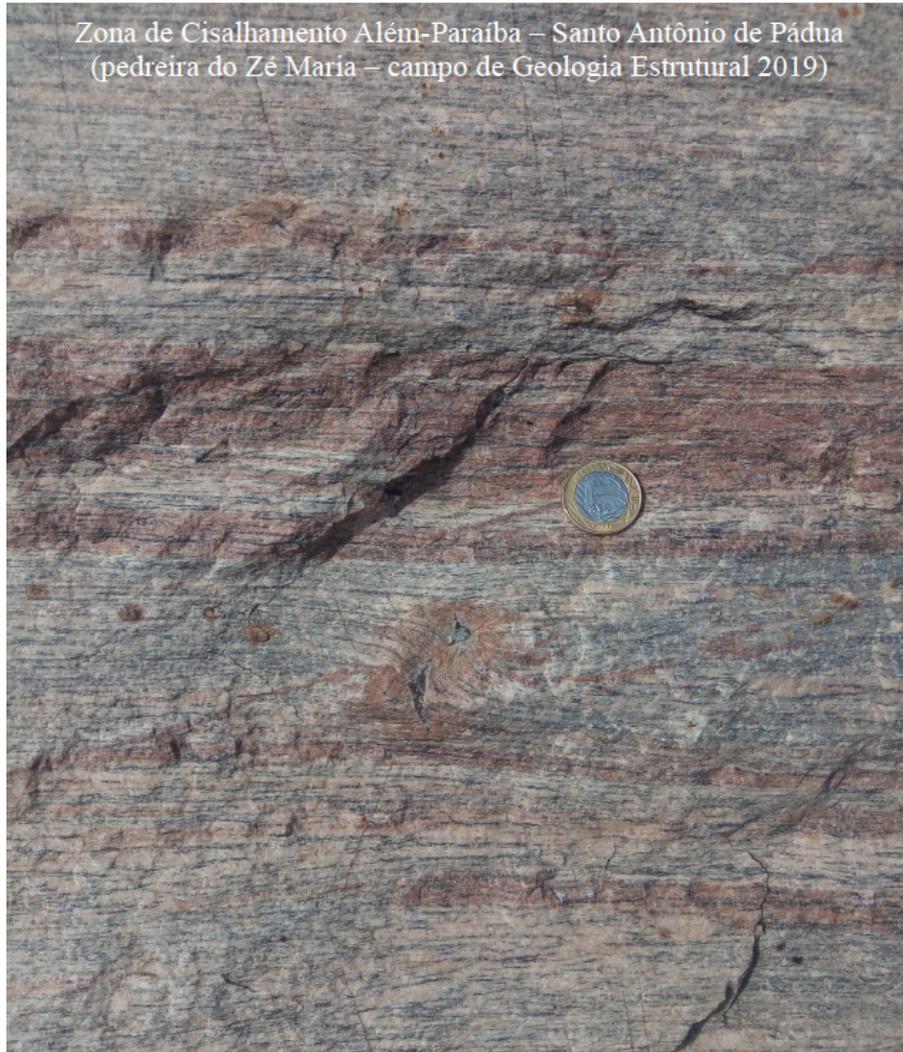
Gnaise fitado (blastomilonito)



# 3. Milonitos

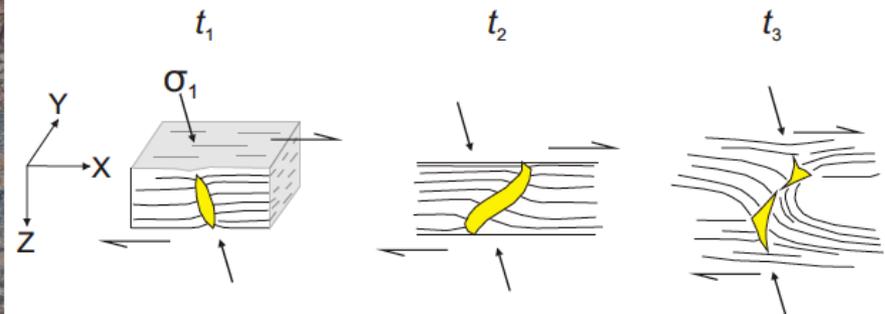
## 3.3 Milonitos de alto grau

Exemplo dos blastomilonitos da Zona de Cisalhamento Além-Paraíba (RJ) que também geraram *boudins* de foliação



### BOUDINS DE FOLIAÇÃO

Dilatação, preenchimento e rotação



# 3. Milonitos

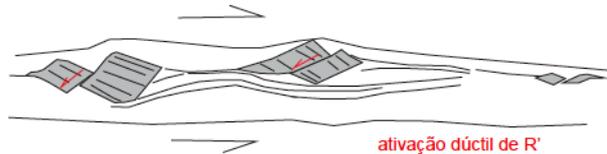
Exemplo dos milnitos de alto grau da ZC  
Rio Paraíba do Sul, RJ/MG

## 3.3 Milonitos de alto grau

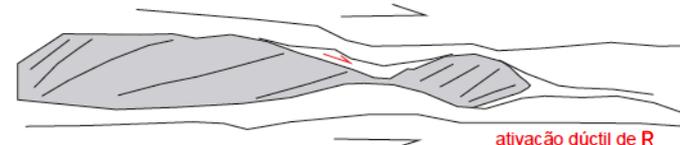
Porfiroclasto de rocha máfica fraturado. Observar porfiroclastos de feldspato menores com geometrias em sigma abaixo.



BOUDIN EM DOMINÓ

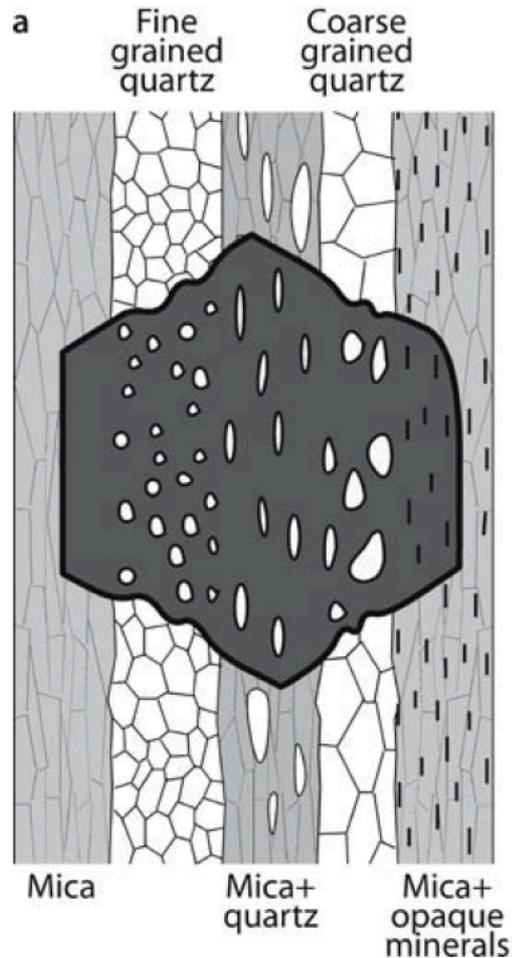


BOUDIN DE BANDA DE CISALHAMENTO



## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

Os porfiroBLASTOS são cristais relativamente grandes formados por blastese (reações metaórficas) contidos em uma matriz mais fina, a qual, geralmente, apresenta uma foliação.



Além de trazerem importantes informações sobre o metamorfismo, os porfiroblastos também podem trazer importantes informações **cinemáticas**, especialmente devido ao fato de desenvolverem uma **foliação interna** ao porfiroblasto (Si).

Na figura ao lado, o porfiroblasto cresceu e mimetizou a orientação preferencial dos minerais orientados previamente, gerando as inclusões.

Deformação posterior pode afetar a matriz, mas não vai afetar o padrão de inclusões.

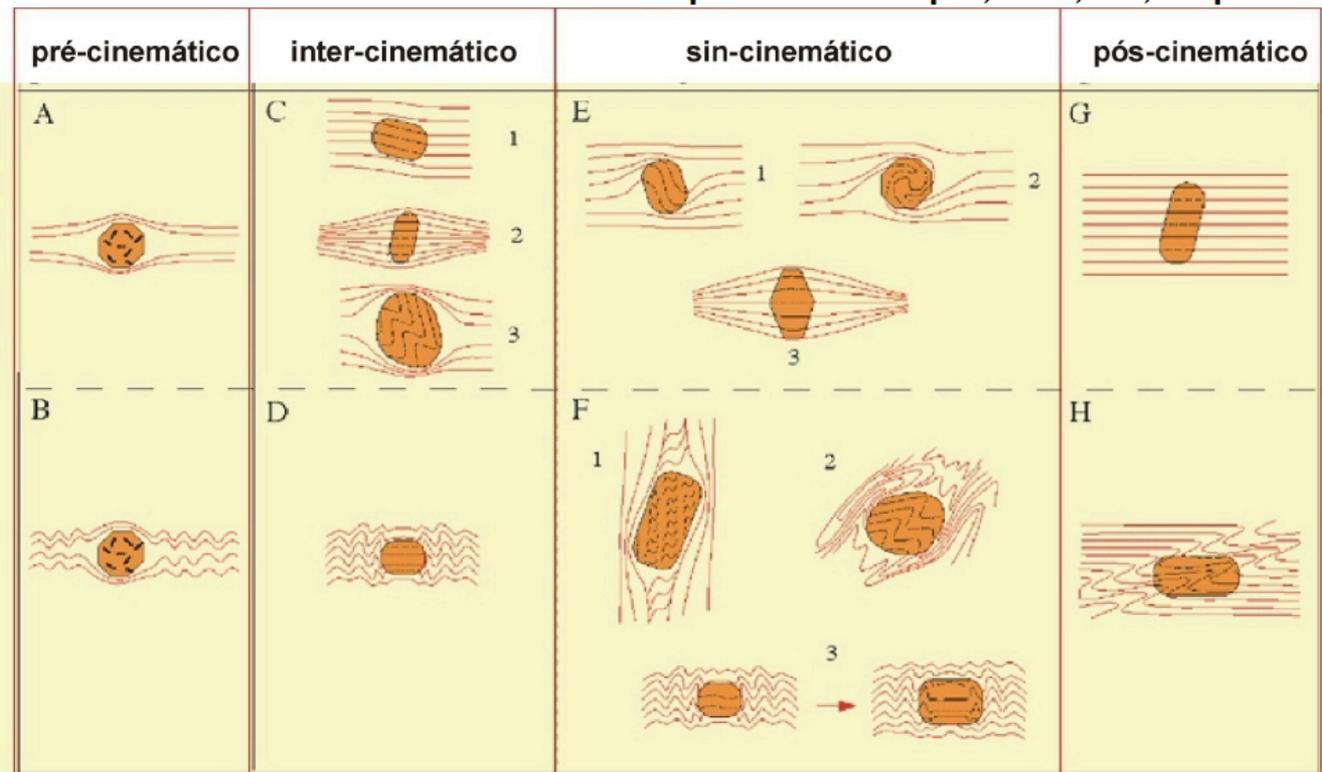
O padrão de inclusões pode ser rotacionado, mas vai gravar a estrutura da rocha à época de geração do profiroblasto.

# 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

## 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



Deformação sem dobramento da foliação externa

Deformação com dobramento da foliação externa

Deflexão da Se ao redor do porfiroblasto  
Presença de zonas de sombra de pressão

Inclusões erráticas

Inclusões com fábrica de foma (Si)

Si descontínua com a Se

Si contínua com a Se

Sem deflexão da Se e sem zona de sombra de pressão

# 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

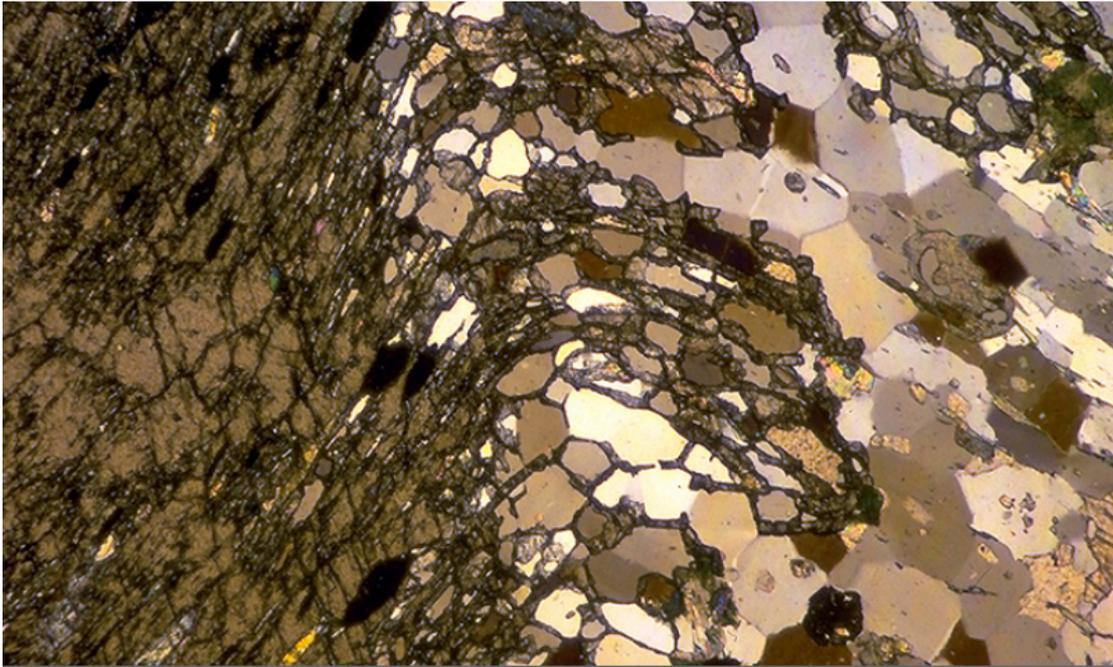
## RELAÇÕES PORFIROBLASTO-MATRIZ

**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

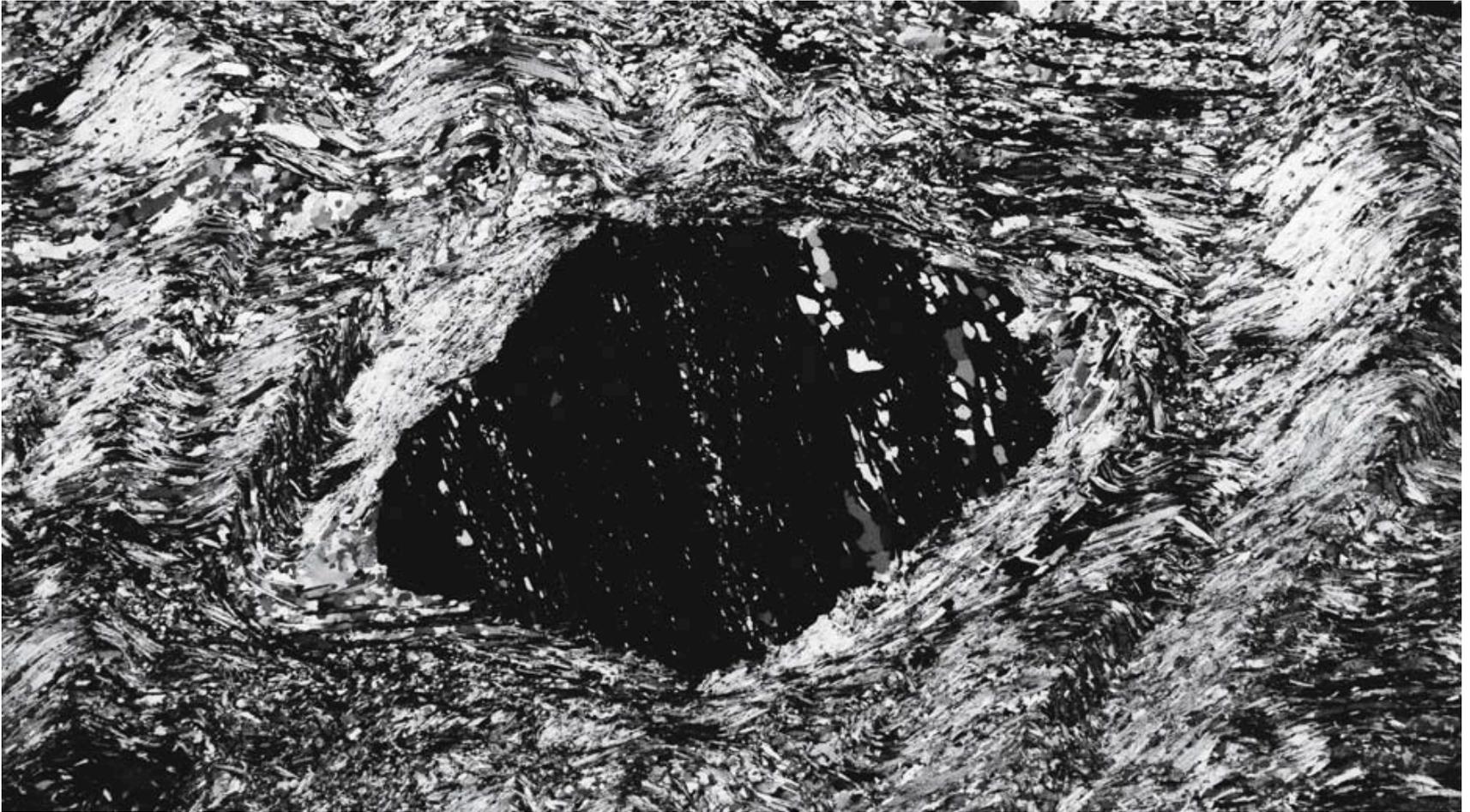


Porfiroblasto de granada com borda esquelética e foliação externa contínua com a foliação interna – **porfiroblasto sin-cinâmático**

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).

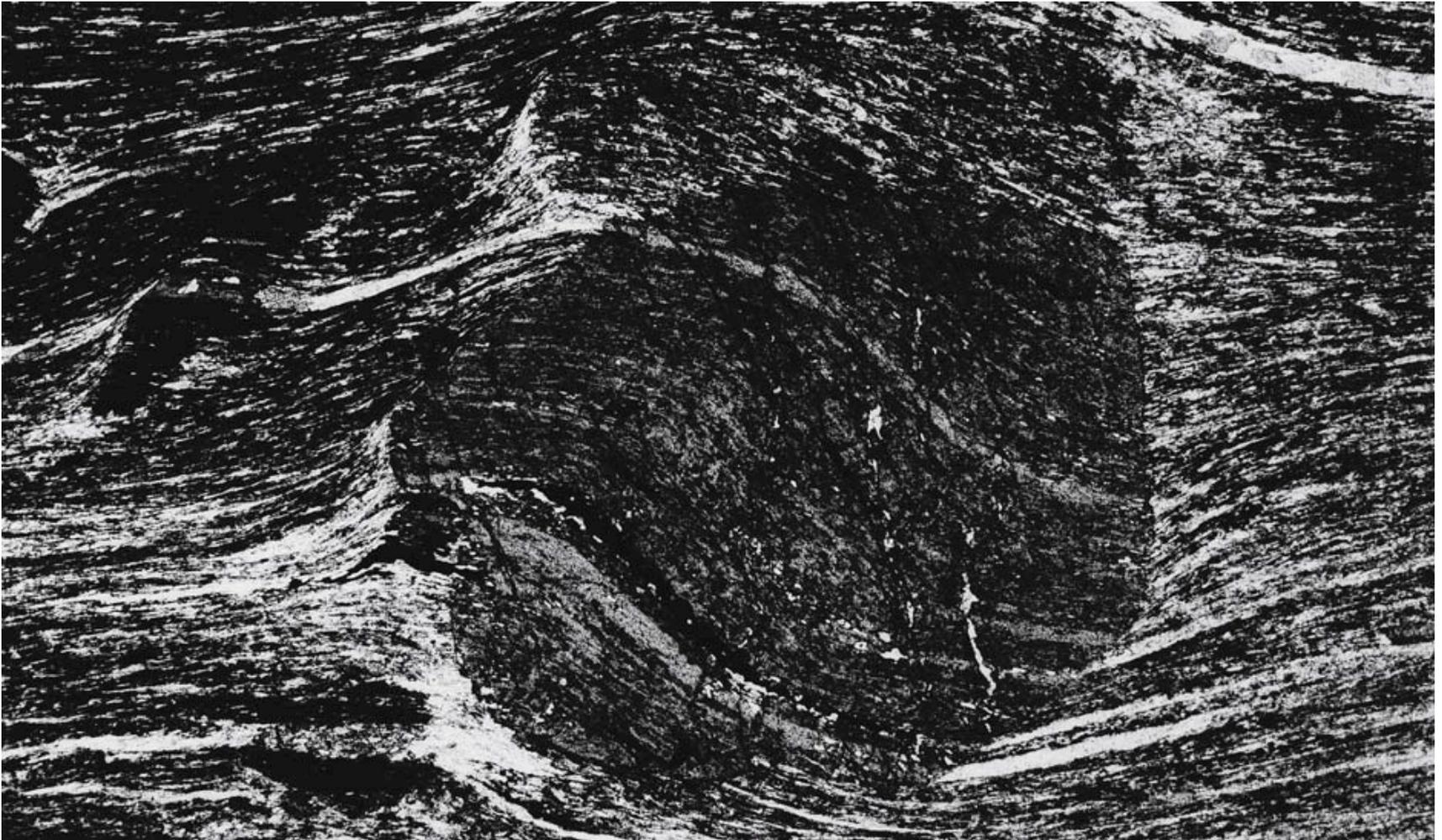
A borda esquelética de Grt e intersticial aos grãos de quartzo poligonizados, restringem o crescimento do quartzo. Evidenciam o crescimento da borda granada sincrônica à recristalização do quartzo.

## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos



**Fig. 7.13.** Intertectonic garnet porphyroblast in garnet-mica schist. The garnet may be classified as intertectonic since it overgrew a straight secondary fabric ( $S_i = S_n$ ) that has been deformed in the matrix by later deformation resulting in crenulation and relative rotation of about  $90^\circ$  of the garnet with respect to  $S_n$ . Since the continuity between  $S_i$  and  $S_e$  is almost completely destroyed by post-garnet deformation and grain growth in the matrix, an alternative explanation, considering  $S_i$  and  $S_n$  in the matrix as generated by entirely different phases, is also possible. Example of case d in Fig. 7.9. Tärnaby, Norrbotten, Sweden. Width of view 20 mm. Polars at  $45^\circ$

## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

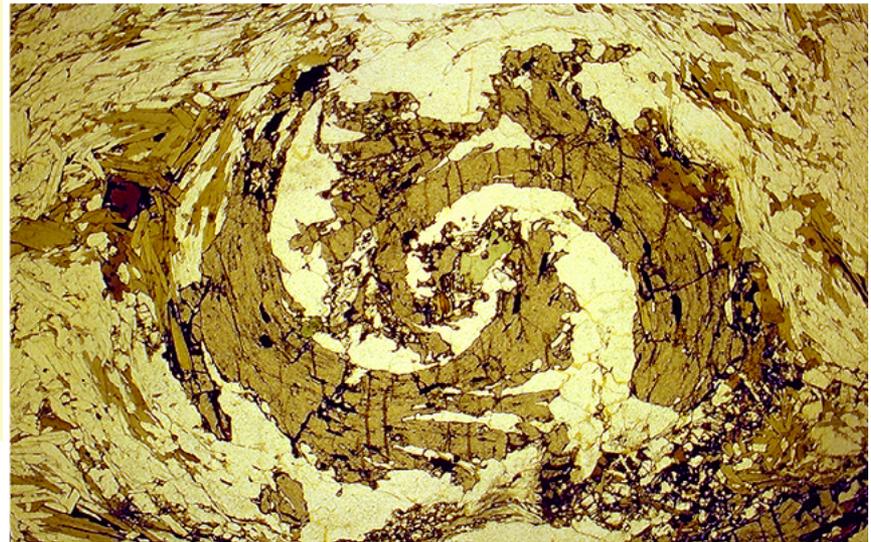
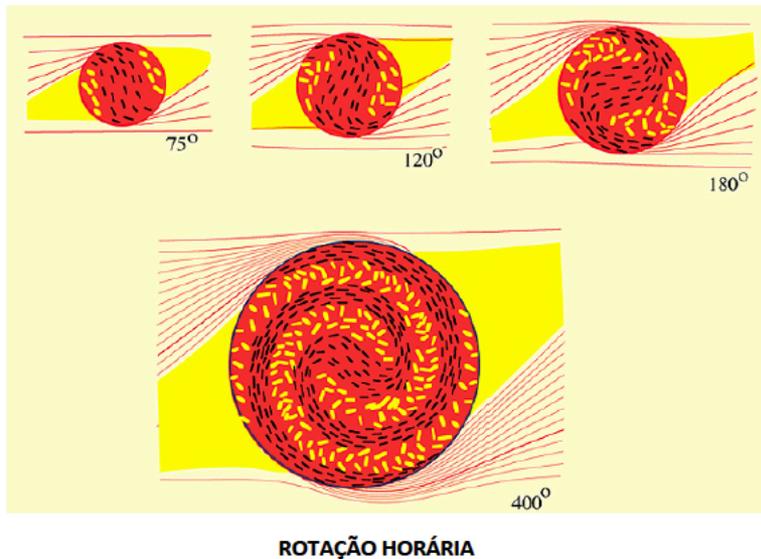


**Fig. 7.15.** Syntectonic garnet porphyroblast in garnet-kyanite schist showing about 45° of dextral rotation with respect to  $S_e$  during growth. Note the continuity between  $S_i$  and  $S_e$ , marked by opaque-poor bands that are continuous inside and outside the crystal.  $S_e$  is deflected around the porphyroblast and a poorly developed strain shadow is visible at its *lower left-hand side*. A late syntectonic porphyroblast of kyanite occurs at the *upper left side* of the garnet where it overgrew a strain cap. Example of case e1 in Fig. 7.9. Leiden Collection. Width of view 17 mm. PPL

# 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos

## 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  $180^\circ$  - **microestruturas tipo snowball** – aparentemente restringem-se a formas circulares - granadas .

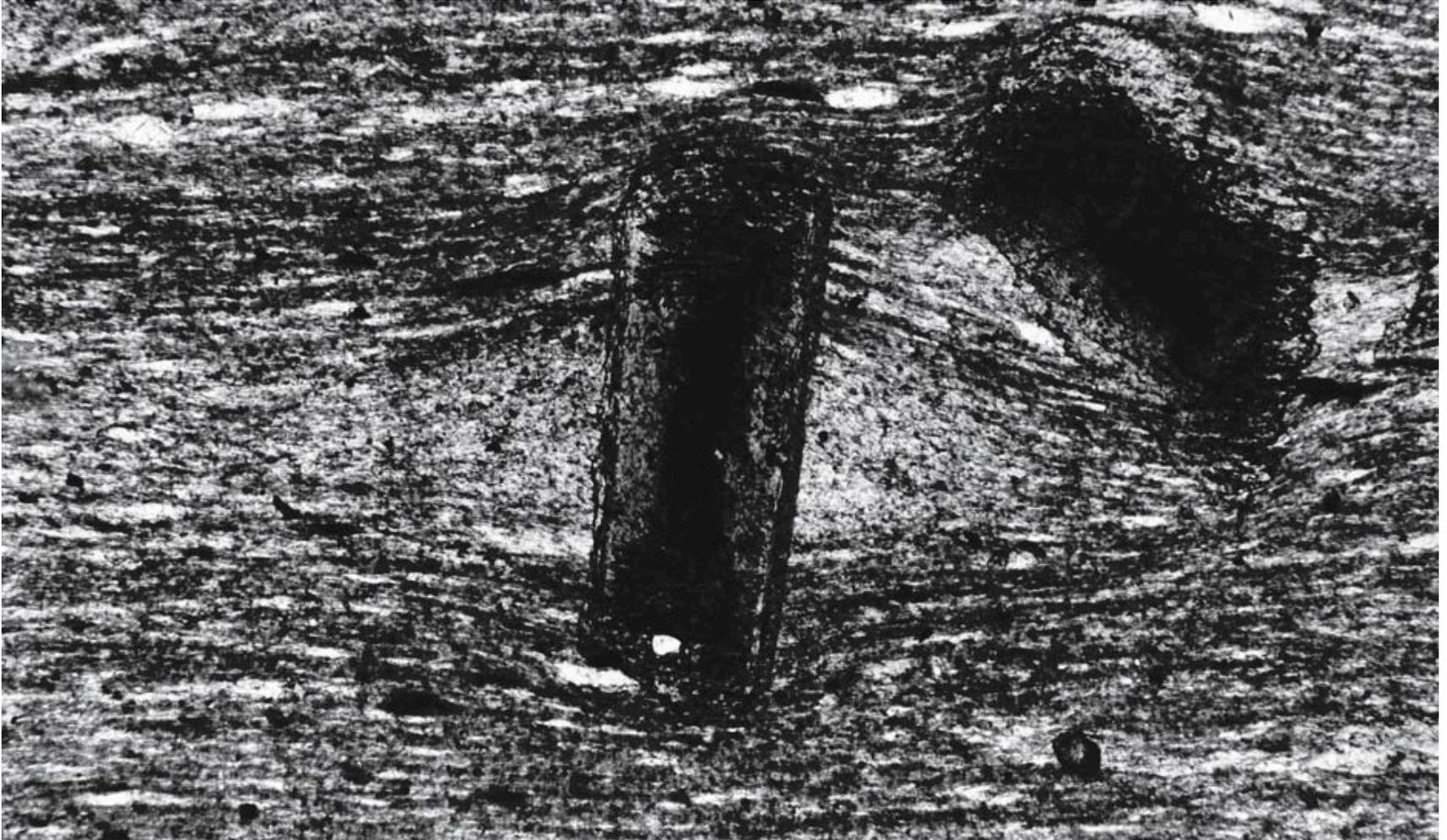


Passchier & Trouw/Microtectonics (1996)

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:

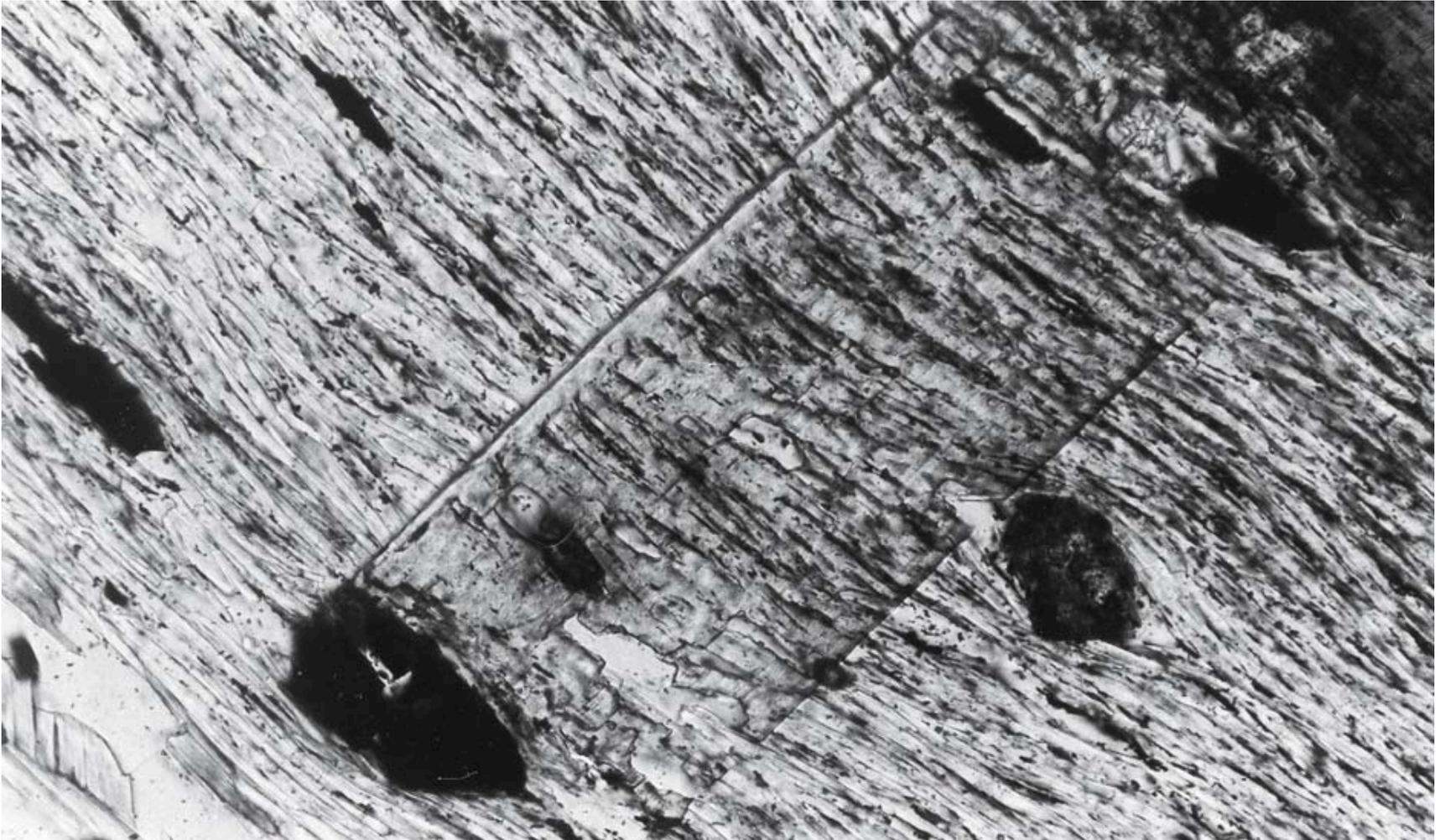
- i- o sentido de rotação é confirmado por outro indicador cinemático;
- ii- as amplitudes das espirais de Si são cada vez menores em direção a borda do cristal;
- iii- as dobras de Si possuem plano-axial fortemente encurvado;
- iv- espirais de Si podem resultar de inclusões da zona de sombra de pressão;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

## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos



**Fig. 7.17.** Syntectonic chloritoid crystals (ottrelite variety) in slate. The central part of the main crystal does not contain any  $S_1$ , and the strain shadows next to this part seem to be free of cleavage, suggesting that the core of the crystal may be pre-tectonic. Only one phase of deformation can be recognised. Example of case e3 in Fig. 7.9. Curaglia, Switzerland. Width of view 1.8 mm. PPL

## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos



**Fig. 7.20.** Post-tectonic chlorite crystal overgrowing a slaty cleavage. The cleavage structure is perfectly continuous without any deflection or development of strain shadows. Older strain shadows around opaque grains are included without modification. Example of case g in Fig. 7.9. Araí, Goiás, Brazil. Width of view 0.6 mm. PPL

## 4. Porfiroclastos vs. Porfiroblastos



**Fig. 7.21.** Post-tectonic biotite porphyroblasts overgrowing a vertical crenulation cleavage ( $S_2$ ). Although no inclusion patterns have developed, the lack of deflection of  $S_2$  and the lack of strain shadows show that the biotite crystals grew after the crenulation cleavage development. The opaque crystals at *left* are probably of the same age. However, very late syntectonic growth is also possible, as discussed in the text. Example of cases c2 and d in Fig. 7.26. Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. Width of view 1.8 mm. PPL. (Thin section courtesy Hanna Jordt-Evangelista)

# Referências principais utilizadas nessa aula

