

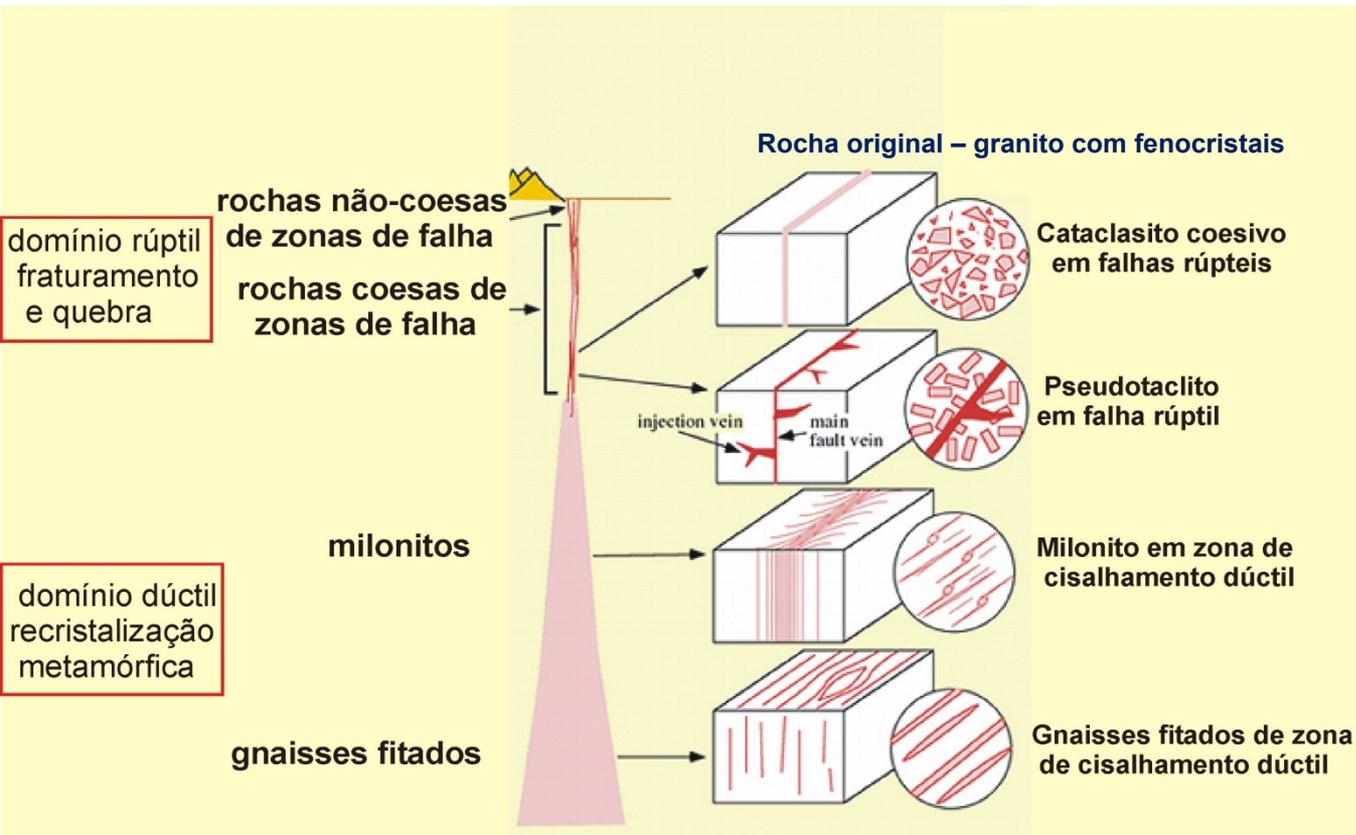
ZONAS DE CISALHAMENTO 2 – MILONITOS
abordagem microtectônica

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO

Zonas de cisalhamento são faixas de intenso *strain* que acomodam deslocamentos entre volumes adjacentes de rochas.

Os **cataclasitos** e os **milonitos** são rochas produzidas pela concentração da deformação, ao longo de **zonas de cisalhamento**.

A natureza da deformação varia com a profundidade, com o gradiente térmico, com o tipo de rocha, etc.



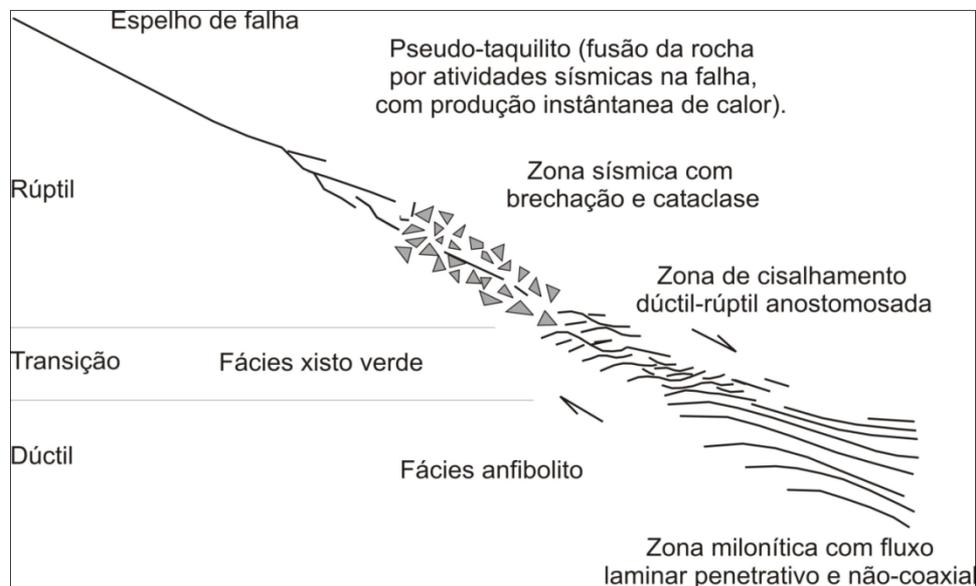
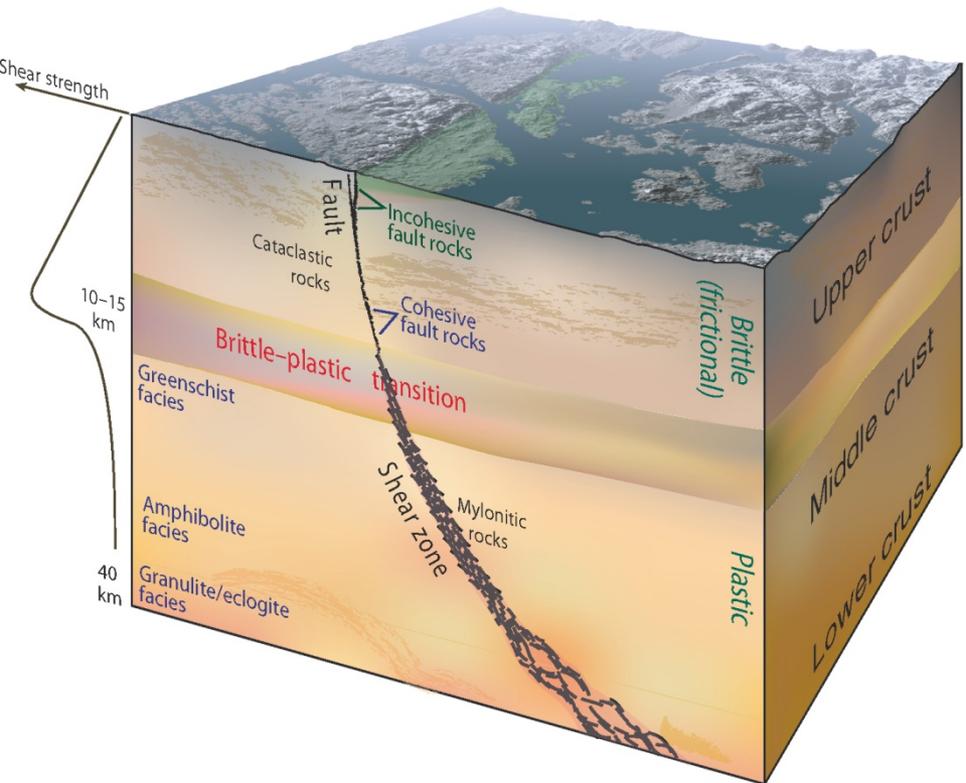
Falhas são zonas de cisalhamento nas quais a deformação é exclusivamente frágil. Rochas moídas de zonas frágeis de cisalhamento são cataclasitos e brechas de falha, coesivas ou não-coesivas.

Milonitos são rochas metamórficas fortemente deformadas de zonas de cisalhamento dúctil que se encontram bordejadas por rochas de menor deformação.

A determinação do sentido de movimento, nas zonas de cisalhamento, é de importância crucial para reconstruir a evolução geológica de uma região.

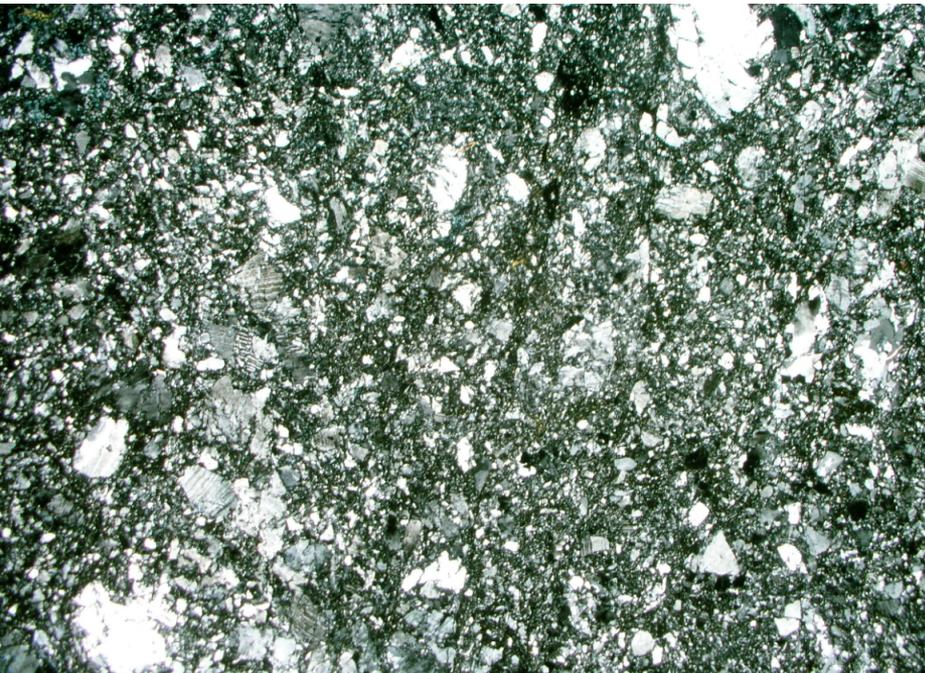
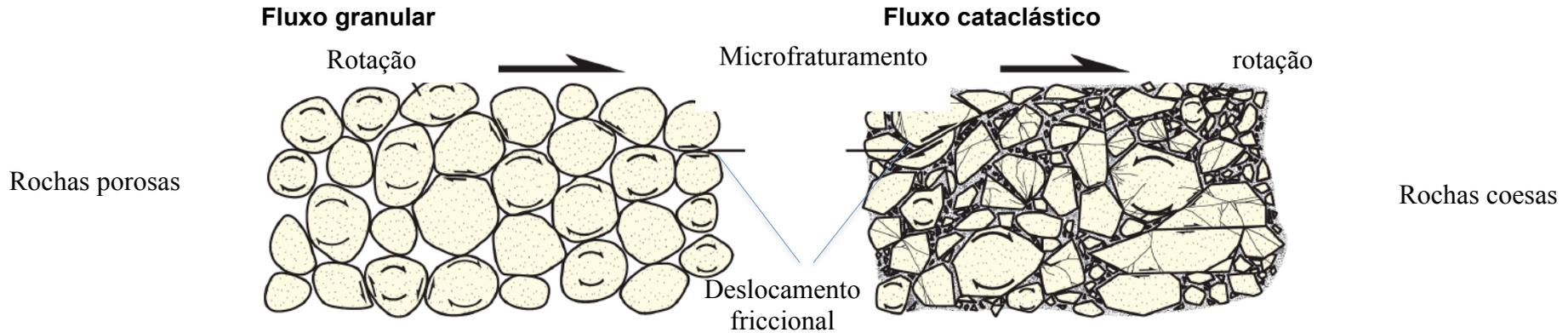
ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO

Zonas de cisalhamento e profundidade na crosta



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS FRÁGEIS DE CISALHAMENTO

Cataclasitos são rochas coesas e não foliadas, produzidas em zonas de falha, que resultam de fraturamento frágil, dissolução por pressão e deslizamento nos limites de grãos. São compostas por fragmentos angulosos em uma matriz de quartzo, óxido de ferro, calcita, clorita, ou outras fases minerais passíveis de precipitarem a partir de um fluido. Desenvolvem-se em profundidades rasas da crosta, abaixo de 10 km e sob temperaturas que não excedem 300°C. A presença ou ausência de fluidos e a intensidade da deformação (ou taxa de *strain*) são fatores dominantes na formação de cataclasitos.



As estruturas cataclásticas são maciças e coesas, no geral cimentadas por processos de silicificação, carbonatação, epidotização, ou cloritização, controladas pela composição da rocha e de fluidos

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS FRÁGEIS DE CISALHAMENTO

PSEUDOTAQUILITOS

Pseudotaquilitos são rochas coesivas de falhas, com matriz vítrea, afanítica, ou de granulação muito fina, que envolve (como xenólitos) fragmentos da rocha hospedeira, micas ausentes. Ocorrem em veios retilíneos, dos quais vênulas de injeção são frequentes. A transição entre os veios de pseudotaquilito e a rocha hospedeira é brusca.

Pseudotaquilitos são admitidos como produtos da fusão de cataclasitos de granulação fina, devido a intensa fricção entre as superfícies de falha. A liberação da energia elástica produzida pelos tensores de cisalhamento em níveis de crosta rasa, pode produzir um rápido deslocamento da falha com intensa produção local de calor e de ondas sísmicas com terremotos e gerar, instantaneamente, uma fusão na zona de fricção.

Pseudotaquilitos são fósseis de terremotos

Esse calor é restrito a estreita zona de falha e rapidamente dissipado com a paralização do movimento. O resfriamento instantâneo e a solidificação resultam no material vítreo a afanítico, ou de granulação extremamente fina.

Veio de pseudotaquilito com embainhamento e estrutura de fluxo em xisto crenulado (Trouw et al., 2010).

Transição brusca da faixa de intensa deformação para a rocha não deformada pela falha

Veio de pseudotaquilito com veio (apófises) de injeção em granito cataclástico. Estrutura de fluxo para a direita (Trouw et al., 2010)



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTEIS

Milonitos são rochas intensamente deformadas de zonas de cisalhamento dúctil

É a intensidade da deformação, visível na microestrutura, que classifica a rocha como milonito. São rochas com porfiroclastos em uma matriz fina derivada da redução da granulação por processos de recristalização.

Milonito refere-se a rochas com (micro)estruturas específicas:

- 1- presença de intensa fábrica S/L, sendo L uma lineação mineral, ou de estiramento mineral;
- 2- presença de uma matriz de granulação fina com porfiroclastos. As fases minerais (Qtz, Chl, Bt, Ms) presentes na matriz, estão intensamente deformados sob baixas temperaturas, ou recristalizados em altas temperaturas. Fels, Hbl, Px tendem a formar porfiroclastos, com evidências de deformação cristal-plástica, como extinção ondulante e recristalização manteada parcial e assimétrica;
- 3- presença de (micro)estruturas assimétricas, tais como fábrica S/C, bandas de cisalhamento C', peixes minerais, porfiroclastos rotacionados, foliação oblíqua, assimetrias em degrau,

A formação de milonitos é controlada pela intensidade ou taxa de deformação, pelas condições metamórficas durante e após o processo de milonitização (temperatura, pressão confinada e presença e composição de fluídos) e pela composição mineralógica da rocha original.

Milonitos foram classificados com base na porcentagem da matriz em relação aos porfiroclastos [Sibson-J Geol Soc Lon 133(1977)191-213]: **protomilonitos** 10 a 50% de matrix; **milonitos** 50 a 90% de matrix; **ultramilonitos** >90% de matrix.

O problema desta classificação está no estabelecimento arbitrário do volume original matriz/megacrystal; ou da deformação de rochas originalmente de granulação fina, ou monominerálicas. Assim, um ultramilonito pode não representar uma maior deformação que um milonito ou que um protomilonito.

Blastomilonito é um milonito com significativa recristalização estática e **filonito** é um milonito de granulação muito fina, ou rico em minerais micáceos.

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E DEFORMAÇÃO CONTÍNUA



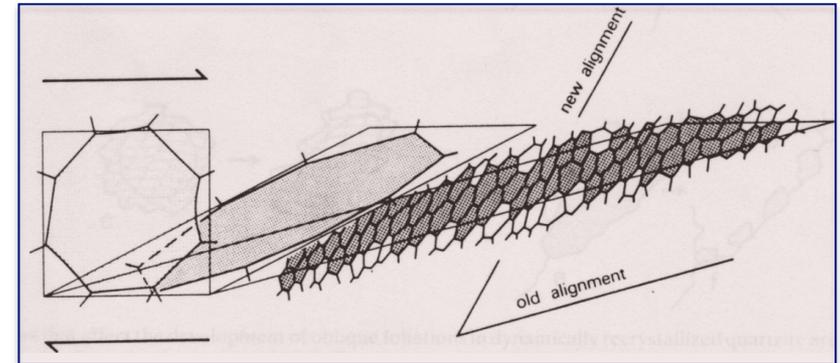
Quartzo milonito com textura conferida pela fábrica de forma e orientação ótica preferencial dos cristais granoblásticos de quartzo, ocorre como fragmento triangular em uma microbrecha cataclástica. (amostra AGT7-33)

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

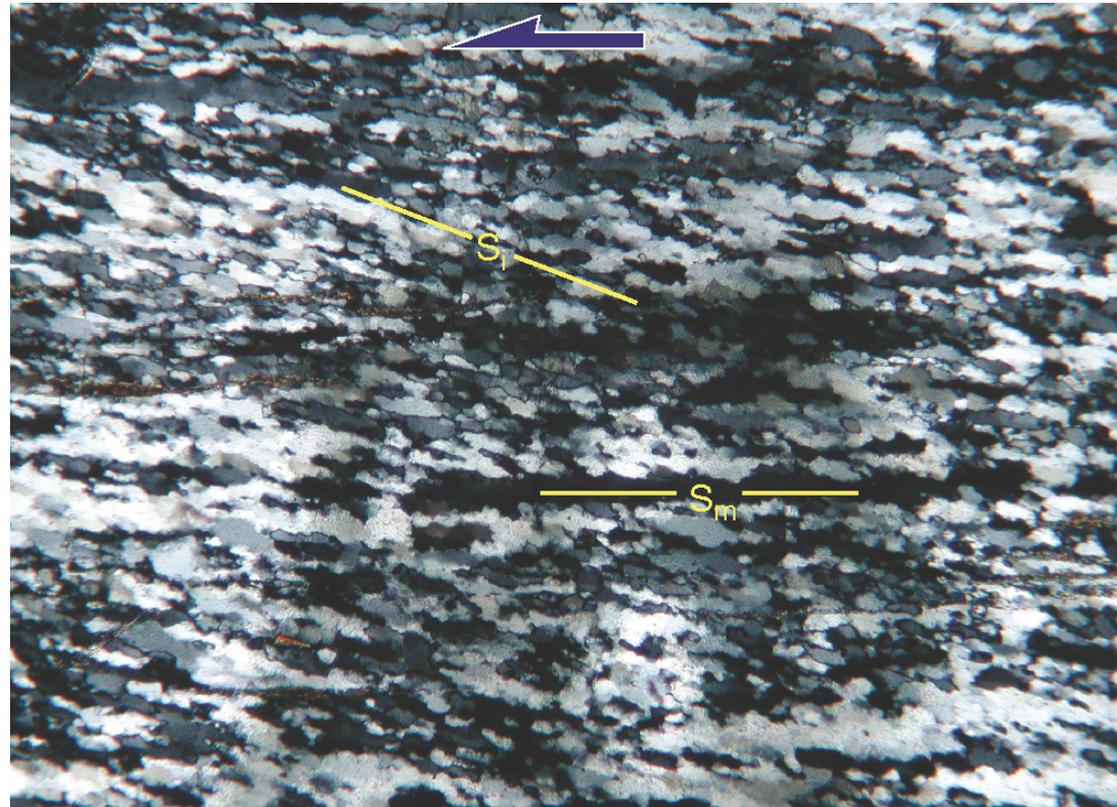
MECANISMOS DO DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO

Sequência de deformação e recristalização interna do grão (processo de recristalização por rotação de subgrãos).

Novos sub-grãos, alongados com o avanço da deformação, definem uma nova foliação oblíqua.



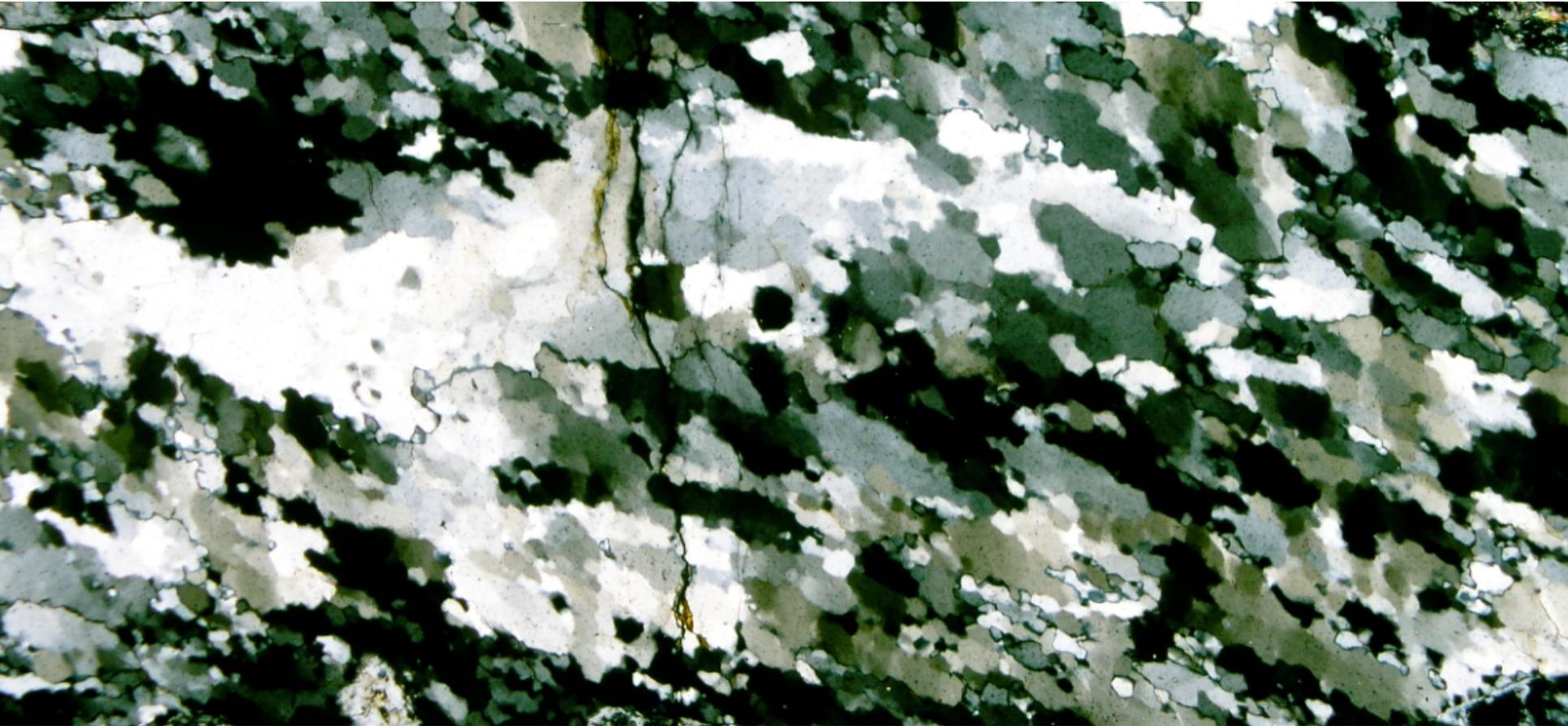
A relíquia da forma alongada do grão antigo pode ser reconhecida no envelope dos novos grãos de mesma orientação ótica.



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MECANISMOS DO DESENVOLVIMENTO DA FOLIAÇÃO

Fábricas de forma Orientação preferencial de forma por domínios

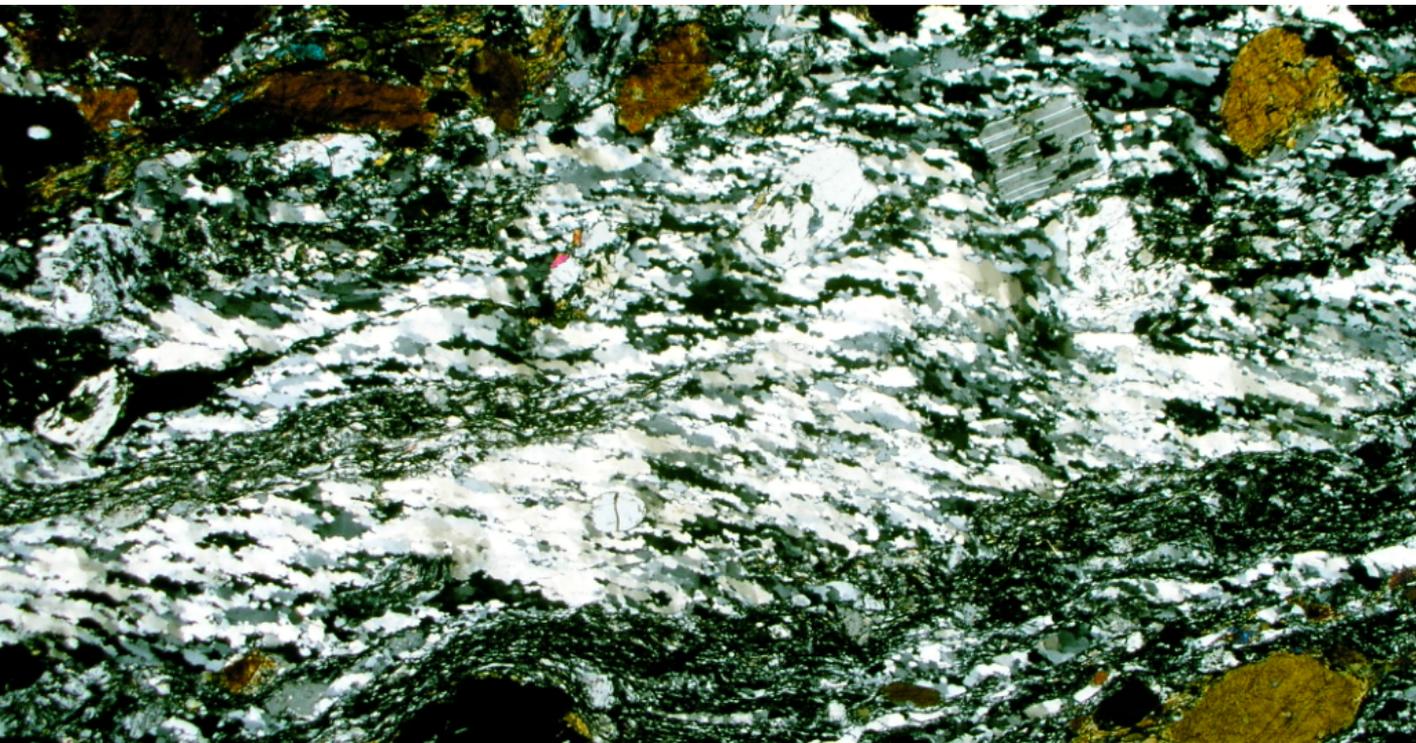


Orientação ótica dos cristais de quartzo na foliação precedente e processo de recristalização por rotação de subgrãos ($T \sim 400-500^{\circ}\text{C}$), com orientação ótica e de forma dos novos cristais de quartzo.

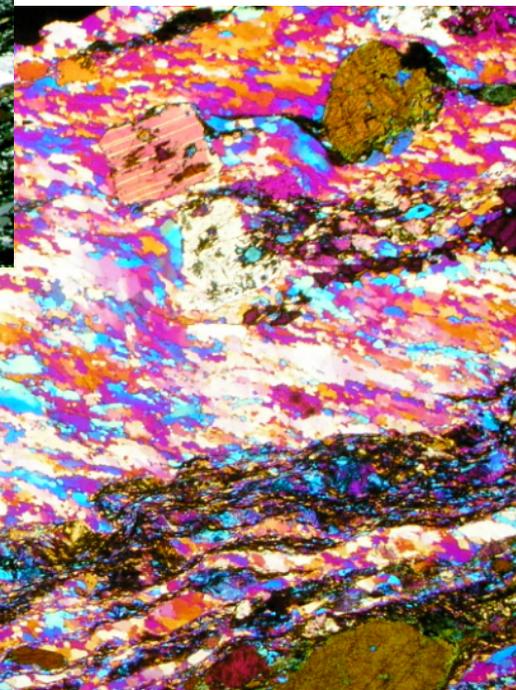
ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – FOLIAÇÕES S-C

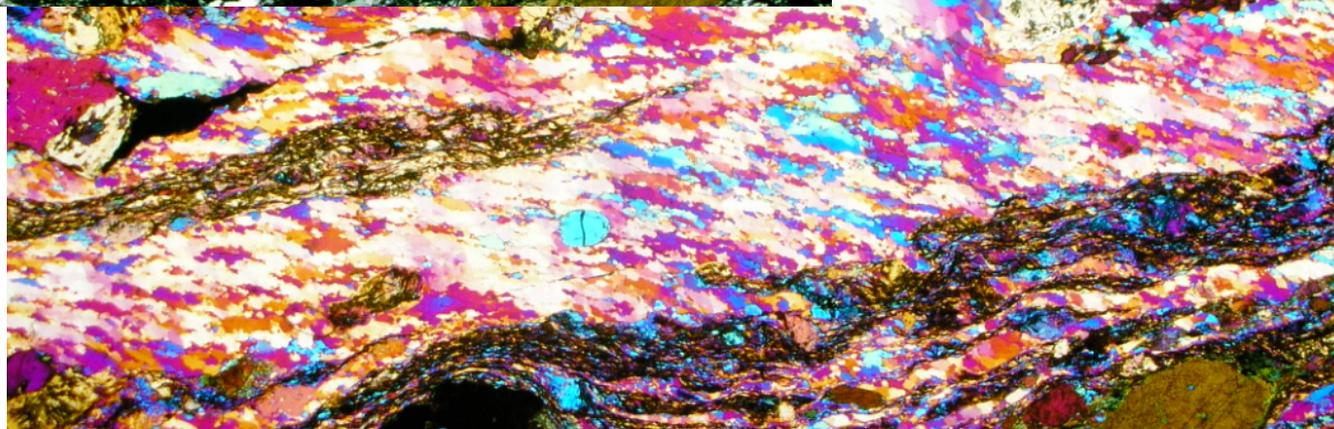
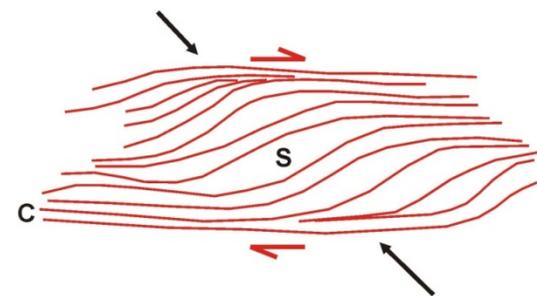
Recristalização dinâmica do quartzo em textura granoblástica interlobada a amebóide, inequigranular a seriada e com alinhamento de forma de grãos, orientação preferencial de agregados de grãos e com orientação óptica preferencial dos grãos.



Notar as diferenças na granulação e arranjo textural do quartzo quando em S e quando nos planos descontínuos de fluxo-C, com granulação fina e recristalização de biotita.



1- cisalhamento simples

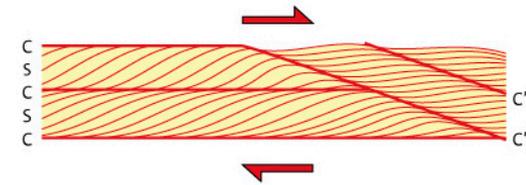
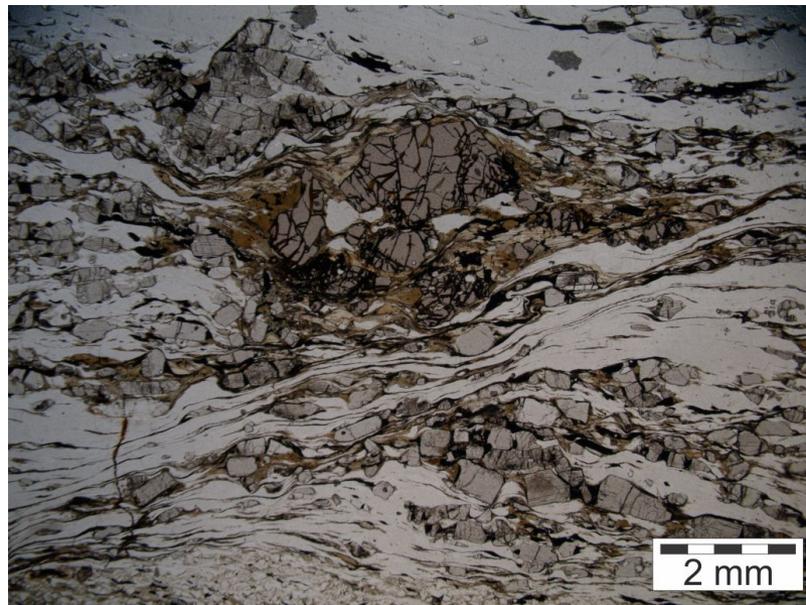
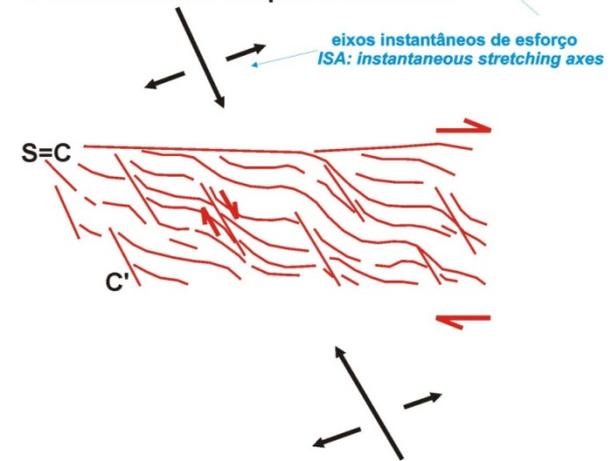


ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – BANDAS EXTENSIONAIS



2- cisalhamento simples e extensão



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – BANDAS EXTENSIONAIS

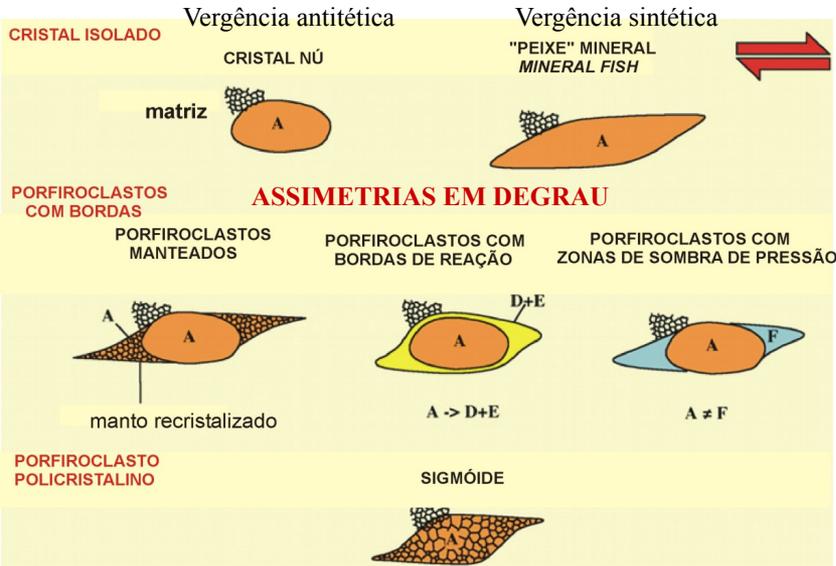
Banda extensional de cisalhamento sin-metamórfica e pós dobramento. As microdobras são contemporâneas a um empilhamento de antiformes e dobras passivas com deslocamento em sentido contrário.



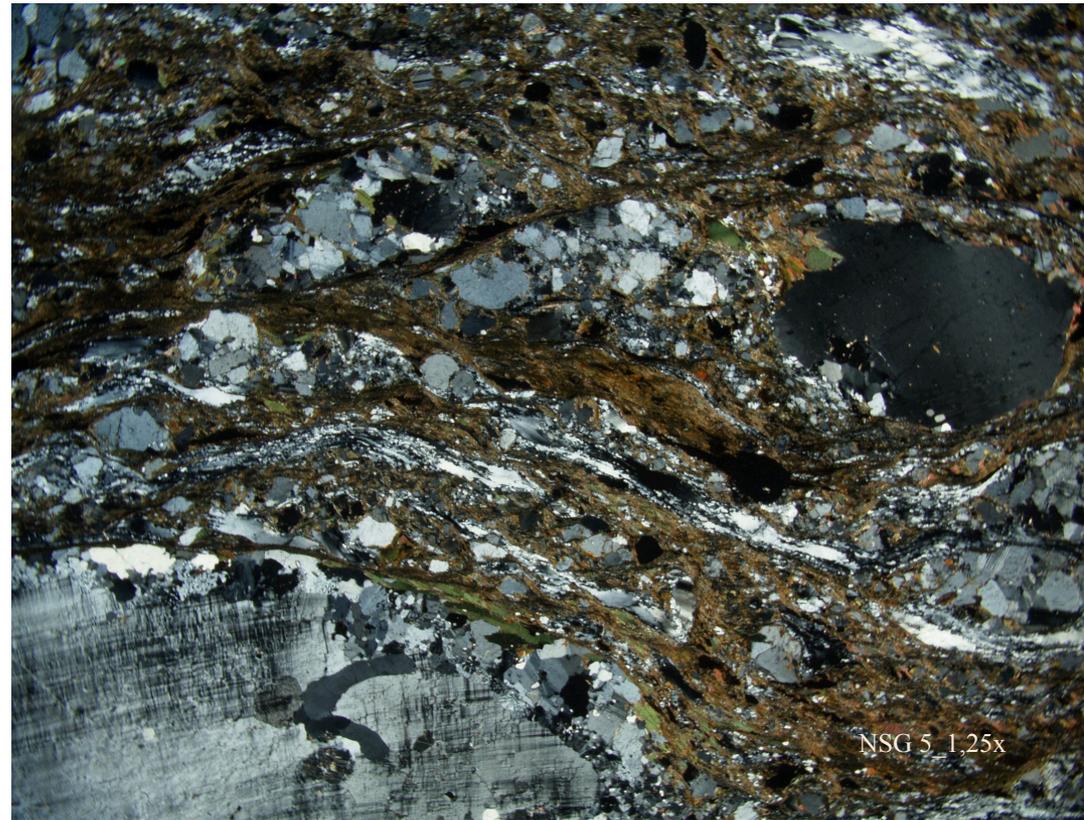
Cloritóide-grafita-quartzo-muscovita xisto (amostra C-41B – Nappe Carrancas)

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – PORFROCLASTOS MANTEADOS



Deformação maior nas bordas do **porfiroblasto**: acúmulo das distorções e deslocamentos da rede cristalina e recristalização dinâmica da borda do megacristal. Porfiroblasto passa à **porfiroclasto** com as estruturas de **manto-e-núcleo**



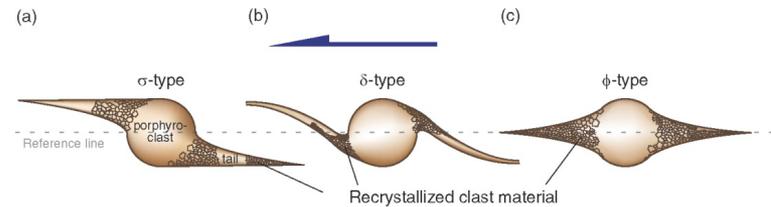
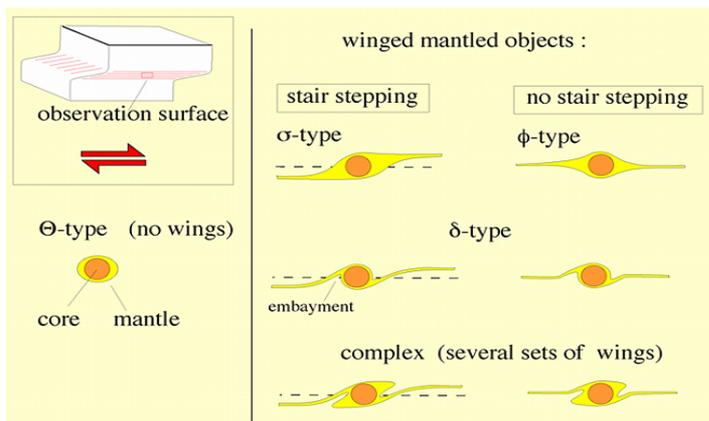
NSG 5_1,25x

Porfiroclastos manteados

a. geometria em degrau do tipo *sigma* – *recristalização > deformação*

b. Geometria em cauda do tipo *delta* – *deformação > recristalização*

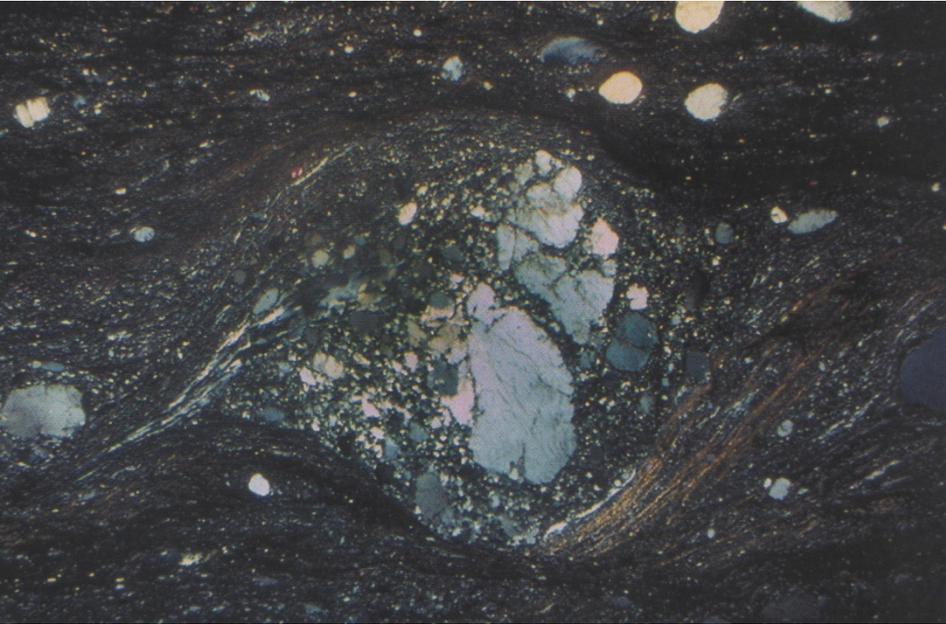
c. Geometria simétrica do tipo *phi* – *sem rotação*



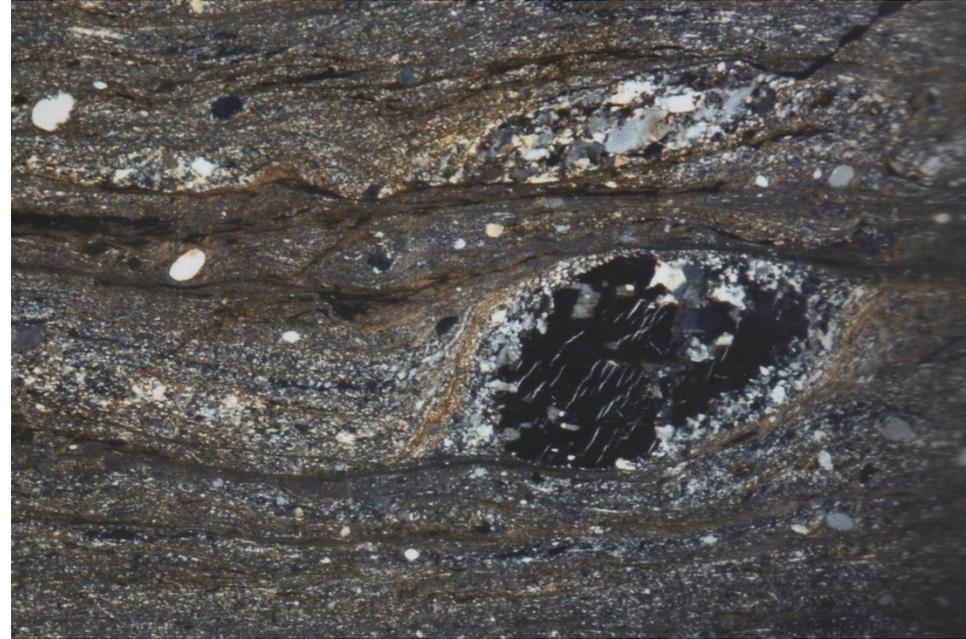
ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – PORFROCLASTOS MANTEADOS

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, assimetricamente, nos domínios sob compressão.



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – PORFROCLASTOS MANTEADOS

Porfiroclastos manteados, com caudas e assimetrias em degrau



Porfiroclastos *sigma* (σ) de hornblenda com cauda de hornblenda actinolítica. Rotação horária.

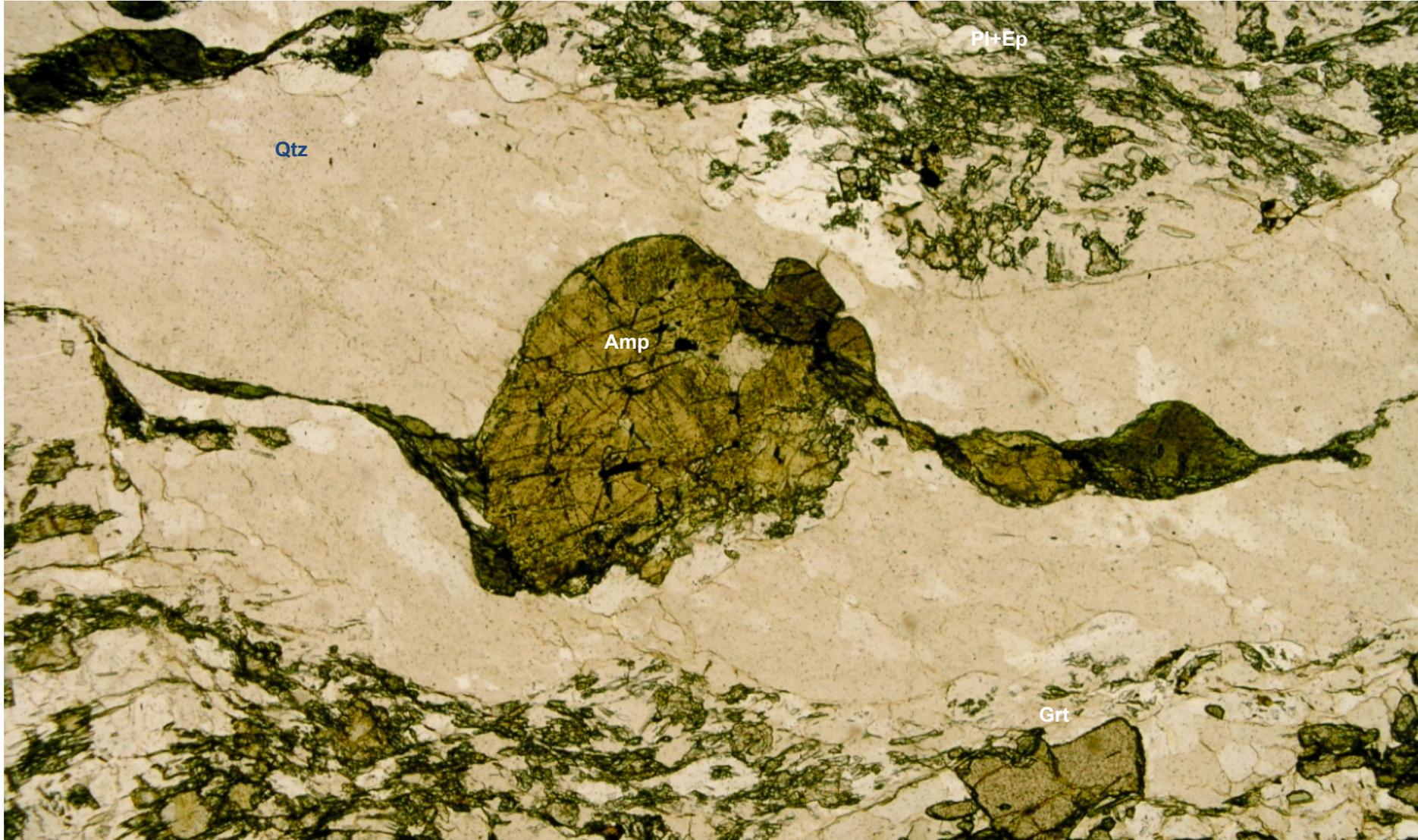


Profiroclasto de hornblenda totalmente recristalizado em cristais menores equidimensionais e sigmoidais. Na porção inferior – porfiroclasto *sigma* manteado, rotação anti-horária.

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – PORFROCLASTOS MANTEADOS

Porfiroclastos manteados e com caudas assimétricas em degrau



Porfiroclasto de hornblenda *do tipo-delta* (δ) e com geometria em degrau (rotação anti-horária)

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS E CINEMÁTICA – PORFROCLASTOS MANTEADOS E *BOUDIN* DE BANDA DE CISALHAMENTO

Boudin de banda de cisalhamento de porfiroclasto de plagioclásio (substituído por epidoto e mica branca) em matriz granoblástica de quartzo. Rotação anti-horária compatível com porfiroclasto *delta* (δ) de hornblenda.



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE BAIXO GRAU

As condições metamórficas são aquelas do estágio final da deformação. Os estágios iniciais no geral são obliterados. A progressão e ou superposição da deformação pode, por vezes, deixar relíquias de atividades sob diferentes temperaturas.

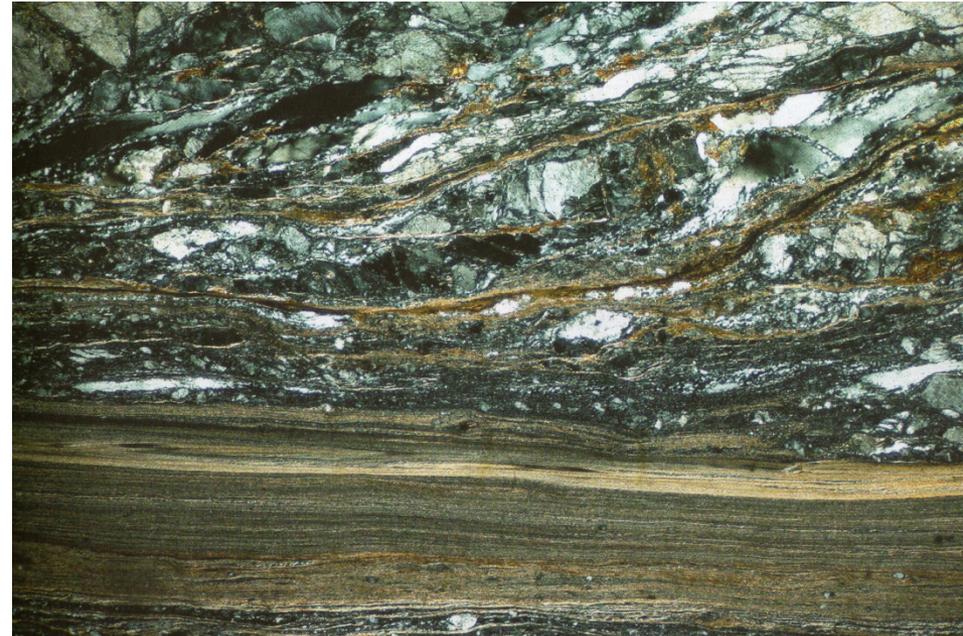
Milonitos de baixo grau ocorrem até temperaturas de cerca de 500°C e podem mostrar uma gradação a cataclasitos, ou coexistirem com feições cataclásticas.

Porfiroclastos de feldspatos possuem fraturas por cataclase e deformação cristal-plástica, como extinção ondulante, deformação de geminações e, mais raramente recristalização em novos grãos de granulação muito fina.

Transição brusca entre protomilonitos, milonitos e ultramilonitos, que em um mesmo protolito, indica forte gradiente de *strain* característico de temperaturas mais baixas.



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

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE BAIXO GRAU

O quartzo, deformado por processos cristal-plásticos, possui variações de forma e extinção ondulante. Com o aumento de temperatura ocorrem *bulging* e rotação de sub-grãos. A granulação do quartzo recrystalizado é inferior a 50 microns.

A biotita é reduzida a grãos muito pequenos na matriz, enquanto a muscovita tende a resistir e desenvolver porfiroclastos *fish*, principalmente quando envolvida por quartzo.

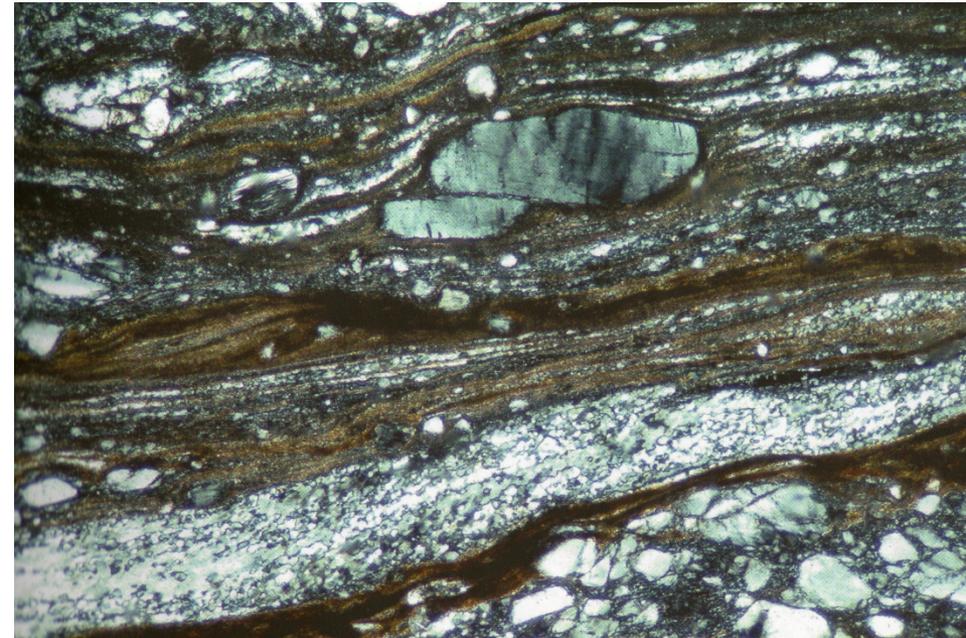
A redução dos cristais de mica e feldspatos pode ocorrer por cominuição cataclástica, ou por fina recrystalização. Esses processos podem ser indistinguíveis.

ESTRUTURAS ASSIMÉTRICAS ESTÃO BEM DESENVOLVIDAS.



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.

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

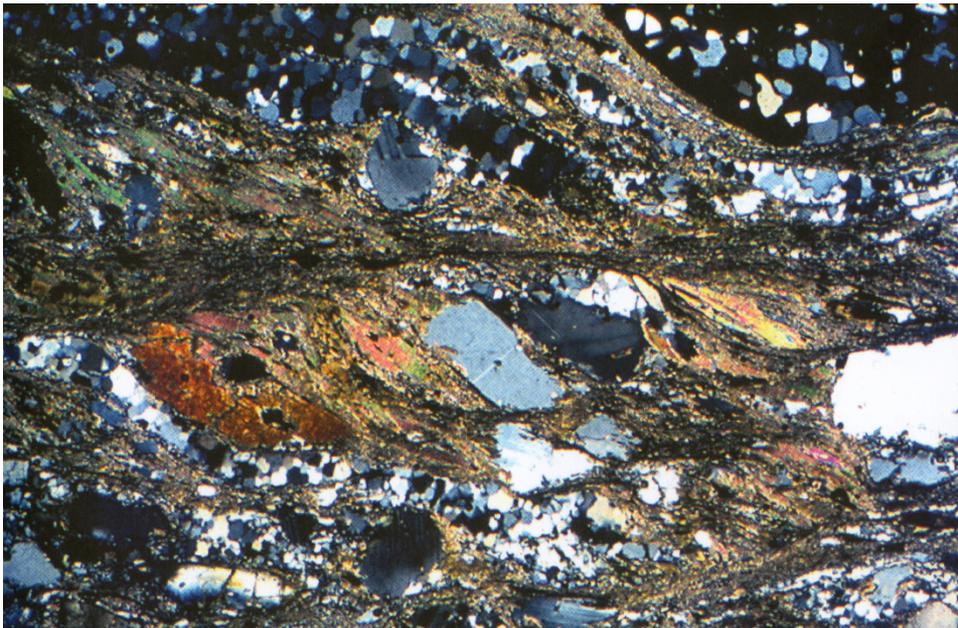
MILONITOS DE MÉDIO GRAU

Milonitos de médio grau desenvolvem-se sob temperaturas entre 500 e 650°C.

O quartzo é completamente recristalizado por rotação de sub-grãos e por migração de borda de grãos. Tende a fábrica granoblástica poligonal.

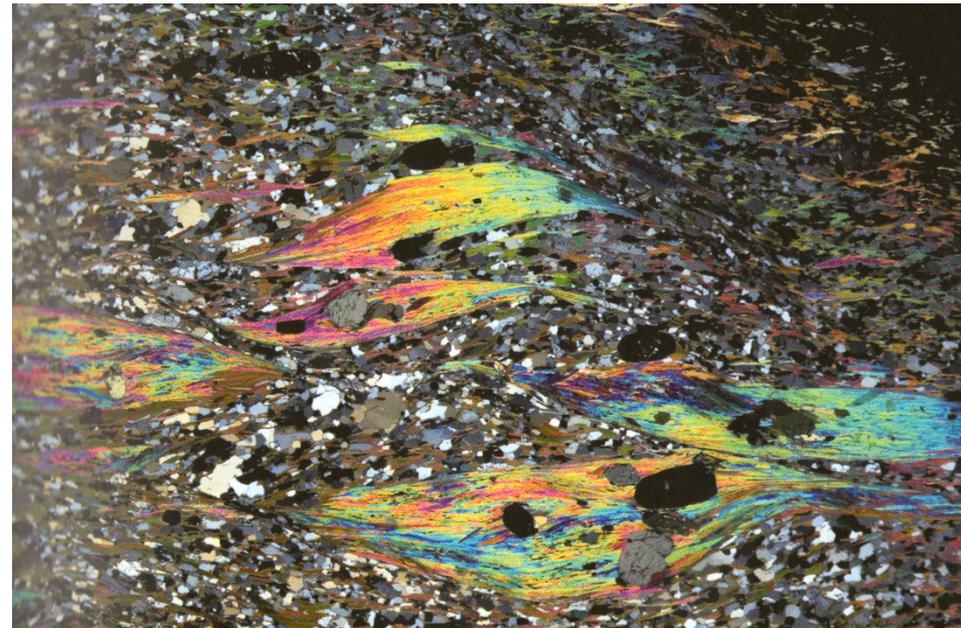
Porfiroclastos de feldspatos possuem extinção ondulante e recristalização manteada. Fraturamento não é mais comum. São raros os contrastes intensos entre protomilonitos, milonitos e ultramilonitos, mas a transição para rocha não milonítica é comum.

Estruturas S-C recristalizadas e peixes de micas estão presentes.



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.



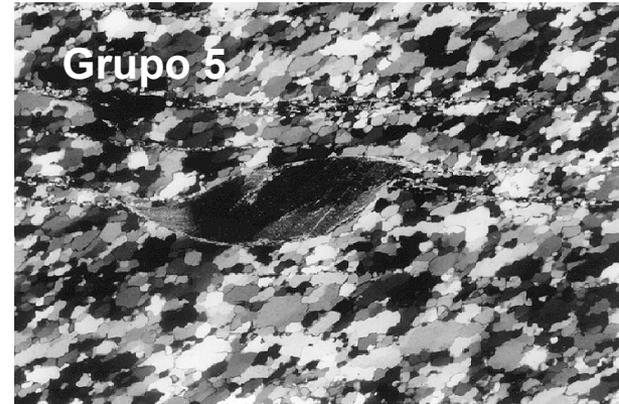
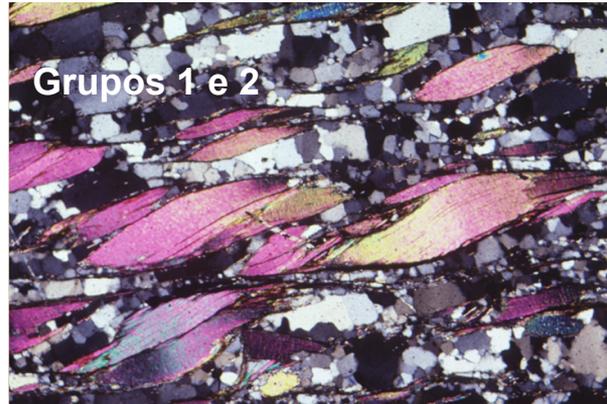
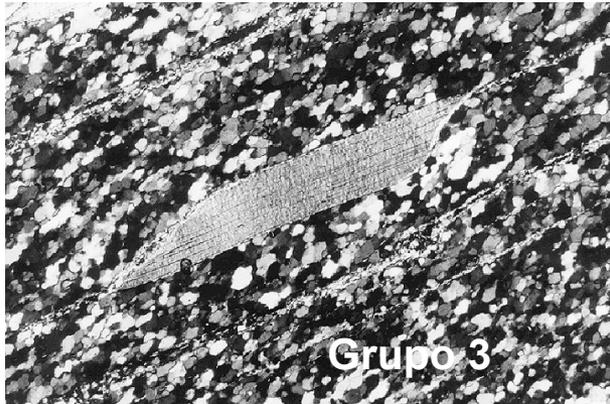
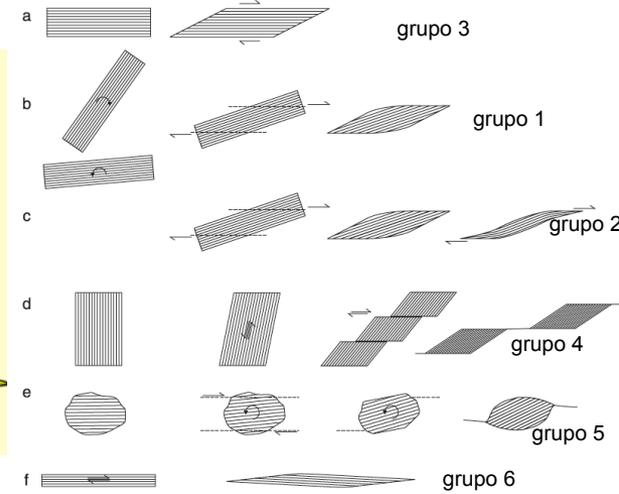
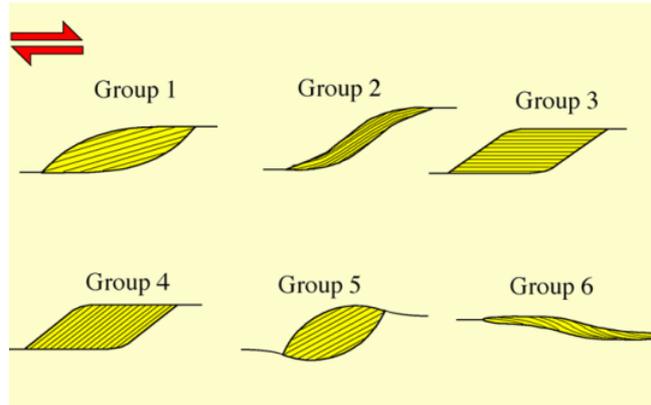
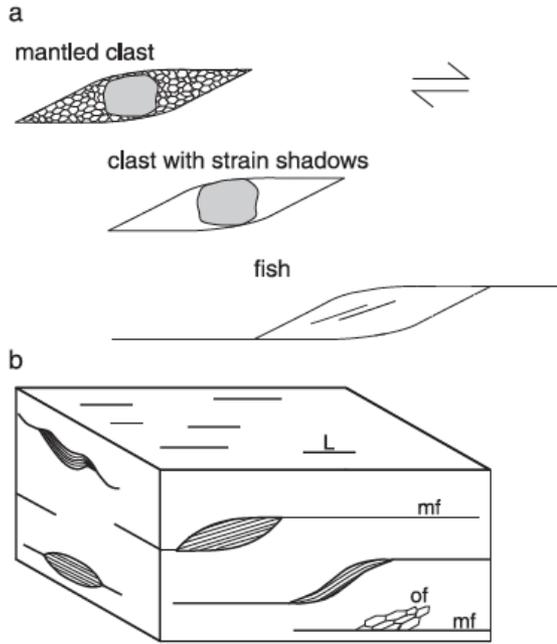
Milonito de mica xisto, com peixes de foliação a muscovita, envolvendo granada e estauroлита. Quartzo granoblástico com recristalização estática.

Rotação horária.

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

PEIXES MINERAIS

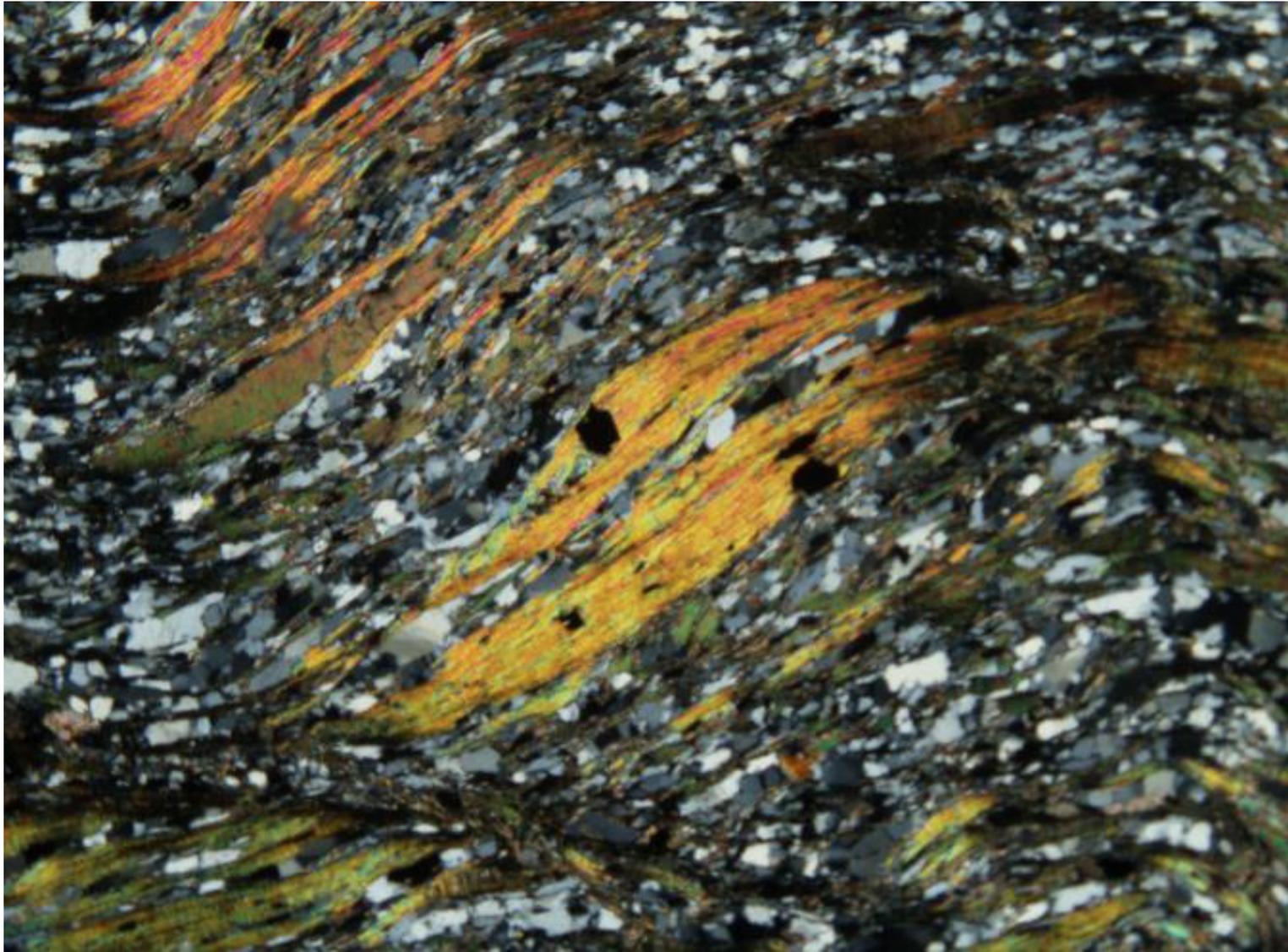
Principais tipos de *mica fish*



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE MÉDIO GRAU

SNA 228- - Granada-muscovita xisto com biotita (Nappe Andrelândia)



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

PEIXES MINERAIS



Peixe de diopsídio em *ribbon* de quartzo



Peixe de plagioclásio em quartzo



Peixe de K-feldapato com mimerquita assimétrica

ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE ALTO GRAU

Milonitos de alto grau são formados sob temperaturas superiores a 650°C.

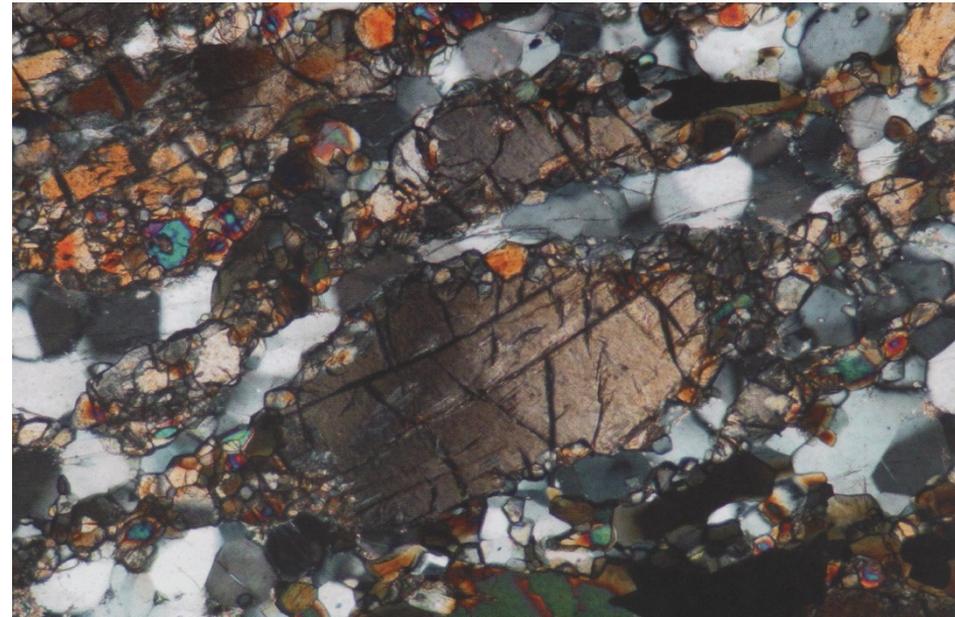
As rochas tendem a completa recristalização, com conseqüente destruição da textura milonítica original. A textura milonítica pode estar preservada em rochas poliminerálicas, onde o crescimento dos grãos são inibidos.

Características: *ribbons* monominerálicos de quartzo, com crescimento alongado, por migração de borda de grãos (GBM) que amoldam profiroclastos de feldspatos.

Os feldspatos encontram-se recristalizados em agregados poligonais, são poucos os cristais manteados. A foliação tende a amoldar simetricamente os porfiroblastos, mascarando os marcadores de movimento.



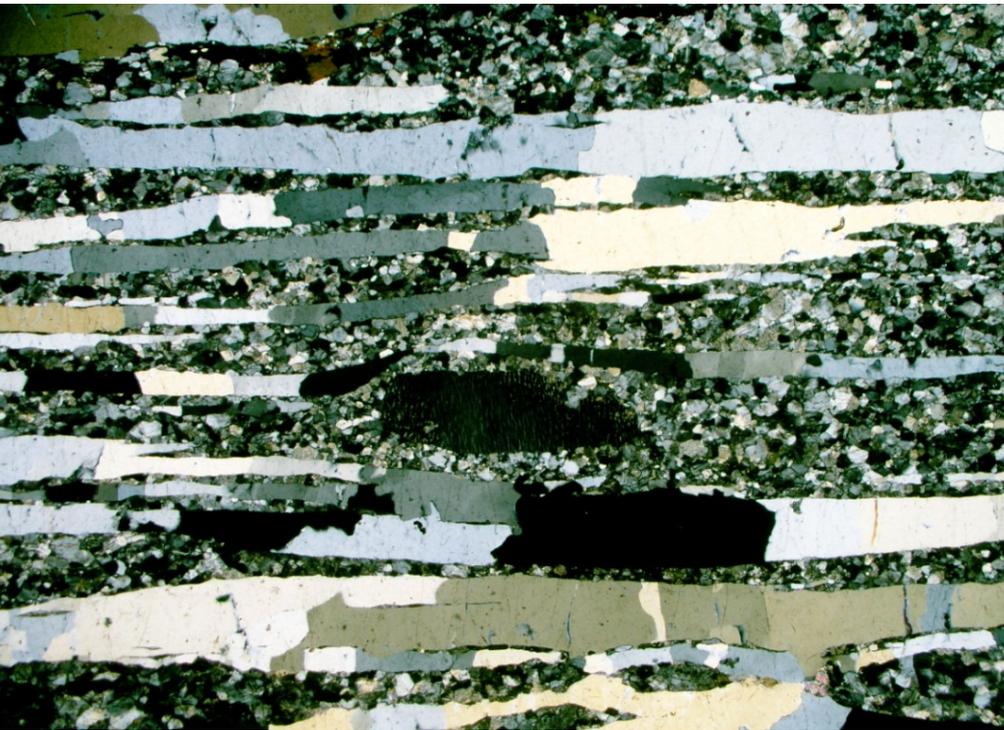
Milonito de alto grau ou gnaiss fitado (*striped gneiss*).
Matriz quartzo-feldspática granoblástica com recristalização estática.
Ribbons de quartzo e porfiroclastos simétricos de feldspato



Profiroclasto assimétrico de ortopiroxênio em matriz granoblástica poligonal (rotação horária).

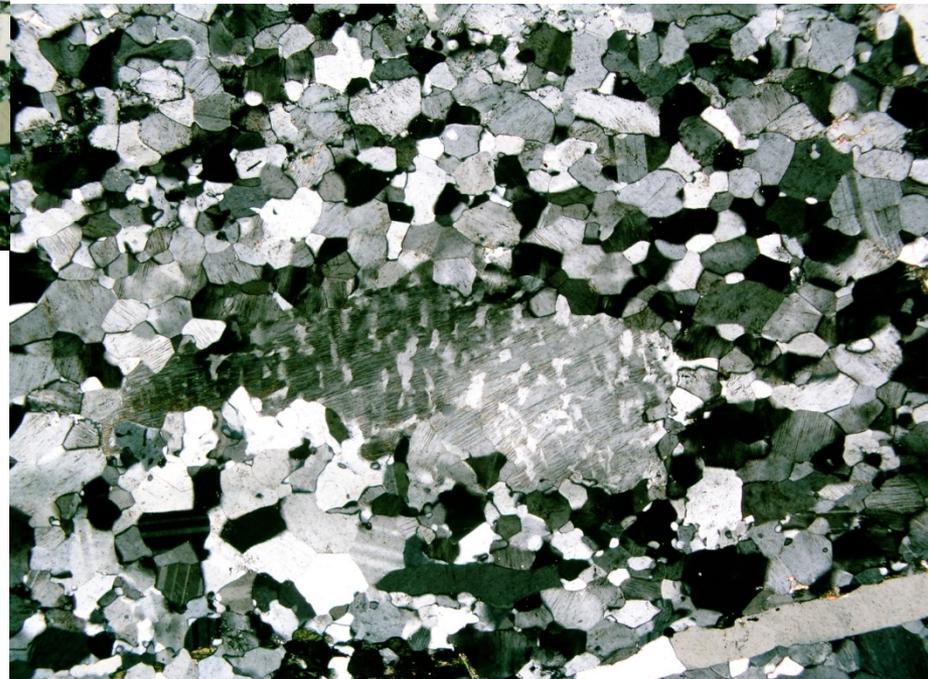
ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE ALTO GRAU



Porfiroclasto reliquar de feldspato antiperítico com extinção ondulante. Matriz de composição tonalítica, granoblástica equigranular poligonal, sem extinção ondulante.

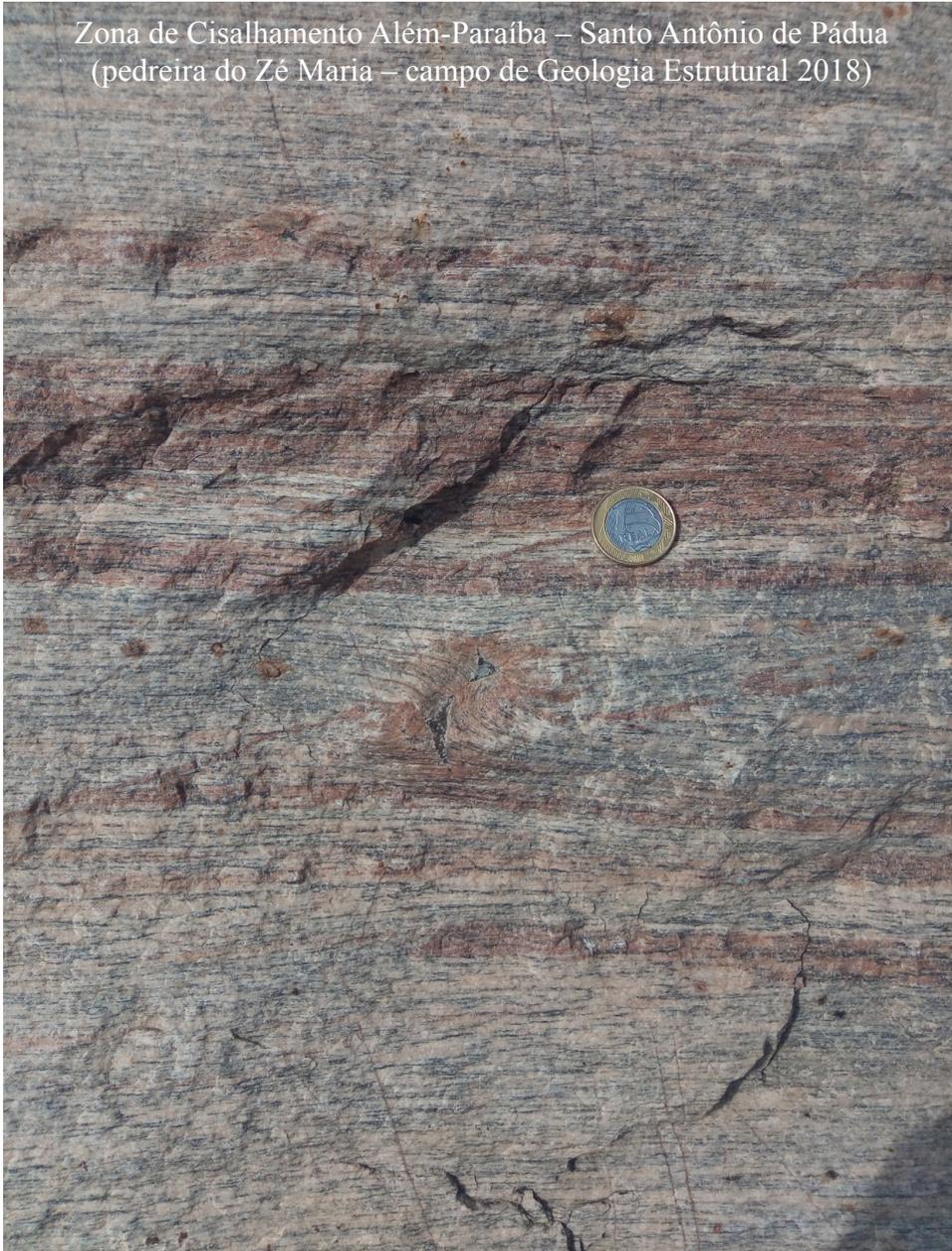
Gnaise fitado (blastomilonito)



ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

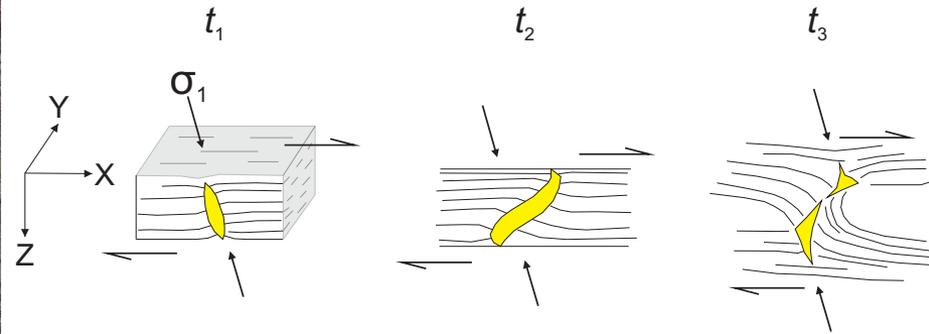
MILONITOS DE ALTO GRAU

Zona de Cisalhamento Além-Paraíba – Santo Antônio de Pádua
(pedreira do Zé Maria – campo de Geologia Estrutural 2018)



BOUDINS DE FOLIAÇÃO

Dilatação, preenchimento e rotação



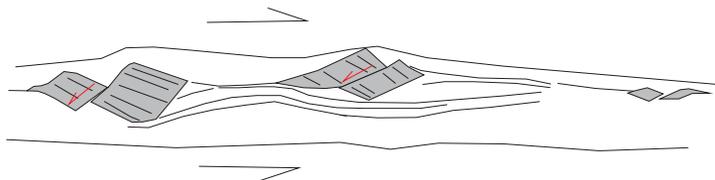
ROCHAS PRODUZIDAS EM ZONAS DE CISALHAMENTO DÚCTIL

MILONITOS DE ALTO GRAU

BOUDINS EM ZONAS DE CISALHAMENTO – Rio Paraíba do Sul, campo de Geologia Estrutural 2018



BOUDIN EM DOMINÓ



BOUDIN DE BANDA DE CISALHAMENTO

