

# GEOLOGIA ESTRUTURAL

Aulas 9

ESTRUTURAS PLANARES E  
LINEARES

Prof. Eduardo Salamuni

(Arte: Acadêmica Marcela Fregatto)

# ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS

## FOLIAÇÃO E LINEAÇÃO

---

### Introdução

- Estruturas primárias foliadas existem mas não são muito comuns. Podem ocorrer em: rochas ígneas acamadadas pelo fluxo de lava; clivagem plano axial de em dobras de slumps em rochas sedimentares e como foliação diagenética em folhelhos
- Estruturas secundárias planares, representadas pelas foliações (xistosidades e clivagens) e lineares representadas pelas lineações minerais, de interseção e de eixos de dobras, ocorrem em rochas que foram submetidas a metamorfismo acima dos graus incipientes.
- São geradas por falhas (incluindo-se zonas de cisalhamento) e dobras.

# FOLIAÇÕES

---

## DEFINIÇÕES

Foliação é o termo genérico que se aplica ao se referir a feições planares das rochas metamórficas e corresponde a vários tipos de estruturas, tais como:

- Clivagens (de rocha): separação da rocha em planos paralelos, nos quais não há cristalização orientada de minerais
- Xistosidade: definida pela reorientação de minerais pré-existentes e/ou cristalização orientada de novos minerais, especialmente os micáceos. Caracteriza-se por uma intensa anisotropia planar.
- Estrutura ou bandamento gnaissico: estrutura planar caracterizada por cristalização orientada e segregação de minerais metamórficos individualizados a olho nu, em bandas definidas

---

## CARACTERÍSTICAS DE ROCHAS FOLIADAS

- O fabric e a mineralogia foram alterados sob stress para produzir clivagem ou estruturas bandadas.
- Estruturas bandadas consistem em alternância de laminação entre o domínio das clivagens e o domínio dos micrólitos.
- Os micrólitos possuem partes da rocha original em forma de lentes ou anastomosadas



Bandamento sedimentar reliquiar em metassedimentos da Formação Capiru. Rio Branco do Sul (PR). Foto: E. Salamuni

---

## MORFOLOGIA DAS FOLIAÇÕES



Gnaiss metaígneo - Santo Antônio de Pádua (RJ).  
Foto. E. Salamuni

Os parâmetros texturais nos quais se baseia a morfologia da foliações são os seguintes:

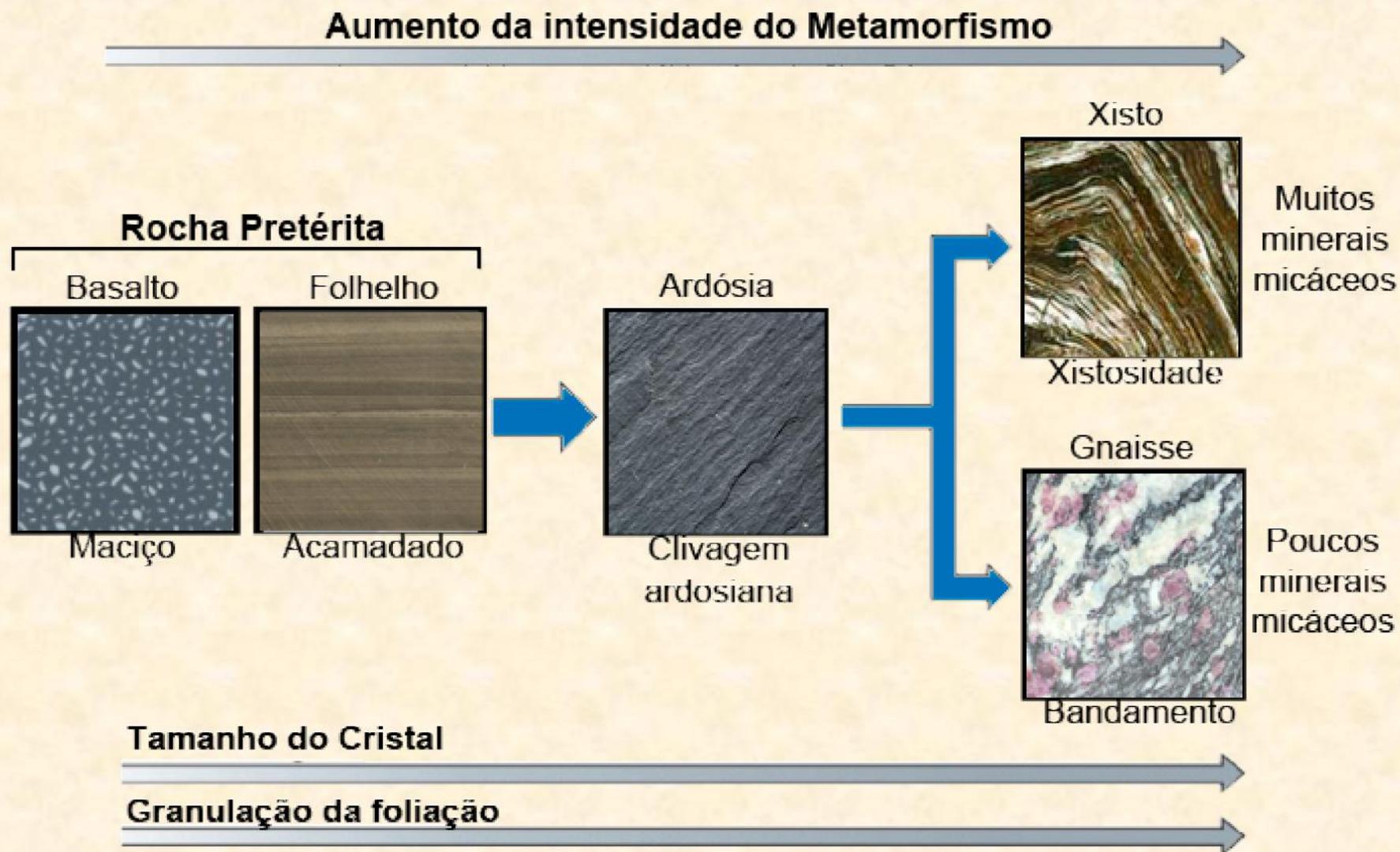
- (a) espaçamento,
- (b) trama dos micrólitos,
- (c) forma e arranjo

---

Tais parâmetros morfológicos/texturais caracterizam os os tipos principais de foliações:

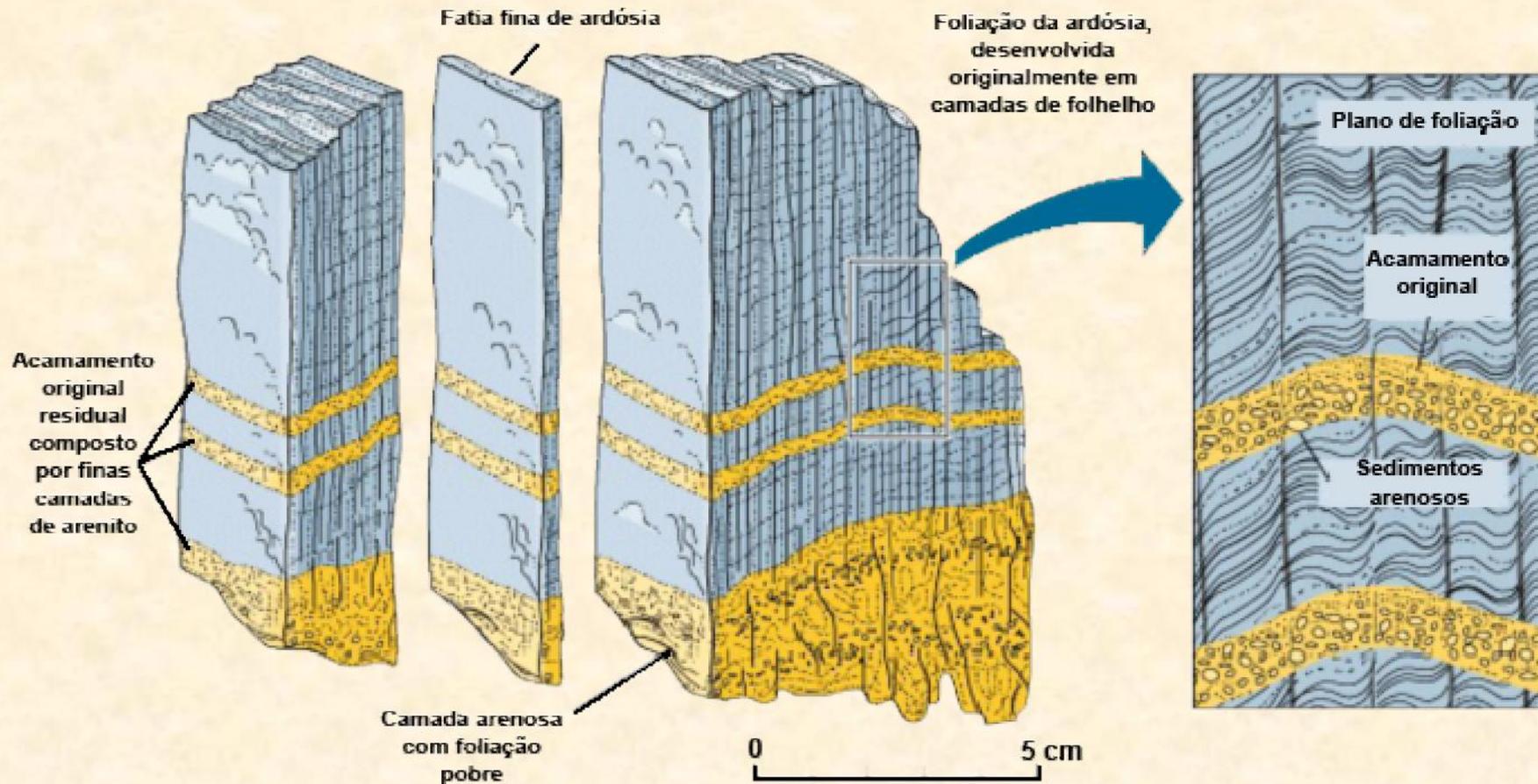
- Espaçamento: a maior parte de rochas foliadas possui planos de espessuras variáveis entre 1 cm e 0,1 mm.
- Trama dos micrólitos: é necessário determinar se a mesma é planar ou lenticular (ou anastomosada), o que a caracterizaria se é de alívio ou de compressão.
- Forma: neste caso é importante a qualidade do plano, ou seja, se a foliação pode ser lisa ou rugosa (áspera) ou estilolíticas. As foliações rugosas são típicas de psamitos deformados e as lisas de ardósias e filitos, enquanto que as estilolíticas são bem observadas em rochas como o mármore e metamarga.
- Arranjo: descreve o padrão das superfícies da foliação que podem ser planares, sinuosos, anastomosados ou trapezoidais. Os três últimos descrevem padrões conjugados, com arranjos de foliações que possuem ângulos entre si (por exemplo, em xistos e filitos). Arranjos trapezoidais podem ser observados em mármore e quartzitos.

# CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS FOLIADAS



Modificado e adaptado de Peter Copeland & William Dupré (Universidade de Houston)

# Metassedimento de baixo grau metamórfico com foliação ardosiana e bandamento reliquiar: ardósia



Modificado e adaptado de Peter Copeland & William Dupré (Universidade de Houston)

Ardósia



Andrew J. Martinez/Photo Resrachers

---

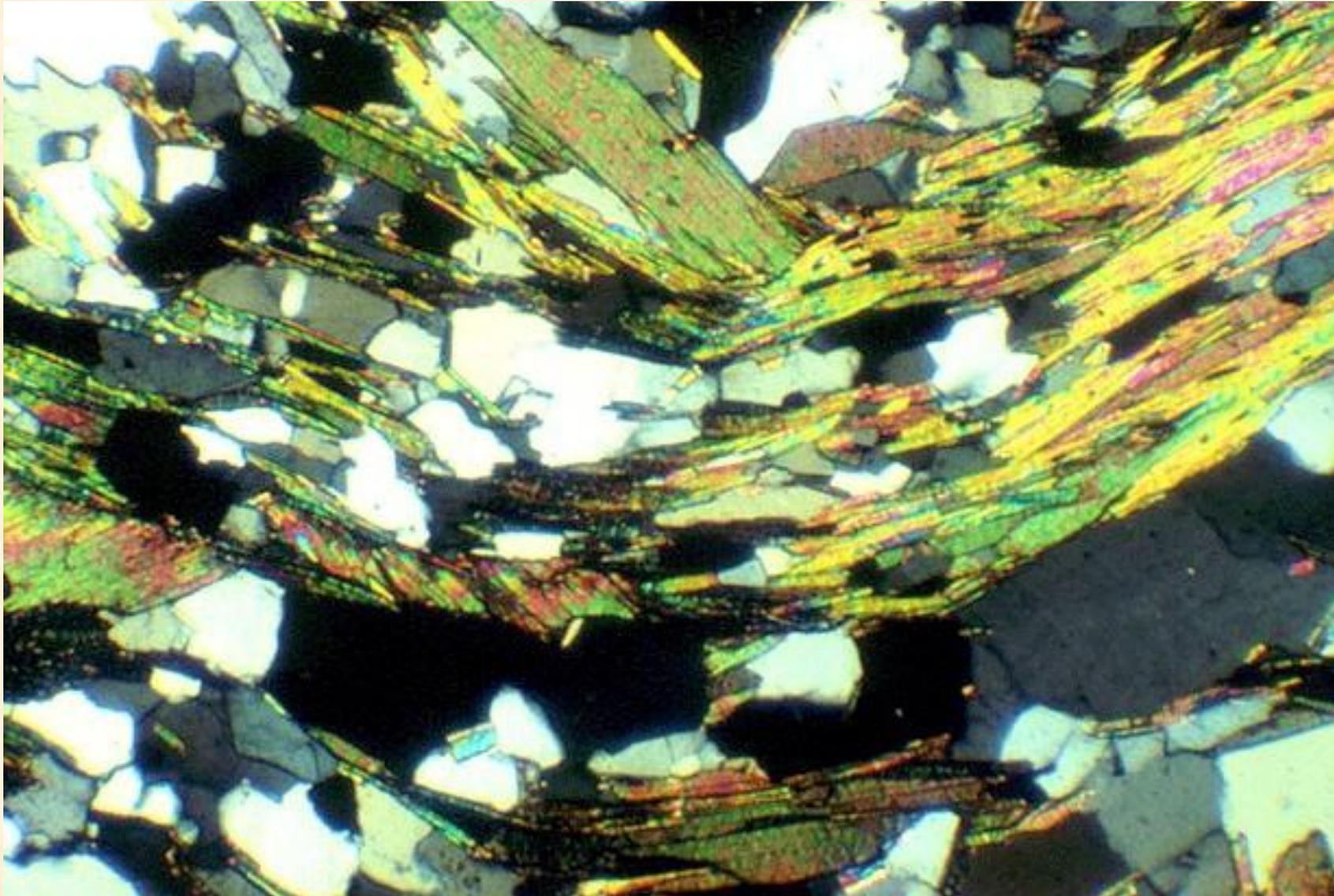
Foliação do tipo clivagem ardosiana em rochas de baixo grau metamórfico (filito)



Foliação (clivagem ardosiana) em metassedimentos da Formação Capiru. Bocaiúva do Sul (PR). Foto: E. Salamuni

---

Filito: foliação metamórfica em baixo a médio grau



Fonte: Peter Copeland e William Dupré (Universidade de Houston)

---

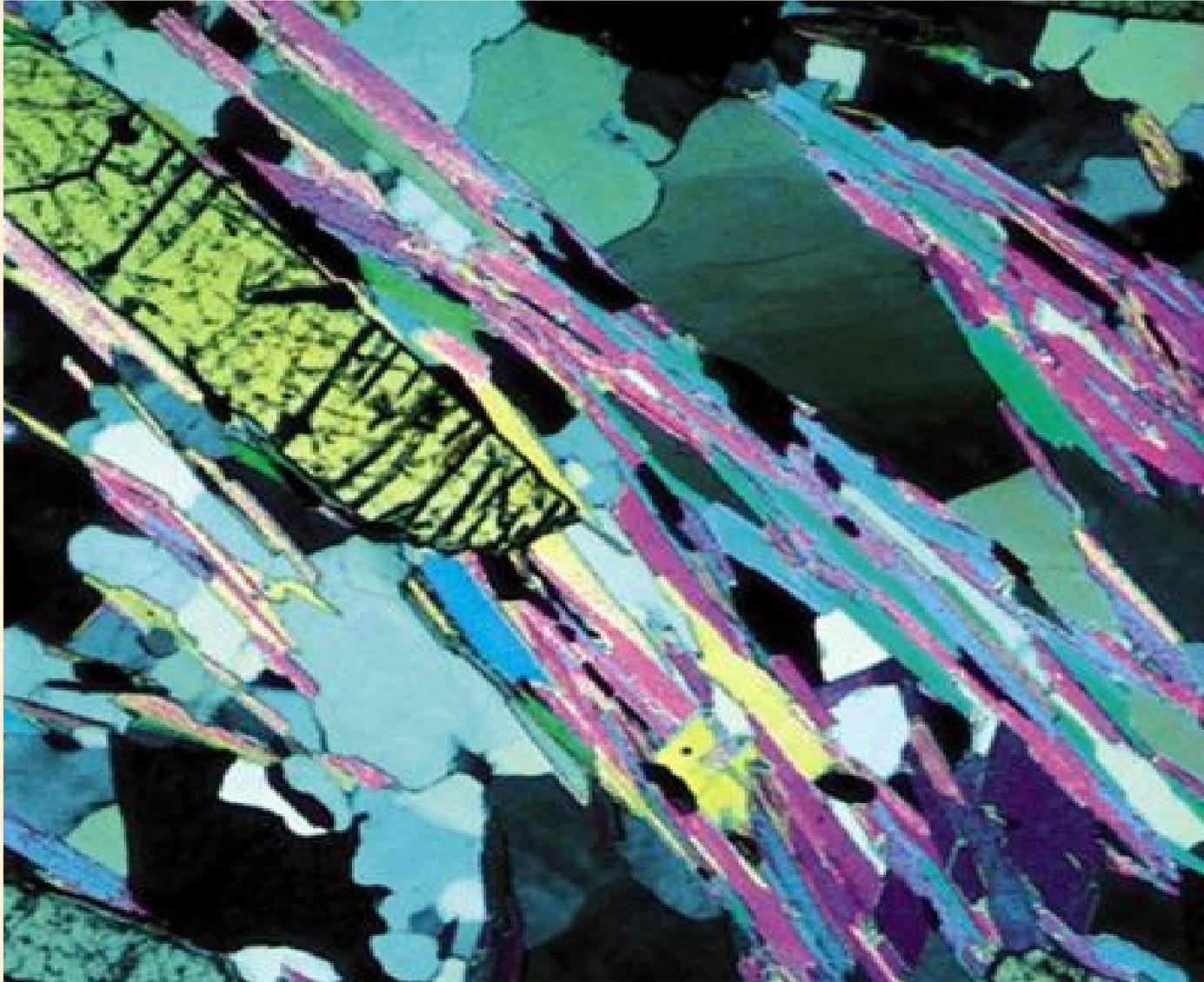
Foliação (dobrada) do tipo xistosidade em rochas de médio grau metamórfico (biotita-xisto)



Foliação (xistosidade) em metamorfitos do Complexo Setuva. Vale do Ribeira (PR). Foto: E. Salamuni

---

Xisto em seção delgada (lâmina)



Fonte: Peter Copeland e William Dupré (Universidade de Houston)

---

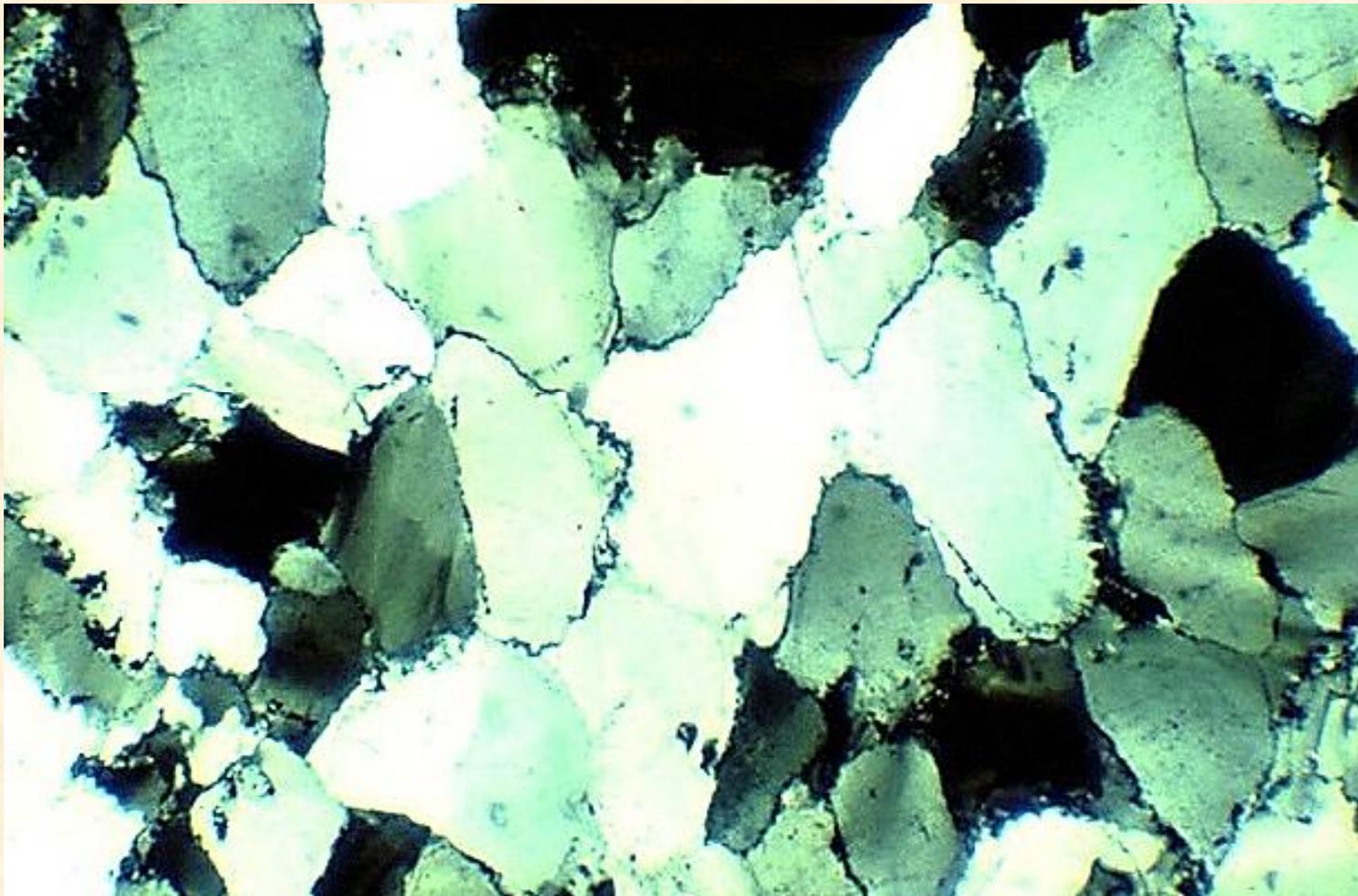
## Quartzito



Quartzito da Formação Betara (Complexo Setuva), Itaperuçu – Morro da Antena (PR)

---

## Quartzito em lâmina (orientação incipiente do quartzo)



Fonte: Peter Copeland e William Dupré (Universidade de Houston)

---

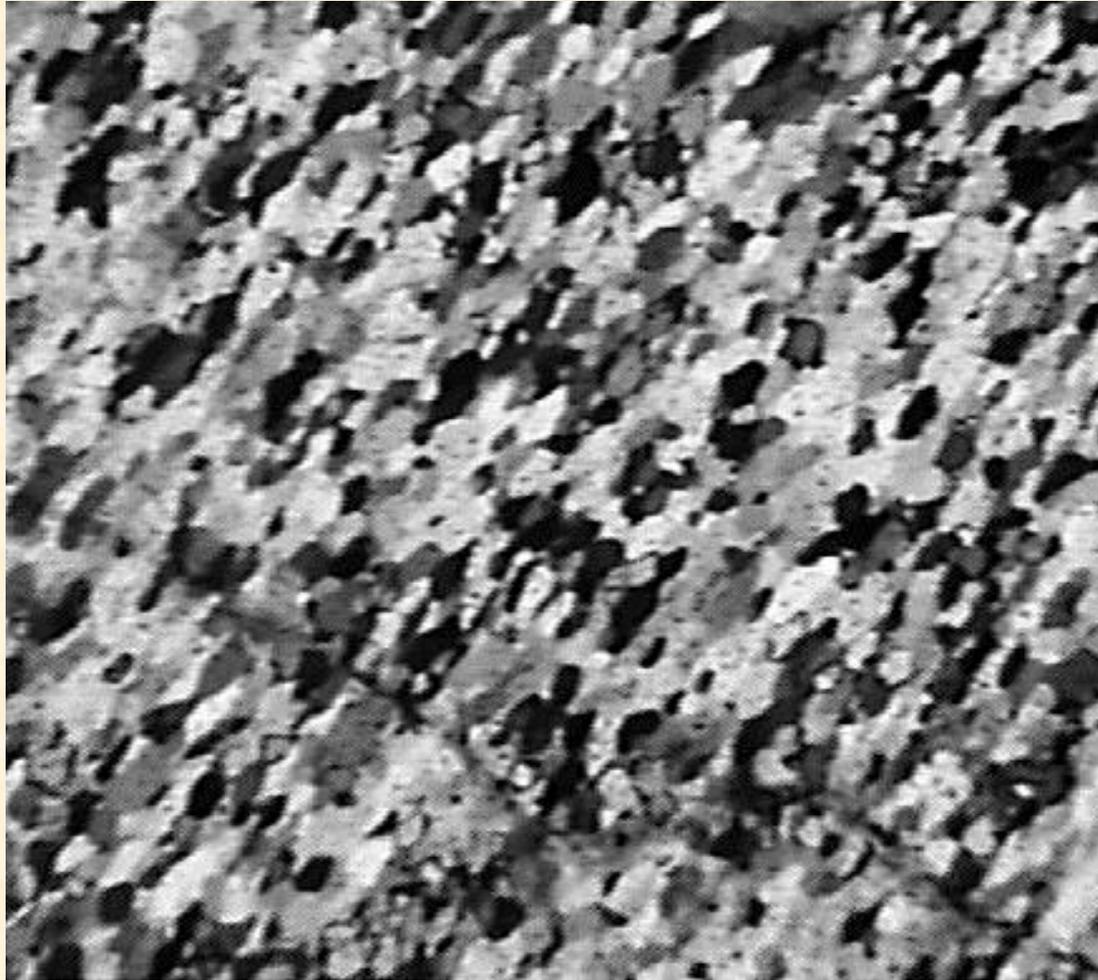
## Quartzito em lâmina (orientação mediana do quartzo)



Fonte: Paschier e Trouw (2011)

---

Quartzito em lâmina (orientação bem definida do quartzo)



Fonte: Paschier e Trouw (2011)

---

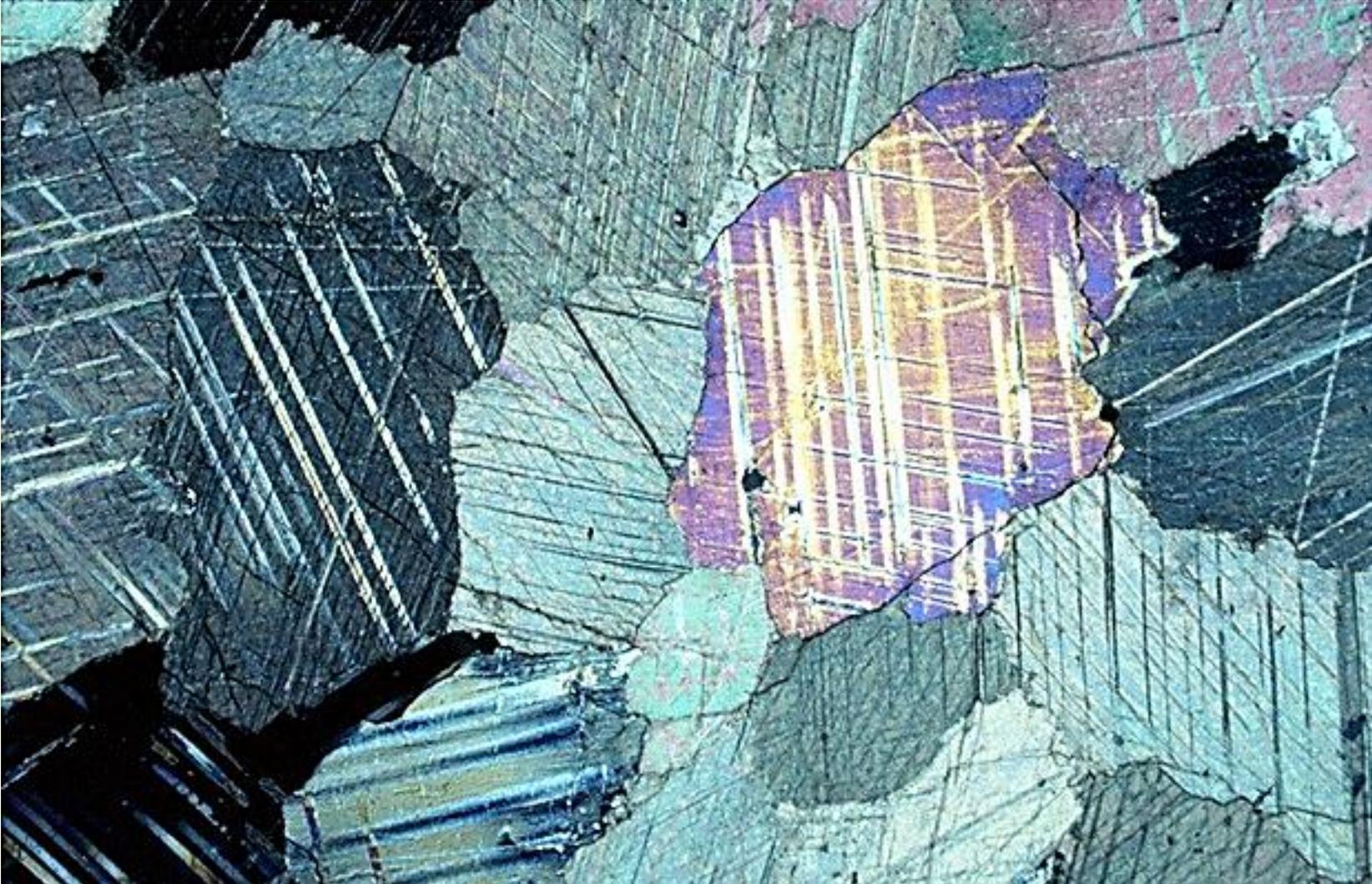
Mármore com bandamento composicional e foliação pouco visível



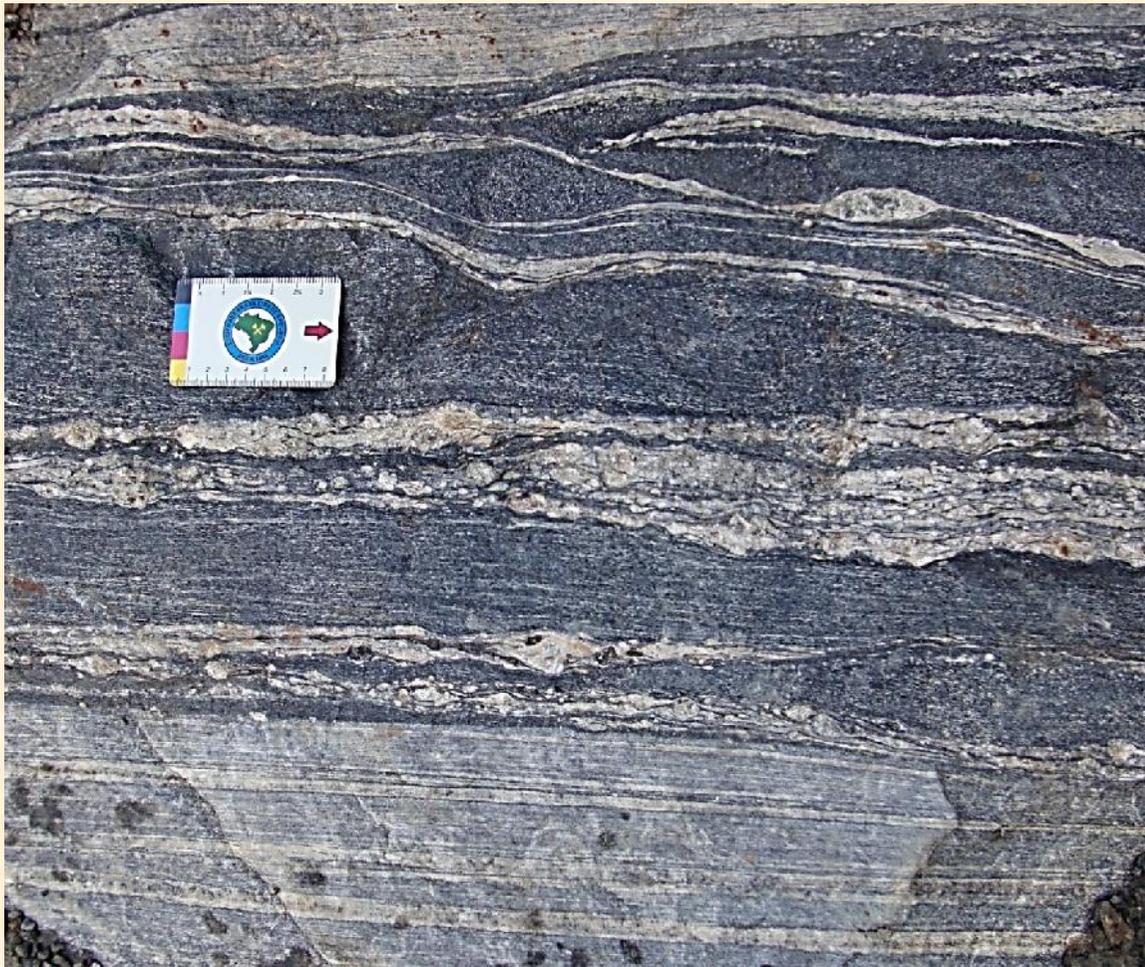
Mármore do Grupo Açungui, Vale do Ribeira, Adrianópolis (PR). Foto: E. Salamuni

---

## Mármore em lâmina



Fonte: Peter Copeland e William Dupré (Universidade de Houston)



Gnaiss  
(bandamento  
gnaissico)

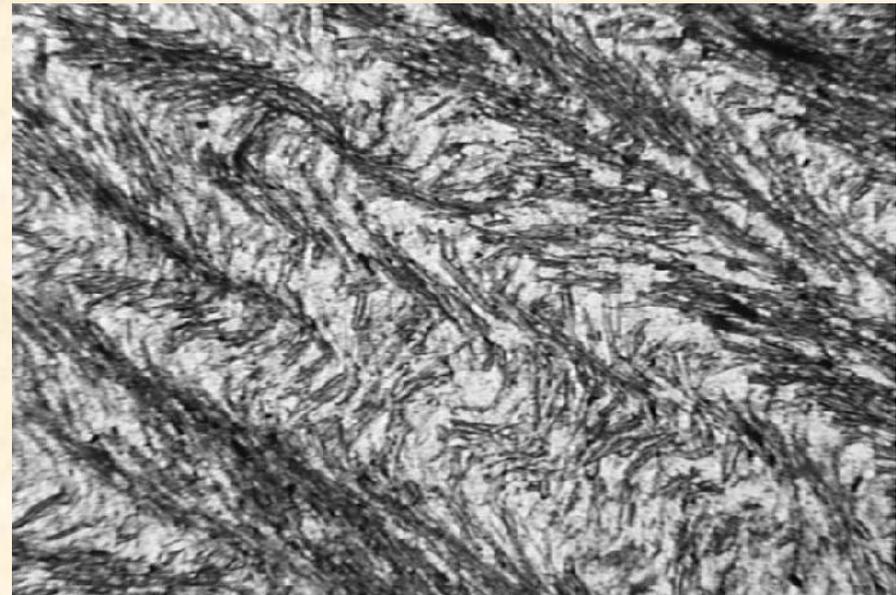
Gnaiss do embasamento da Província Mantiqueira. Rio de Janeiro. Foto: E. Salamuni

---

## TIPOS DE CLIVAGENS

- Clivagem disjuntivas: ainda chamada por alguns autores de clivagem de fratura, é marcada por um conjunto de microfraturas cujo espaçamento é milimétrico a centimétrico. Não há geração de minerais recristalizados.
- Clivagem ardosiana: foliação em metapelitos de granulação muito fina, cujos planos são lisos ao tato e apresentam aspecto fosco. É formada sob grau metamórfico muito baixo, porém com cristalização de minerais placóides (sericita).

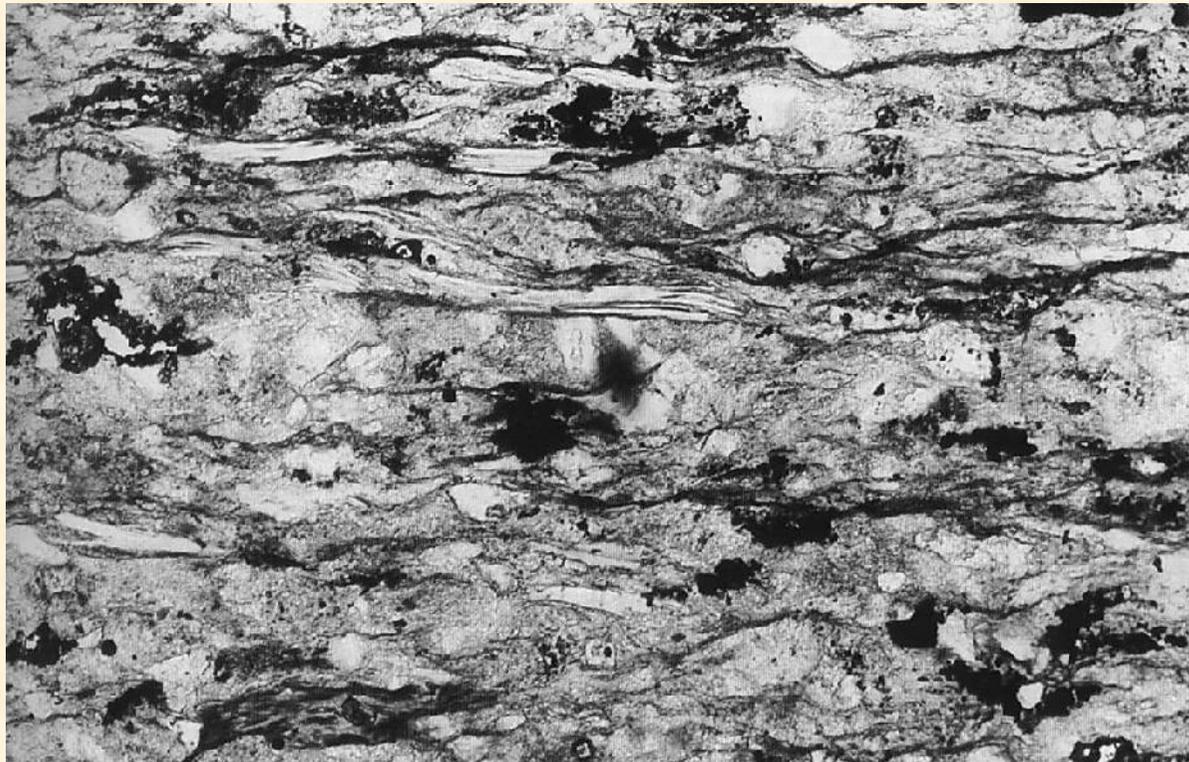
- 
- Clivagem de crenulação: ocorre em metamorfitos e resulta da transposição de flancos de micro-ondulações ou micro-dobras em rochas xistosas. As pequenas fatias de rocha são denominadas de micrólitos (ou microlitons) que se movimentam uns em relações aos outros.
  - Por vezes é difícil a distinção entre a clivagem ardosiana e a xistosidade, principalmente no domínio dos filitos. Porém o xisto é caracterizado por apresentar minerais micáceos visíveis a olho nu.
  - No desenvolvimento de foliação a rocha torna-se micro-ondulada, representando a crenulação. Em estágios mais avançados os planos de cisalhamento tornam-se evidentes, caracterizando uma clivagem de crenulação.



---

## TIPOS DE XISTOSIDADE

Foliação primária diagenética: trata-se de uma feição planar dada por elementos detríticos orientados, tais como micas, normalmente por um fluxo aquoso ou movimento glaciogênico



Fonte: Paschier e Trouw (1985). Formação Collio, Alpes (IT)

- 
- Xistosidade propriamente dita: refere-se à orientação de minerais placóides ou prismáticos ou ainda ao arranjo agregado de minerais tabulares.
  - Milonitização: feição planar resultante do fluxo plástico (lamelar) produzido por cisalhamento não-coaxial e com metamorfismo mais energético da rocha. Normalmente associa-se a milonitização à presença de água no sistema.
  - Foliação de transposição: gerada pelo re-ordenamento de uma feição estrutural de uma posição para outra. Pode ser formada por um cisalhamento simples, não-coaxial, inclusive com geração de dobras intrafoliares, mediante projeção da deformação, podendo gerar dobras de estilos variados e crenulação.

Nesse caso é comum observar o bandamento e a xistosidade deformados e rotacionados.

## BANDAMENTO COMPOSICIONAL

- É caracterizado por faixas com diferentes composições mineralógicas ou texturais, geralmente paralelas entre si. Quando em rocha metamórfica pode ser chamado de bandamento tectônico, e pode corresponder ao acamamento reliquiar paralelo à direção da foliação, segregação metamórfica, migmatização, cisalhamento ou à dissolução por pressão.
- Um problema frequente nos trabalhos de campo em rochas metassedimentares é a distinção entre o bandamento composicional primário, chamado de  $S_0$ , e o bandamento secundário chamado de  $S_n$ .



Metassedimentos da Formação Abapã (PR). Foto: E. Salamuni

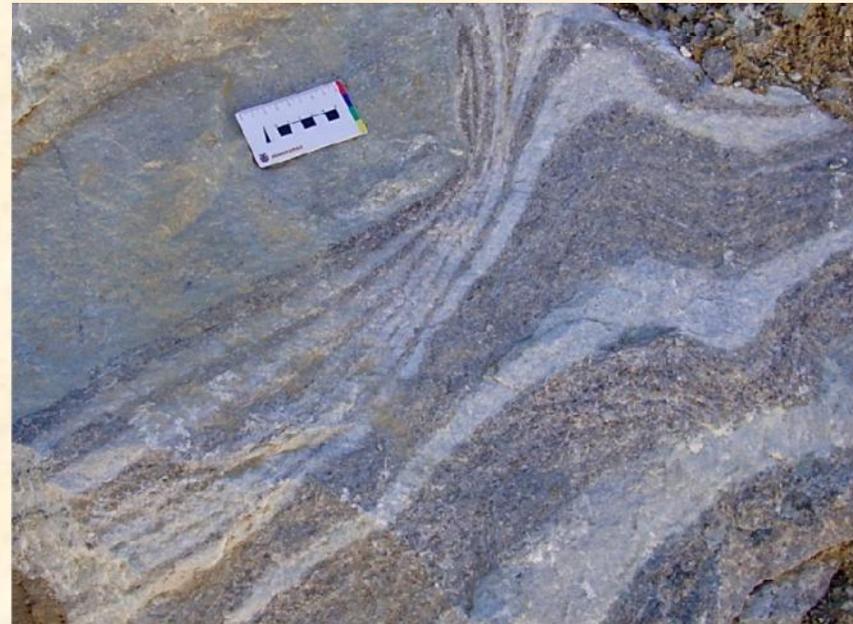
---

Segundo Trouw (1985), alguns critérios de separação são utilizados, tais como:

a. Bandamento primário: as espessuras das bandas, umas em relação às outras, pode ser heterogênea devido às variações na composição, à variação no tamanho dos grãos; à assimetria e principalmente à presença de estruturas sedimentares.

b. Bandamento secundário: as bandas têm espessuras monótonas; sua composição tem tendência

bimodal; a textura é anastomosada; há simetria e ausência de estruturas sedimentares



Mármore da Formação Abapã (PR). Foto: E. Salamuni

---

## ORIGEM DA CLIVAGEM E DA XISTOSIDADE

- Clivagem de fratura: é formada sob condições rúpteis em baixas temperaturas (nível estrutural superior). É típica de rochas reologicamente resistente.
- Clivagem de crenulação: é associada à deformação tardia de rochas que já possuem uma marcante clivagem ou xistosidade.
- Xistosidade: pode ser produzida diretamente a partir da clivagem ardosiana, em função do aumento do tamanho dos grãos, que por sua vez, ocorre devido ao incremento da temperatura e da pressão.
- Três processos fundamentais ocorrem para a formação da xistosidade:
  - recristalização
  - rotação interna
  - achatamento contínuo

- 
- As causas dos processos de xistosidade (recristalização, rotação interna e achatamento contínuo), por sua vez, ocorrem a partir dos seguintes mecanismos geológicos:

rotação mecânica de grãos tabulares ou alongados

dissolução por pressão

deformação cristalplástica

recristalização dinâmica

crescimento mimético

crescimento em campo de tensões locais

crenulação

---

## TEORIAS MECÂNICAS SOBRE A GERAÇÃO DA CLIVAGEM ARDOSIANA OU DA XISTOSIDADE

- Evento 1: cristalização estática dos minerais seguindo superfícies perpendiculares ao esforço máximo.
- Evento 2: Origem por meio do movimento paralelo ao plano máximo de cisalhamento (p. ex. como o processo de milonitização).

Neste caso a foliação milonítica desenvolve-se segundo o plano XY, oblíquo ou sub-paralelo às bordas da zona de cisalhamento. Com o aumento da deformação cisalhante a foliação se rotaciona, paralelizando-se com as bordas da zona de cisalhamento.

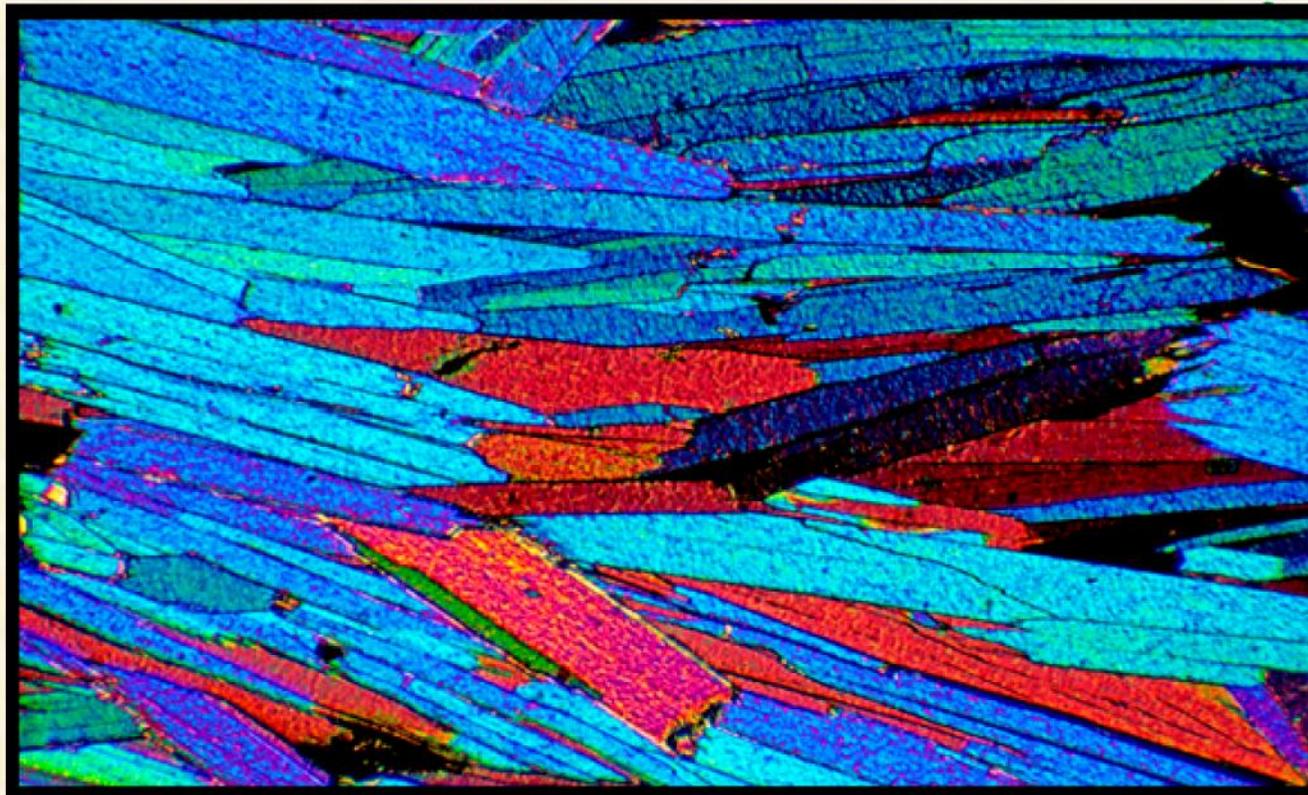
Nesse contexto os principais processos no desenvolvimento da foliação envolve interação rocha-água: dissolução por pressão; dissolução de face-livre do cristal e difusão em filmes.

Xistosidade em biotita xistos devido à reorientação por tensão máxima perpendicular (cisalhamento puro ou não rotacional)

Direção das forças compressivas



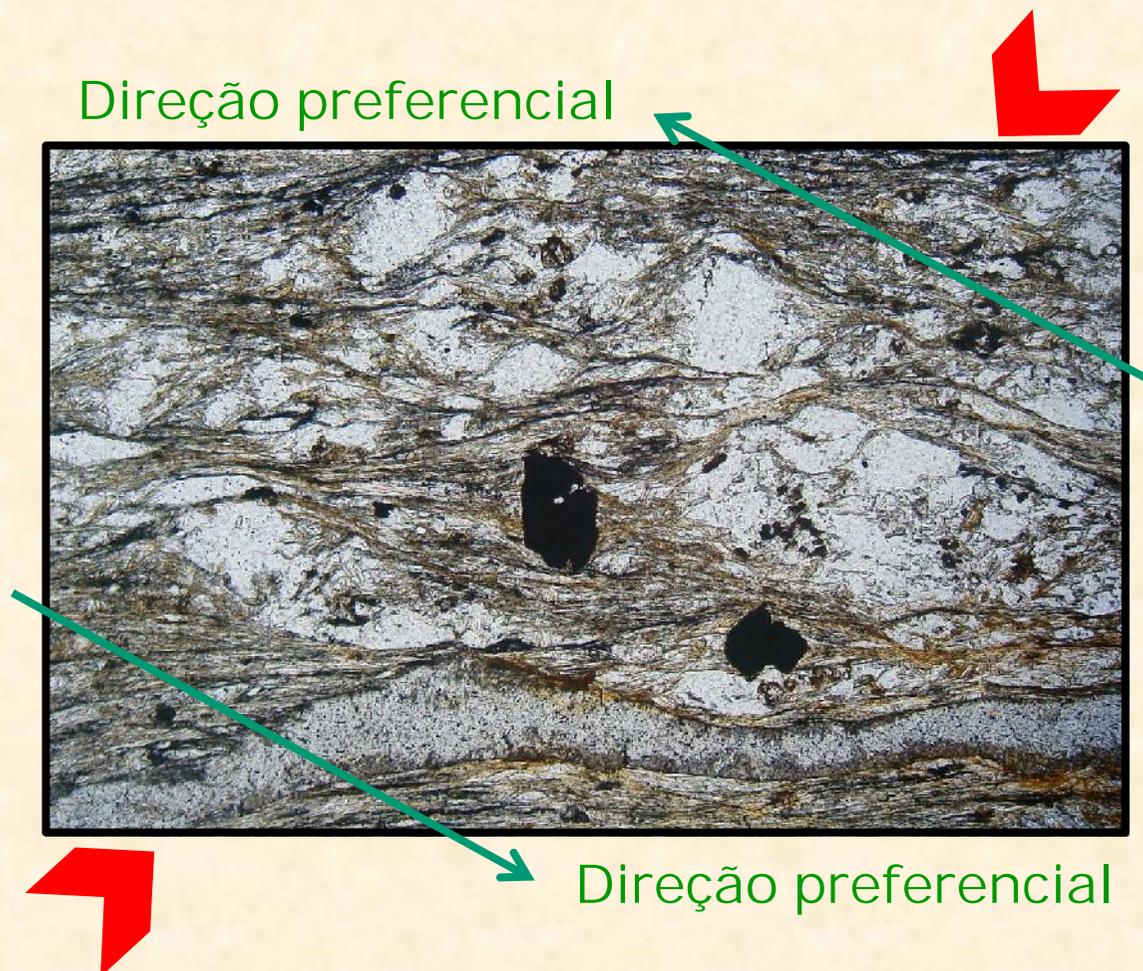
Orientação Preferencial



Biotita-xisto NX

---

Xistosidade em quartzo-xistos devido à reorientação por tensão máxima oblíqua e consequente geração de cisalhamento simples ou rotacional



Quartzo xisto do Complexo Brusque (SC). Foto: Fernanda Gonçalves

---

## CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS FOLIAÇÕES

- Formas dos “fabrics” na foliação

Fabric ou arranjo é a estrutura produzida pela relação espacial dos minerais entre si. Um importante efeito da deformação na maioria das rochas é o alinhamento paralelo dos minerais deformados no corpo rochoso.

- Relações entre estruturas planares e a estrutura maior

A deformação responsável pela geração de uma foliação produz estruturas maiores tais como dobras, zonas de cisalhamento e falhas.

---

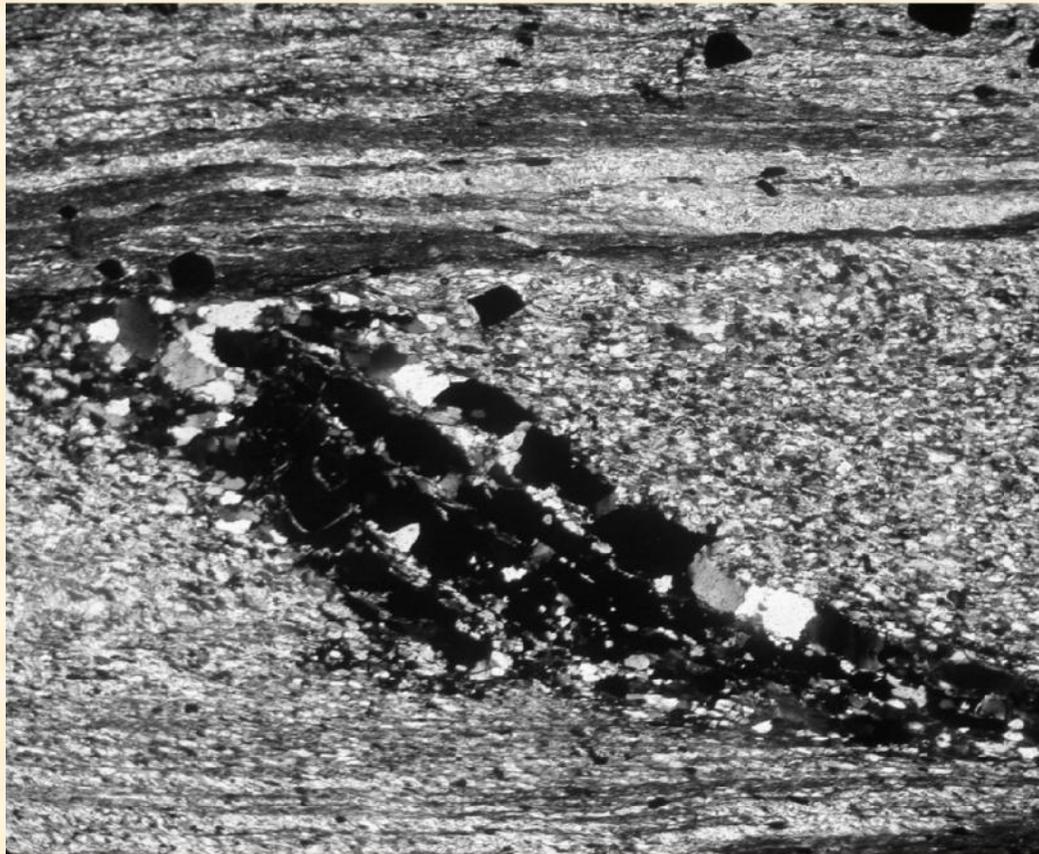
## RELAÇÃO ENTRE FOLIAÇÃO E ESTRUTURAS MAIORES

Há relações geométricas simples, entre foliações e estruturas maiores, geradas pelo mesmo evento de deformação, como explicado abaixo:

- falhas de cavalgamento: a foliação geralmente é concordante com o plano sub-horizontalizado da falha, e normalmente sua textura é anastomosada.
- falhas transcorrentes: as foliações são empinadas ou até verticalizadas no plano de falha. Sua textura pode ser anostomosada ou lenticular.
- zonas de cisalhamento dúctil: geram milonitos (ou filonitos) que, dependendo do seu estiramento e da quantidade de matriz, são classificados em protomilonitos, milonitos ou ultramilonitos. Nas zonas de cisalhamento é comum a ocorrência de foliação (ou estrutura) S/C, que é composta por dois planos de foliação: um principal, aproximadamente paralelo à direção de movimento (plano S ou C), e um segundo que ocorre com uma obliquidade  $\leq 30^\circ$  em relação primeiro, sendo interrompido por este.

---

Mica-xisto com estrutura Ss-Sc (S/C) gerada por cisalhamento simples (que podem ocorrer tanto em zonas transcorrentes, como em zonas de cavalgamento)



Mica-xisto do Complexo Setuva (PR). Foto: E. Salamuni

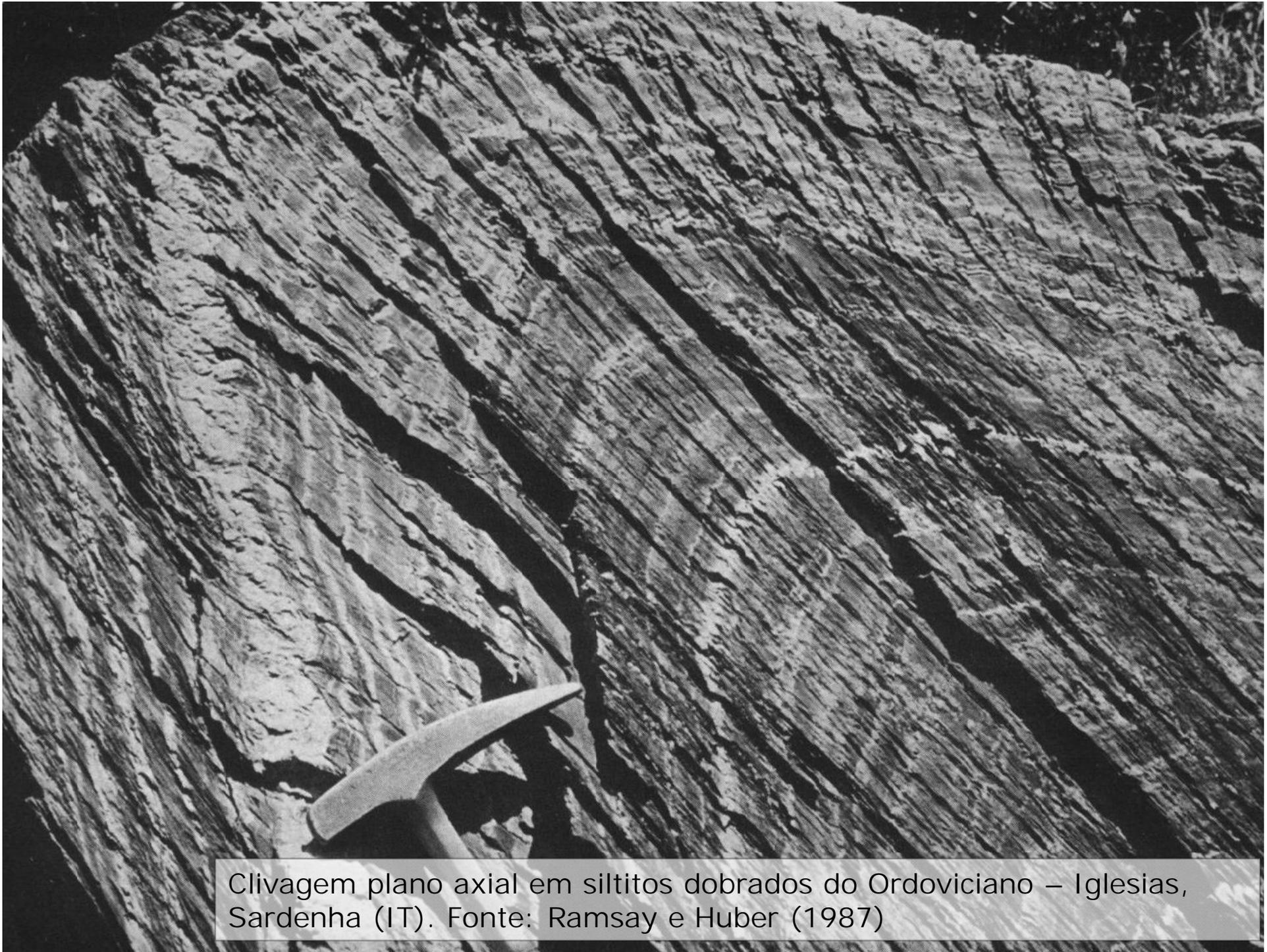
- 
- dobras: a foliação apresenta um arranjo simples paralelo ou em leque materializando a superfície axial. É representada por planos de xistosidade ou então, clivagens de fratura.

A foliação plano-axial é formada, na zona de charneira, numa posição aproximadamente paralela ao plano axial das dobras produzidas por um dado evento deformacional.

Esta característica é importante na análise estrutural de áreas deformadas, visto que a foliação plano-axial mostra que a área foi submetida a um regime dúctil ou dúctil-rúptil, ligado a processos de recristalização metamórfica.

Ortognaisses do embasamento da  
Província Mantiqueira (RJ). Foto: E.  
Salamuni

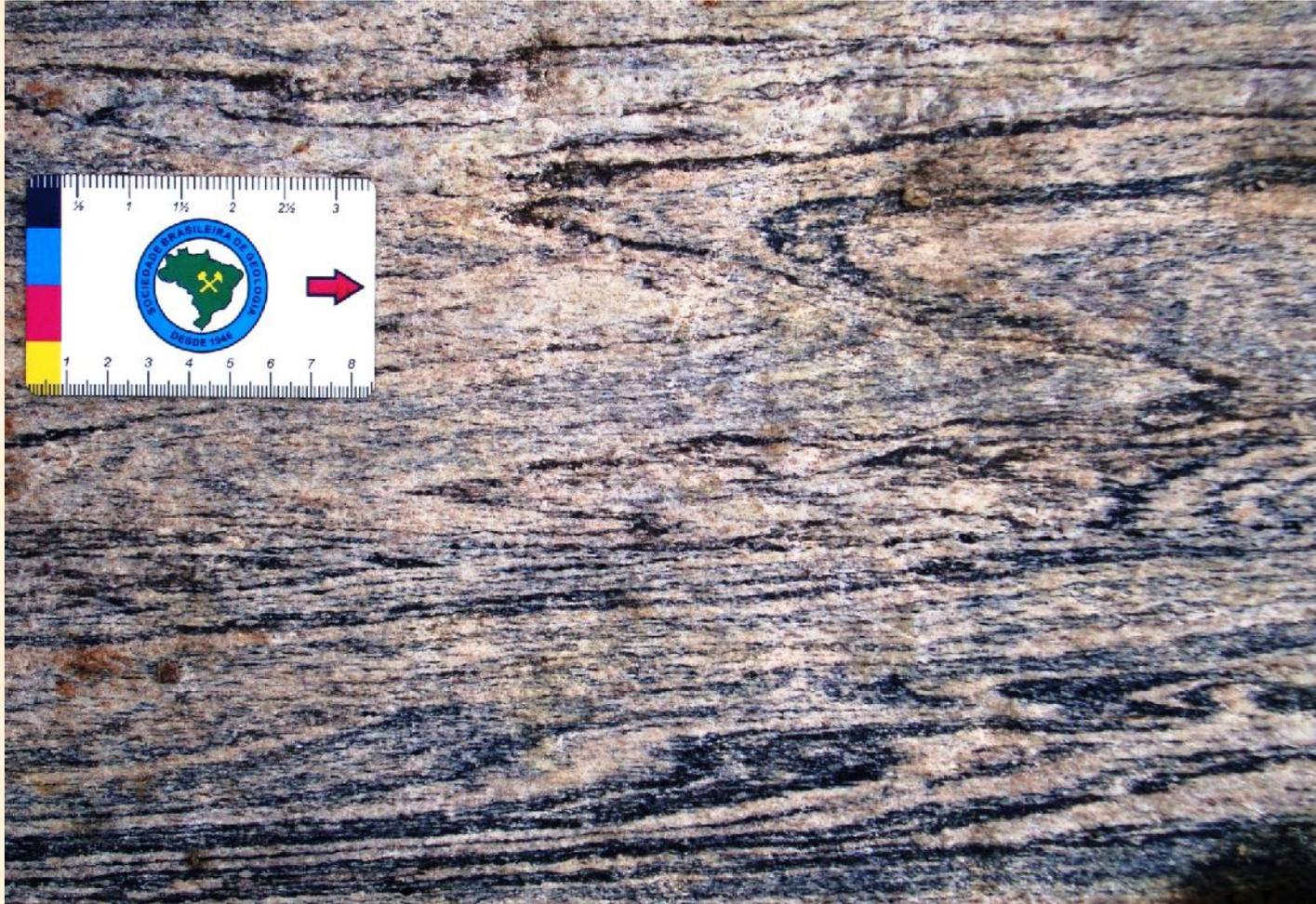




Clivagem plano axial em siltitos dobrados do Ordoviciano – Iglesias, Sardenha (IT). Fonte: Ramsay e Huber (1987)

---

Clivagens ou xistosidades plano-axiais são geradas em dobras de variados estilos.



Foliação plano axial desenvolvida em gnaiss dobrado (dobras isoclinais, cerradas e shear-folds), embasamento da Província Magntiqueira Norte, Rio de Janeiro (RJ).Foto: E. Salamuni

# LINEAÇÕES

---

## INTRODUÇÃO

Lineação é a porção linear em planos de foliação, ou seja, trata-se do conjunto de estruturas lineares produzidas em uma rocha como resultado de sua formação ou deformação.

- Caracteriza-se pelo sub-paralelismo ou paralelismo do alinhamento de elementos lineares alongados e podem ser observados desde a escala macroscópica até microscópica.
- Em planos de xistosidade e menos frequentemente na clivagem ardosiana são caracterizados por alinhamentos e/ou estiramentos de cristais. Igualmente são representados por sulcos e/ou estrias que marcam planos de falhas em escalas variadas.
- Também podem ocorrer quando duas superfícies planares se intersectam.

- 
- Devem possuir fabric penetrativo através de toda a rocha.

As atitudes recebem valores em azimute e medem a direção (que variam de 0 a 360°) e o mergulho (também chamado de caimento – plunge - que varia de 0 a 90°).

- As lineações são subdivididas nos seguintes grupos:

Lineações primárias ( $L_0$ )

Lineações Secundárias ( $L_a$ )

Lineações Secundárias ( $L_b$ )

---

## TIPOS DE LINEAÇÕES PRIMÁRIAS ( $L_0$ )

### a. Lineação de particionamento

Arranjo linear de grãos na granulometria silte e areia, devido ao vento ou à corrente de água.

### b. Lava pahoehoe

Lava em forma de corda, convexa na direção do fluxo.



Lava em corda, tipo pahoehoe, Hawaii (USA)  
Foto: autoria desconhecida

---

## TIPOS DE LINEAÇÕES SECUNDÁRIAS ( $L_a$ ou $L_x$ )

### a. Objetos alongados

É um dos tipos mais comuns de lineação, e é formado pelo alinhamento paralelo do eixo maior de objetos geológicos deformados. Em geral estão ligados a estratos deformados e pouco ou nada metamorfisados.

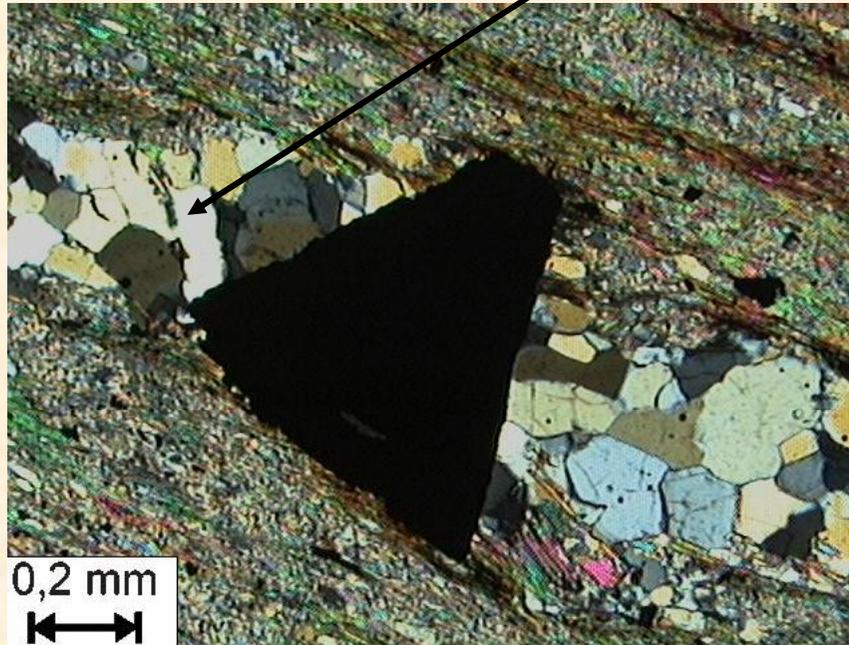
### b. Lineação de orientação mineral

A orientação mineralógica, sem estiramento, gera alinhamentos mineralógicos e caracteriza uma lineação mineral. Estão ligados a metamorfitos pouco metamorfisados, mas deformados.

### c. Lineação de estiramento mineral

Minerais deformados e alongados paralelamente a uma direção geram alinhamentos indicando lineação. Estão ligados a metamorfitos bem deformados e com grau metamórfico desde baixo até alto.

Quartzo ribbon



0,2 mm  
↔

Seção delgada de metassedimentos da  
Formação Capiru. Rio Branco do Sul (PR).

Foto: E. Salamuni

Lineação mineral

Gnaiss-granito



Complexo Atuba, Núcleo Setuva. Bocaiúva  
do Sul (PR). Foto: E. Salamuni

---

d. Estruturas colunares

No caso das estruturas colunares, é a interseção entre uma superfície original e as colunas que fornece uma lineação.

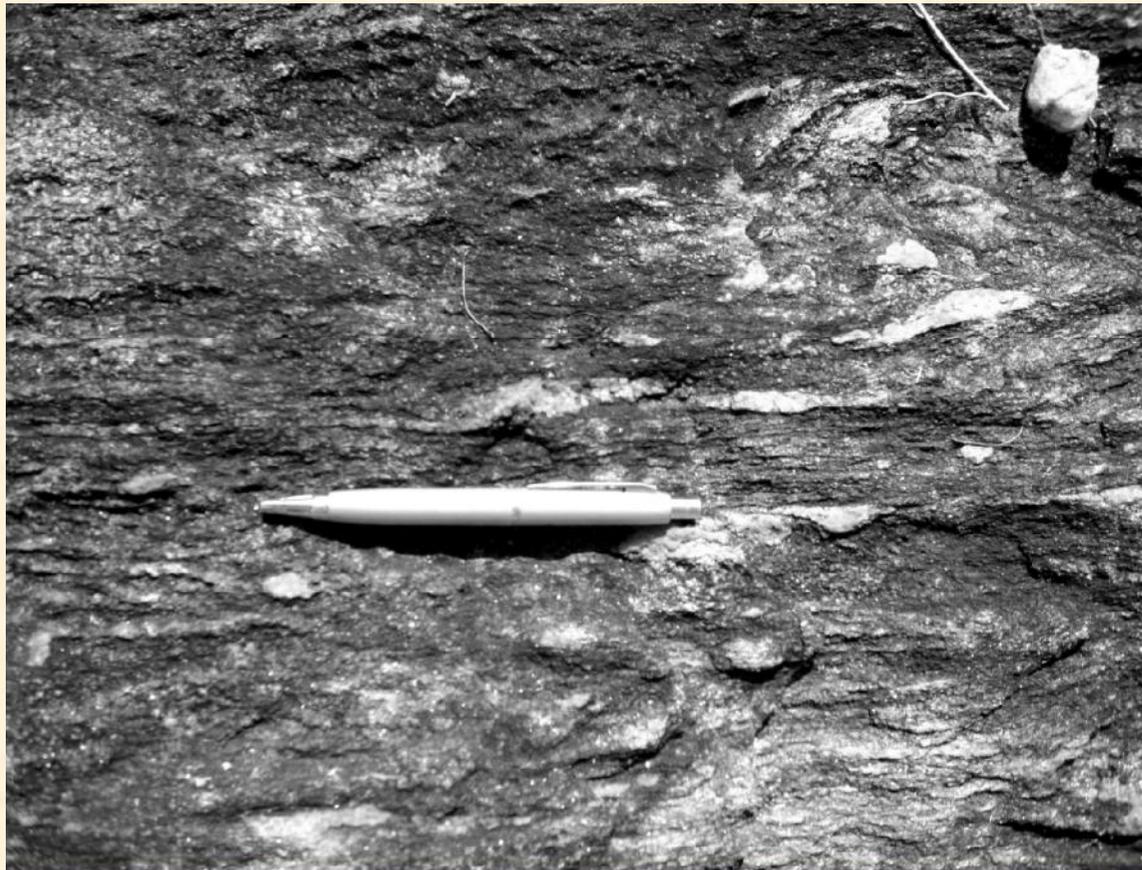


Estrutura colunar em soleira de diabásio em gnaiss do Complexo Atuba, Curitiba (PR). Foto: E. Salamuni

---

e. Forma de rods achatados

Termo usado para designar estruturas longas e lineares.



Ortognaisses do embasamento da Bacia do Parnaíba (TO).

Foto: E. Salamuni

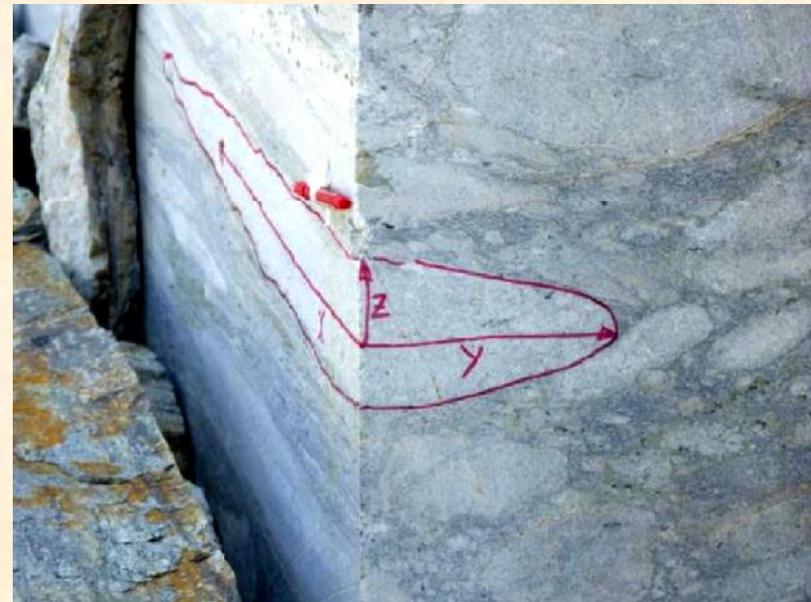
---

## f. Objetos geológicos estirados

Podem ser representados por seixos ou então boudins isolados como os da foto abaixo (em áreas com fósseis, os mesmos podem estar também estirados).



Conchas fósseis deformadas, Reefton (Nova Zelândia). Foto: Harold Wellman.



Seixos/concreções deformados em metassedimentos carbonáticos. Foto: estudante da UFRN.

### g. Boudins e/ou Mullions

Boudins cujos eixos X e Y tem, aproximadamente a mesma alongação. No caso de boudins são as necklines que caracterizam as lineações, produzidas pela extensão (ou distensão) de bandamento paralelo.

Havendo contraste entre camadas, em uma deformação importante tais camadas sofrem um estrangulamento.



Boudins em ortognaisse na Zona de Falha Paraíba do Sul, Rio de Janeiro (RJ).

Fotos: E. Salamuni.

### g. Mullions

Os mullions têm a mesma origem dos boudins, todavia podem ser considerados como estruturas que ocorrem no início da deformação e caracterizam-se pelo estrangulamento de uma camada, que possui contraste reológico com outras camadas que estão (ou estiveram) em contato com aquela deformada. Tais estruturas são muito comuns em estratos dobrados.



Mullion desenvolvido no argillito Creston (Grupo Purcell) próximo à crista de anticlínio, Montanhas Rochosas, Trench British Columbia (Canadá). Foto: Richard Stenstrom, Beloit College

---

### h. Estruturas em lápis

Possuem escalas pequenas, como de um lápis e formam clivagem de intersecção e intensa fissilidade. Em estratos dobrados a estrutura em lápis estão orientadas sub-paralelamente aos eixos das dobras.



Quartzito da Nappe Widhorn, Alpes Centrais, Valais (FR). Fonte: Ramsay e Huber (1987)

---

i. Slickensides ou estrias de atrito (comum em áreas rupteis)  
Produzidas pelo deslizamento ou microrrupturas no plano de falha, por vezes com crescimento de minerais, podendo estar associadas com descontinuidades de superfícies em forma de degraus.

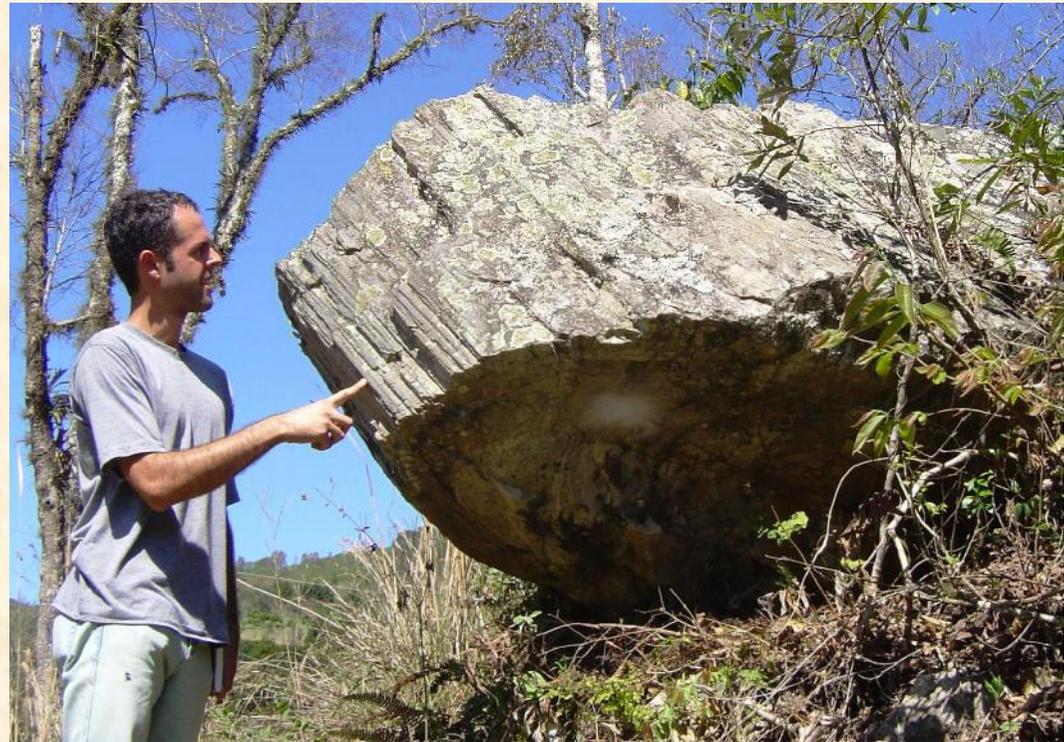
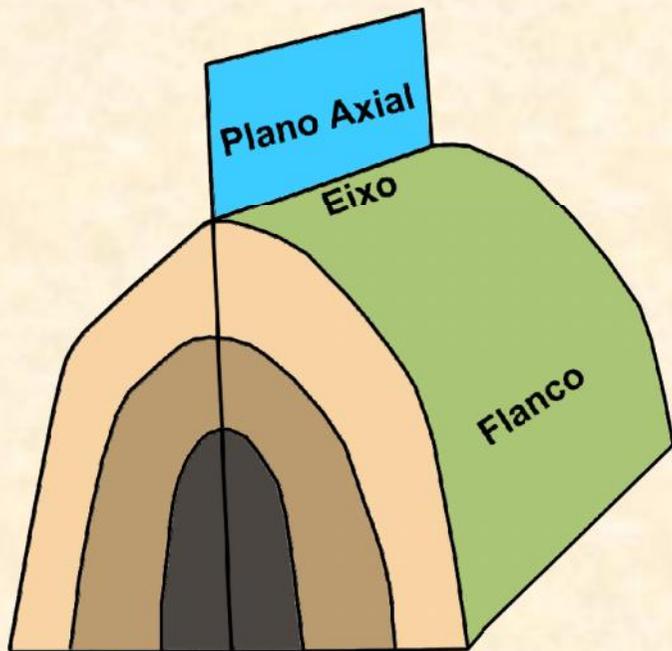


Slickenside e steps em gnaisses do Complexo Atuba, Pedreira Santa Felicidade – Curitiba (PR). Movimento relativo é sinistrógiro.  
Foto: E. Salamuni.

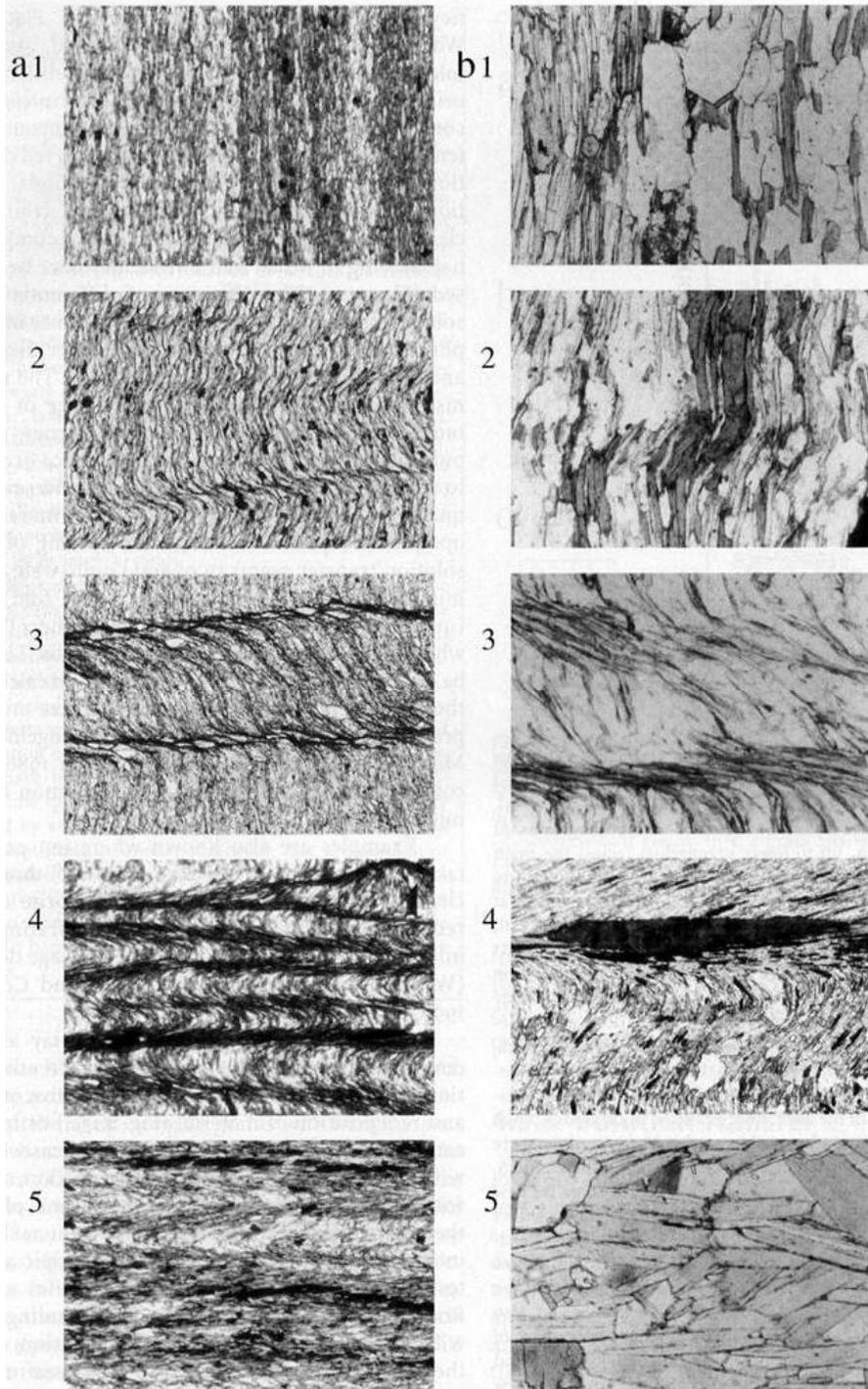
---

## TIPOS DE LINEAÇÕES SECUNDÁRIAS ( $L_b$ )

### a. Eixos de dobras (diversas escalas)



Quartzito do Complexo Setuva , Serra do Santana – Tunas (PR). Foto: E. Salamuni



b. Eixos paralelos de crenulação  
Estruturas lineares produzidas pelo eixo de microdobras ou crenulação, que são geradas pelo dobramento de rochas finamente "laminadas".

Geometrias comuns em foliações (em duas escalas de apresentação). Fonte:

---

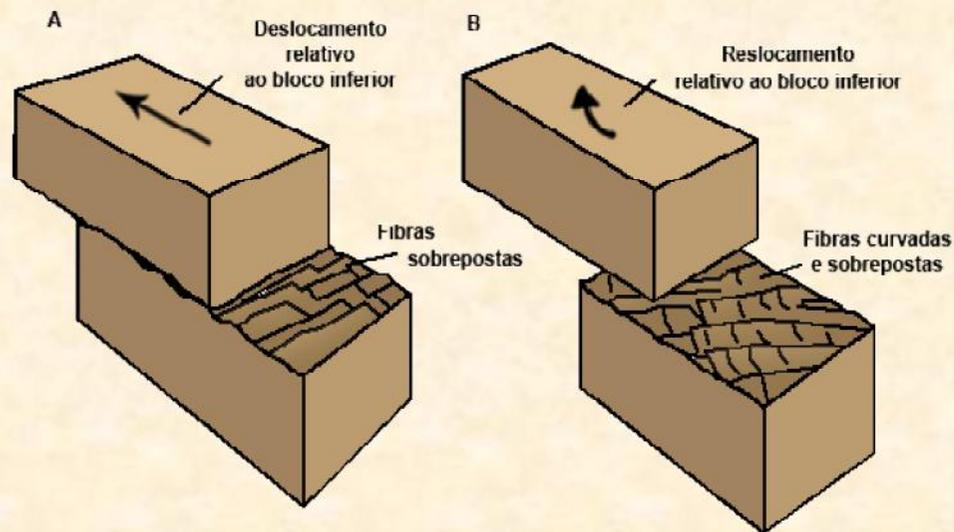
### c. Intersecção de planos

Quando dois conjuntos de estruturas planares (duas foliações ou duas clivagens de crenulação p. ex. ) se intersectam é criada a lineação de intersecção.



## INDICAÇÃO DA DIREÇÃO E SENTIDO DE MOVIMENTO

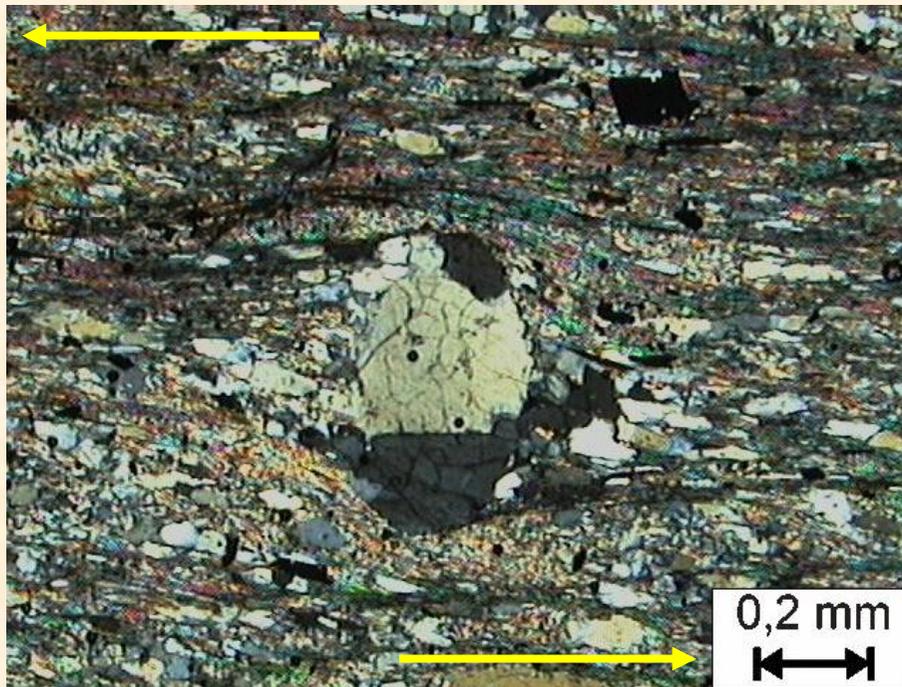
- Slickensides ou estrias de atrito: superfícies de falhas mostram marcadores estriados produzidos pelo movimento e atrito entre os blocos falhados. Estrias devido deslocamentos flexurais também estão nesta categoria.



Metagranito em Santo Antônio de Pádua (RJ). O plano de falha vertical indica um movimento transcorrente sinistral neste caso. Foto: E. Salamuni.

---

Lineação de estirramento mineral: Quando em zonas miloníticas, lineações minerais ou de estirramento mineral, tendem a se paralelizar com as bordas da zonas de cisalhamento, marcando a orientação do eixo X na deformação finita.

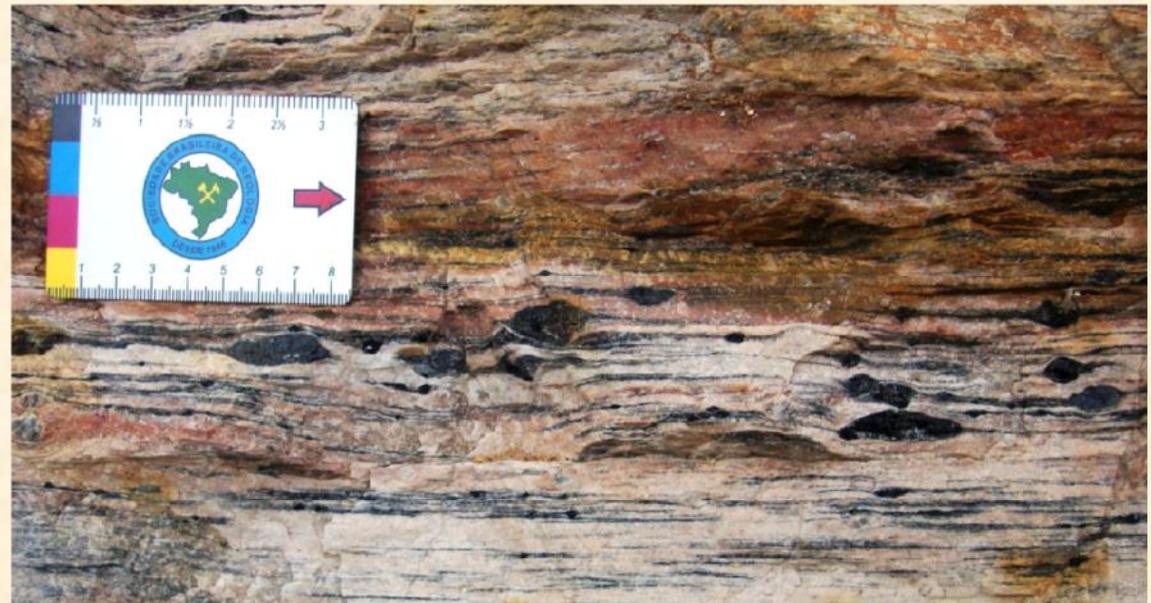


Indicação e movimento rotacional em lâmina de quartzito do Complexo Brusque (SC). Fotos: Fernanda Gonçalves



Quartzo-xisto do Complexo Setuva (PR). A assimetria das shear-folds indica um movimento dextrógiro. Foto: E. Salamuni

Metagranito em pedreira de Santo Antônio de Pádua (RJ). A assimetria dos pórfiroslastos indica um movimento transcorrente dextrógiro nesse caso. Foto: E. Salamuni.



# FOLIAÇÕES E LINEAÇÕES EM RELAÇÃO AO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO

---

Quase que invariavelmente as lineações são resultantes de deformação aplicada sobre os vários tipos de rochas.

- Nas deformações ou cisalhamento não-coaxial as lineações são coincidentes com o eixo "x" do elipsóide de deformação. Nas deformações coaxiais, que resultam em dobras, as lineações equivalem ao eixo "y" das estruturas.

- Na deformação por cisalhamento, as rochas podem apresentar quatro padrões de textura, que seguem o conceito do diagrama de Flinn:

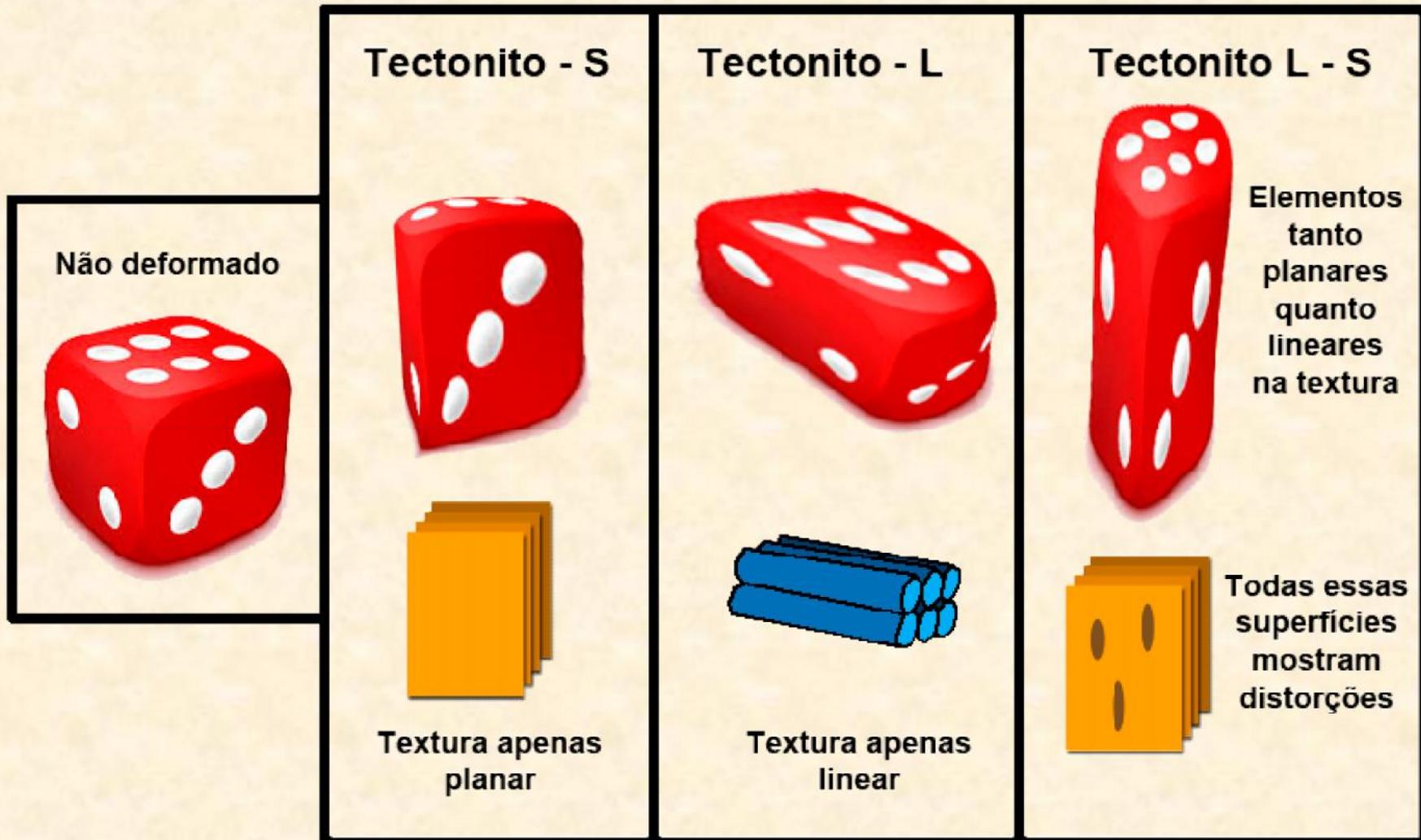
Tectonitos L: componentes fortemente alongados

Tectonitos S: componentes fortemente achatados

Tectonitos LS: alongamento é mais pronunciado que achatamento

Tectonitos SL: achatamento é mais pronunciado que alongamento

## Foliações e Lineações X Tectonitos



Tectonitos gerados em zonas de deformação dúctil (cisalhamento puro ou simples)

---

## RELAÇÕES ENTRE A DEFORMAÇÃO E O METAMORFISMO

- As rochas metamórficas apresentam texturas que demonstram uma complexa interação entre a deformação e as foliações (xistosidade e/ou clivagem ardosiana), materializada pela cristalização. O metamorfismo (temperatura e pressão) e a cristalização podem agir de forma independente. Os eventos metamórficos, tal como os episódios deformacionais, podem ser divididos em várias fases ou episódios.
- A elevação das isothermas da crosta, em função de um episódio tectônico, cria condições para ocorrer o metamorfismo regional. Cessado o evento tectônico as isothermas continuam elevadas no local, de tal sorte que as condições de temperatura para o metamorfismo continuam agindo, mesmo não existindo tensão tectônica no local.
- Desta forma um processo metamórfico pode iniciar concomitante a um evento de cisalhamento de baixo ângulo ou de dobramento, por exemplo, mas pode se estender no tempo geológico. Assim é normal considerar o metamorfismo como *sin a pós-tectônico*.

- 
- A correlação cronológica entre a cristalização e a deformação consiste na interpretação de relações temporais dentre os vários aspectos da deformação (foliações e lineações) e dos aspectos da cristalização (crescimento de novos minerais e recristalização de minerais pré-existentes). Esta correlação, que pode ser feita em nível mesoscópico ou microscópico, depende da:
    - a. Relação temporal entre os diferentes aspectos da deformação.
    - b. Relação temporal entre a cristalização de cada mineral e a evidência de alguma deformação.
    - c. Tempo relativo da cristalização de cada mineral.
  - Os estudos dos pórfiroblastos como marcadores da relação entre o metamorfismo e a deformação pode apresentar ótimos resultados, no que diz respeito à correlação entre estes dois processos.