

Zonas de cisalhamento 1

GMG0338 – Geologia Estrutural II

Prof. Claudio Salazar Mora

24/09/2020

Temas da aula

1. Definição, características gerais e tipologia
 2. Zonas de cisalhamento rúpteis e cinemática rúptil
-

3. Zonas de cisalhamento dúcteis:

3.1 Marcadores defletidos

3.2 Foliações S-C e S-C-C'

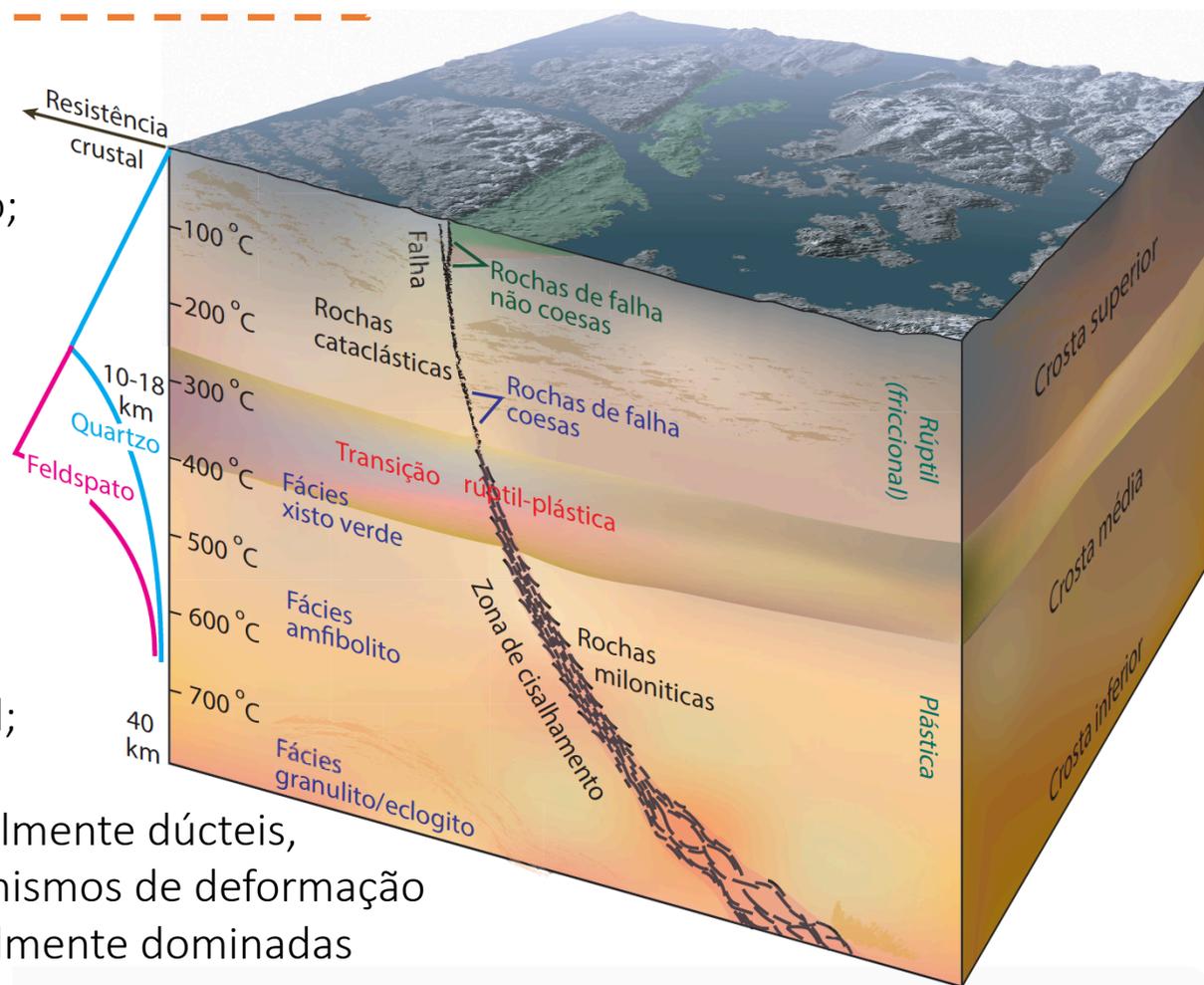
3.3 Sistemas de porfiroclastos

3.4 *Boudins* assimétricos e dobras em zonas de cisalhamento

1. Definição, características gerais e tipologia

Uma zona de cisalhamento é uma zona tabular onde a deformação é notavelmente maior que a deformação nas rochas ao seu redor.

- Falhas vs. zona de cisalhamento;
- Rúptil vs. dúctil (plástico);
- Transição rúptil-dúctil (10-15km), depende do gradiente térmico;
- Resistência da crosta antes e depois da transição rúptil-dúctil;



As **zonas de cisalhamento** são geralmente dúcteis, porém elas podem envolver mecanismos de deformação dúctil e rúptil. Já as **falhas** são totalmente dominadas por mecanismos rúpteis.

1. Definição, características gerais e tipologia

Zona de cisalhamento ideal deformando uma malha com dois planos marcadores (verde e vermelho).

Note que os quadrados da malha são deformados, assim como as elipses de deformação.

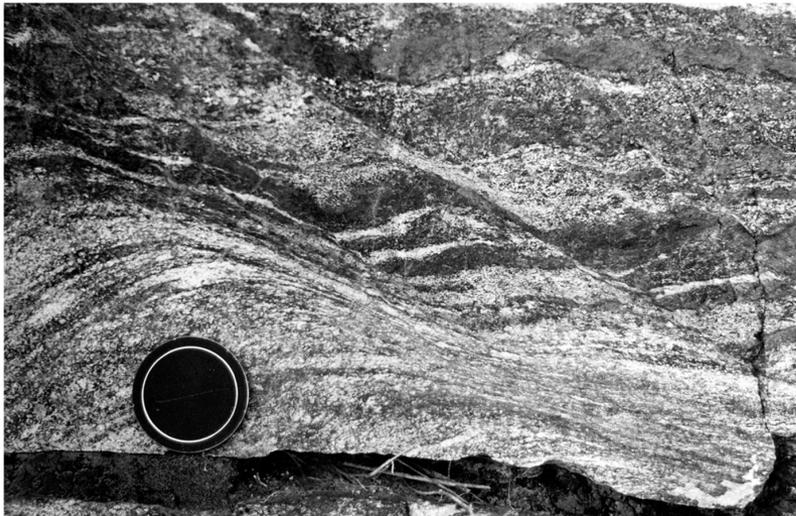
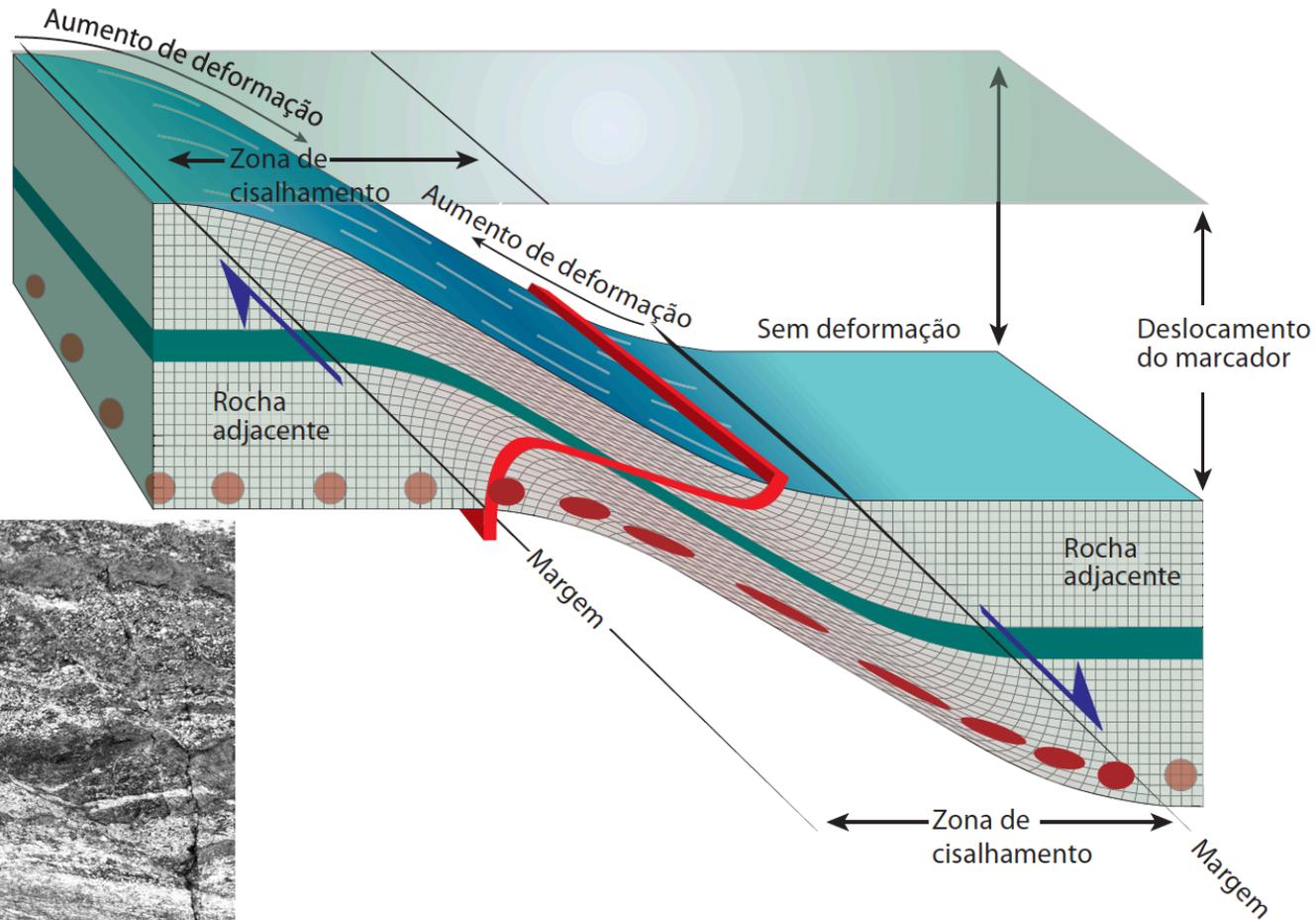
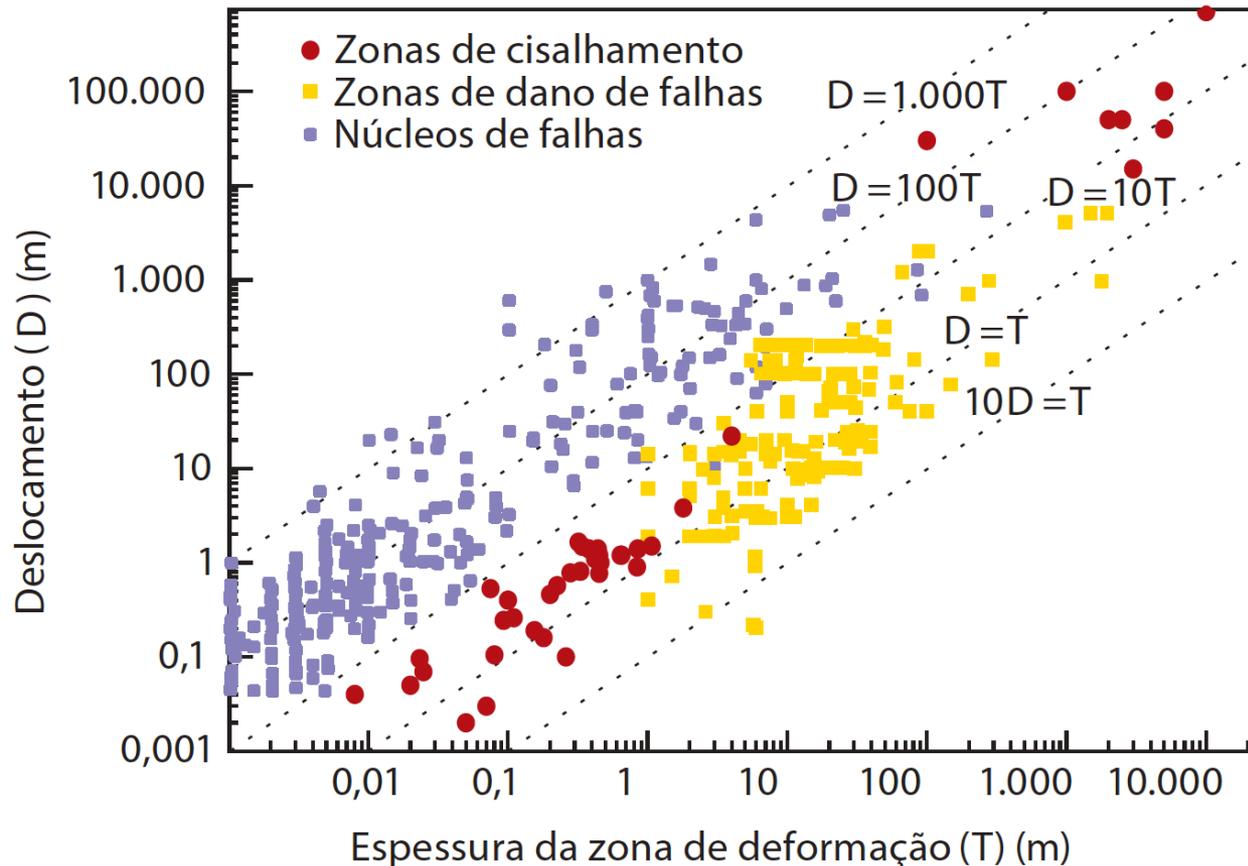


Figure 10.20a
Photograph by S.J. Reynolds

A deformação é máxima na parte central da zona de cisalhamento

1. Definição, características gerais e tipologia

Ainda sobre as características gerais, temos **espessura** e **deslocamento** das zonas de cisalhamento.



As **zonas de cisalhamento dúcteis** são mais espessas do que **núcleos de falhas** para um dado rejeito.

1. Definição, características gerais e tipologia

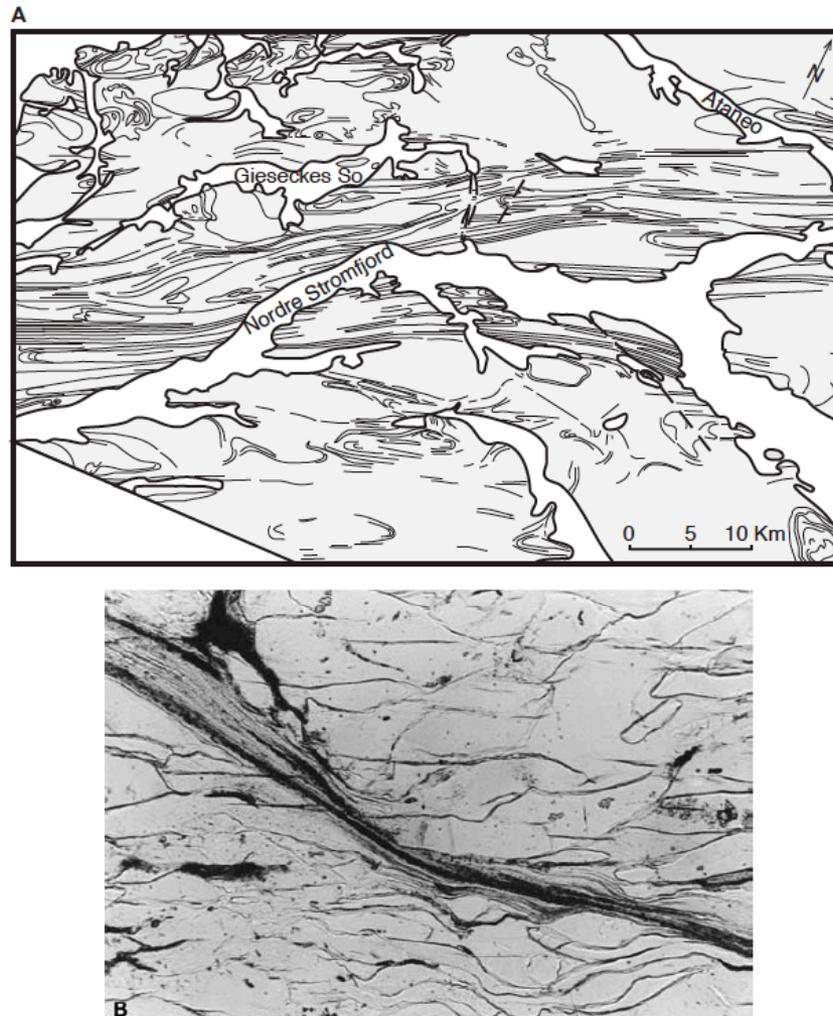
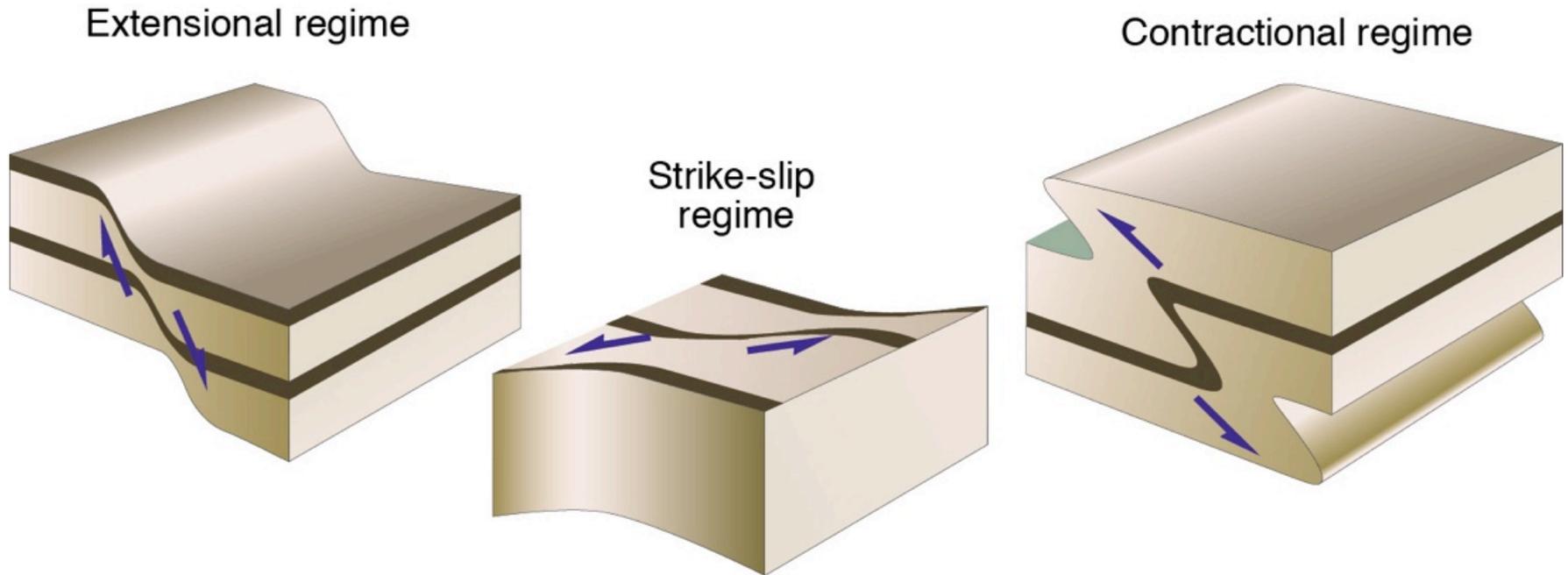


Figure 10.4 The big and little of shear zones: (A) Map of lithologic boundaries within and near the Nordre Stromfjord shear zone, Greenland. [From Sorensen, K., *Journal of Geophysical Research*, v. 88, no. B4, copyright © 1983 by American Geophysical Union.] (B) Shear zone in a thin section of experimentally deformed aplite. Shear zone is approximately 0.1 mm wide. [Photomicrograph courtesy of Jan Tullis.]

1. Definição, características gerais e tipologia

Zonas de cisalhamento e regimes tectônicos:

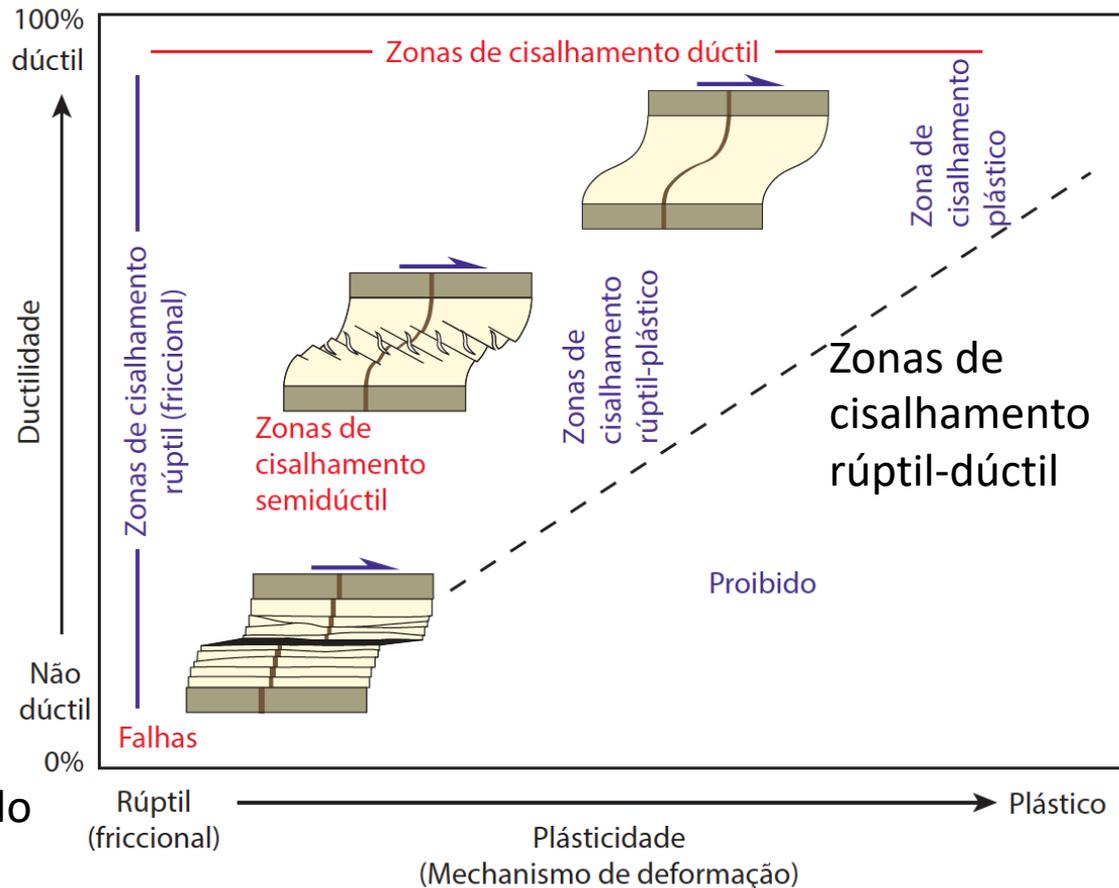


Dependendo do regime tectônico, há cisalhamento **normal**, **transcorrente** ou **reverso**. De um modo geral, as ZC extensionais e contracionais apresentam **baixo ângulo** de mergulho ($<30^\circ$) e as ZC transcorrentes tem **alto ângulo**.

1. Definição, características gerais e tipologia

Uma das principais classificações das zonas de cisalhamento leva em consideração seu caráter **rúptil** ou **dúctil**.

ZC dúcteis, sem faturamento e superfície de deslizamento

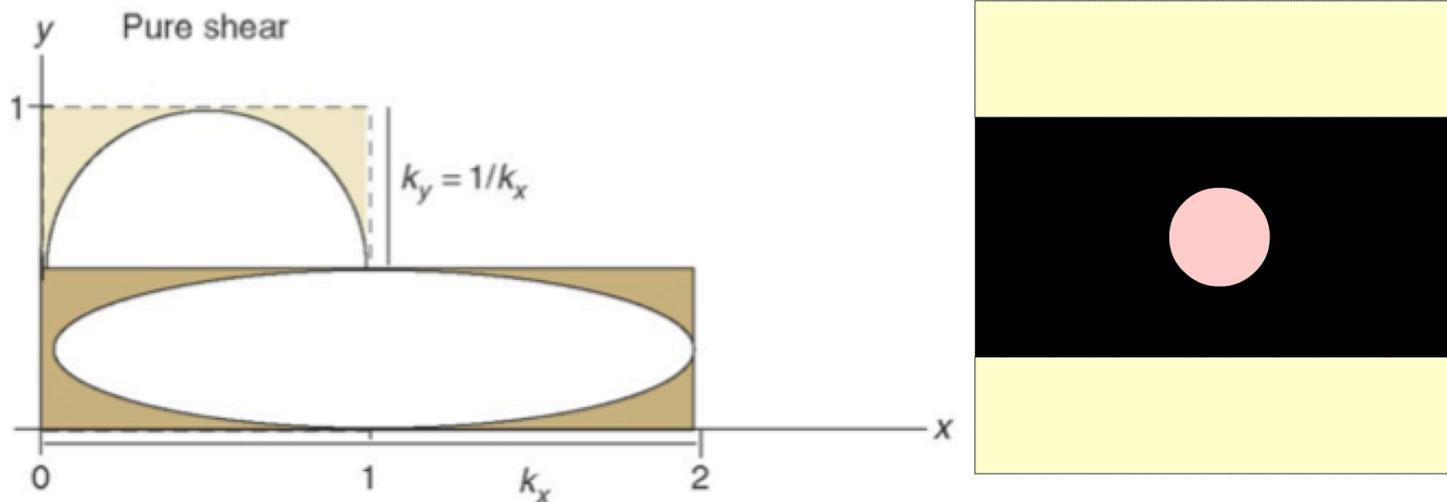


Falhas ou ZC rúpteis, gerando faturamento e superfície de deslizamento

1. Definição, características gerais e tipologia

Uma outra classificação de zonas de cisalhamento muito útil é em relação à **cinemática**, isto é, com base **no movimento relativo** entre os blocos, gerando **cisalhamento simples**, **cisalhamento puro**, **sub-simples**...

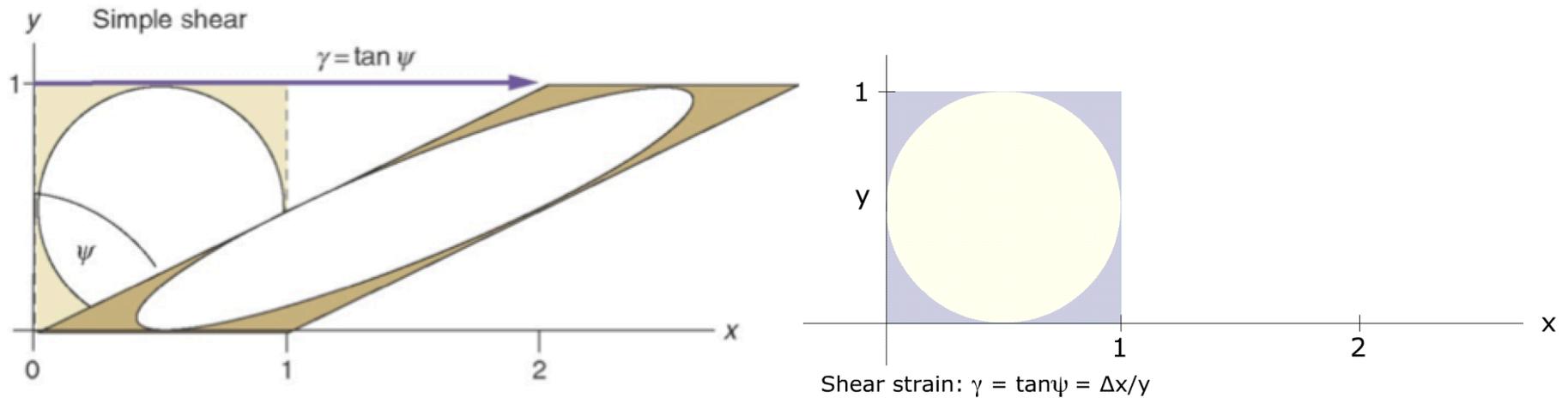
O cisalhamento puro



- O **cisalhamento puro** é uma deformação coaxial, ou seja, as linhas ao longo dos eixos principais de deformação mantêm a mesma orientação de seu estado não deformado. No caso da figura, paralelo aos eixos X (estiramento) e Y (encurtamento);
- Não envolve ROTAÇÃO!
- Equivale ao encurtamento em uma direção (no caso, Y) compensado por uma extensão em outra direção (no caso, X), ou *vice-versa*!!!

1. Definição, características gerais e tipologia

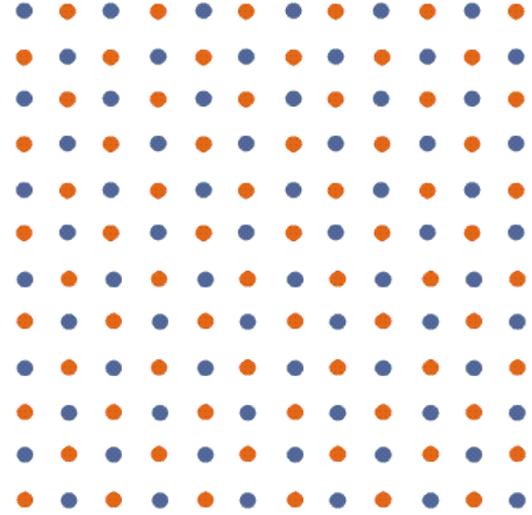
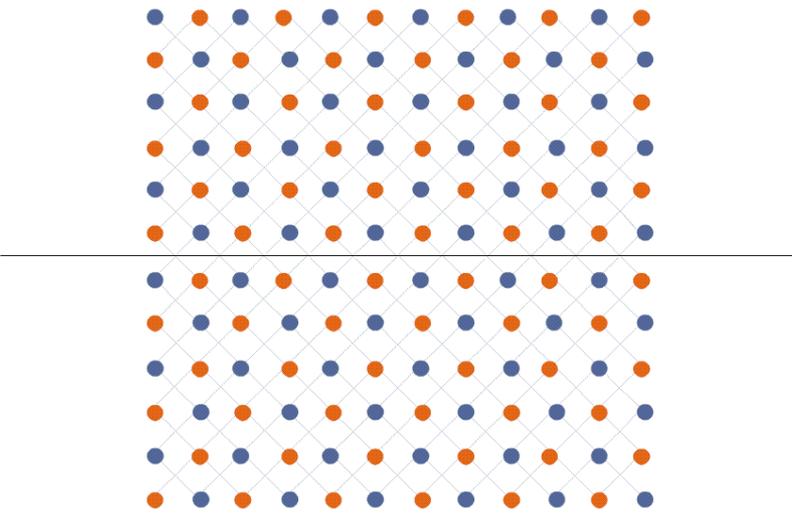
O cisalhamento simples



- O **cisalhamento simples** é uma deformação NÃO-COAXIAL, o que significa que as linhas inicialmente paralelas aos eixos principais de deformação são rotacionadas;
- É um cisalhamento ROTACIONAL!
- Geramos um ângulo entre a linha inicial em Y e a linha final oblíqua!
- No cisalhamento simples, a orientação dos eixos principais de deformação varia progressivamente, de acordo com diferentes quantidades de deformação.

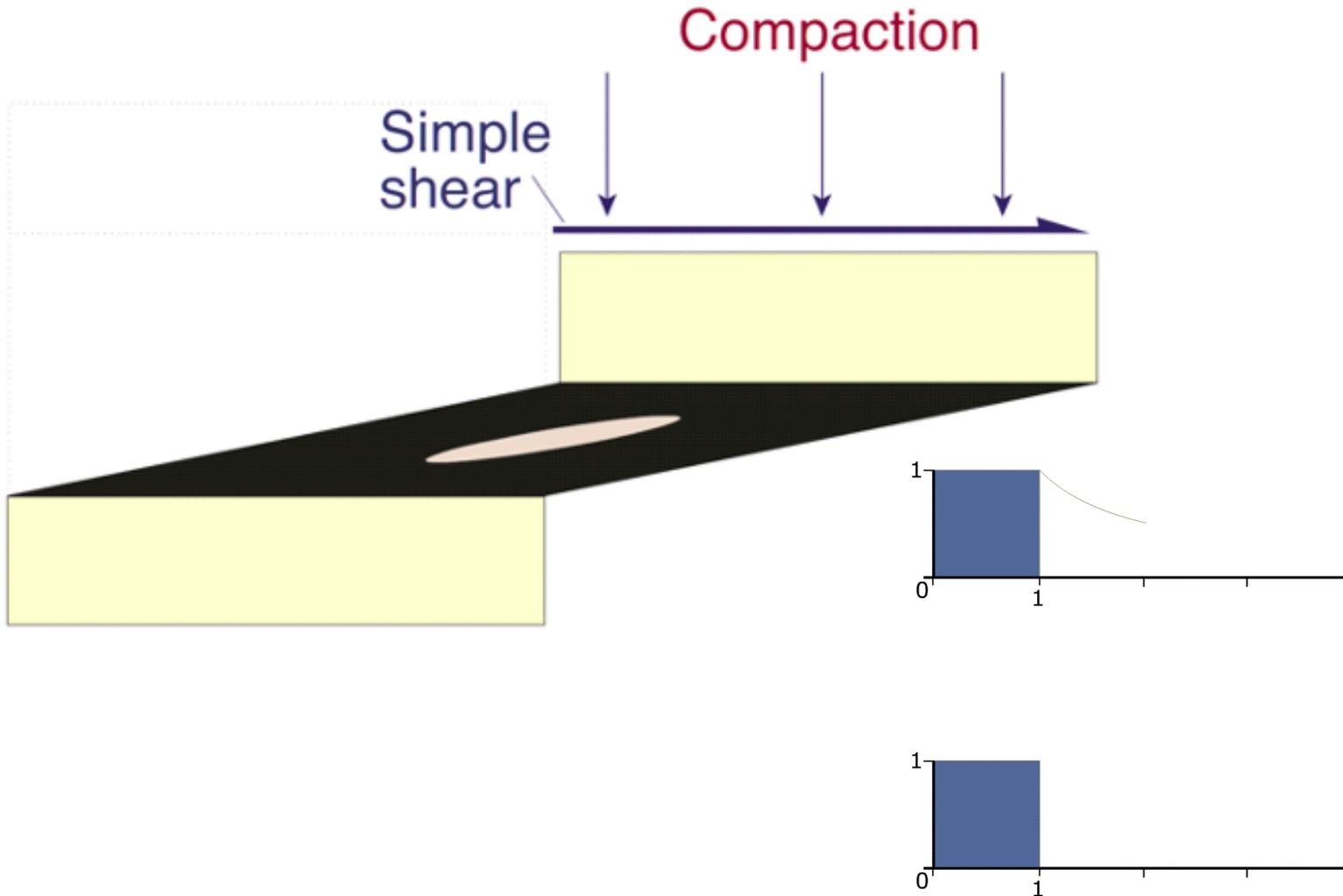
1. Definição, características gerais e tipologia

Trajetória das partículas durante a deformação por cisalhamento simples e cisalhamento puro



1. Definição, características gerais e tipologia

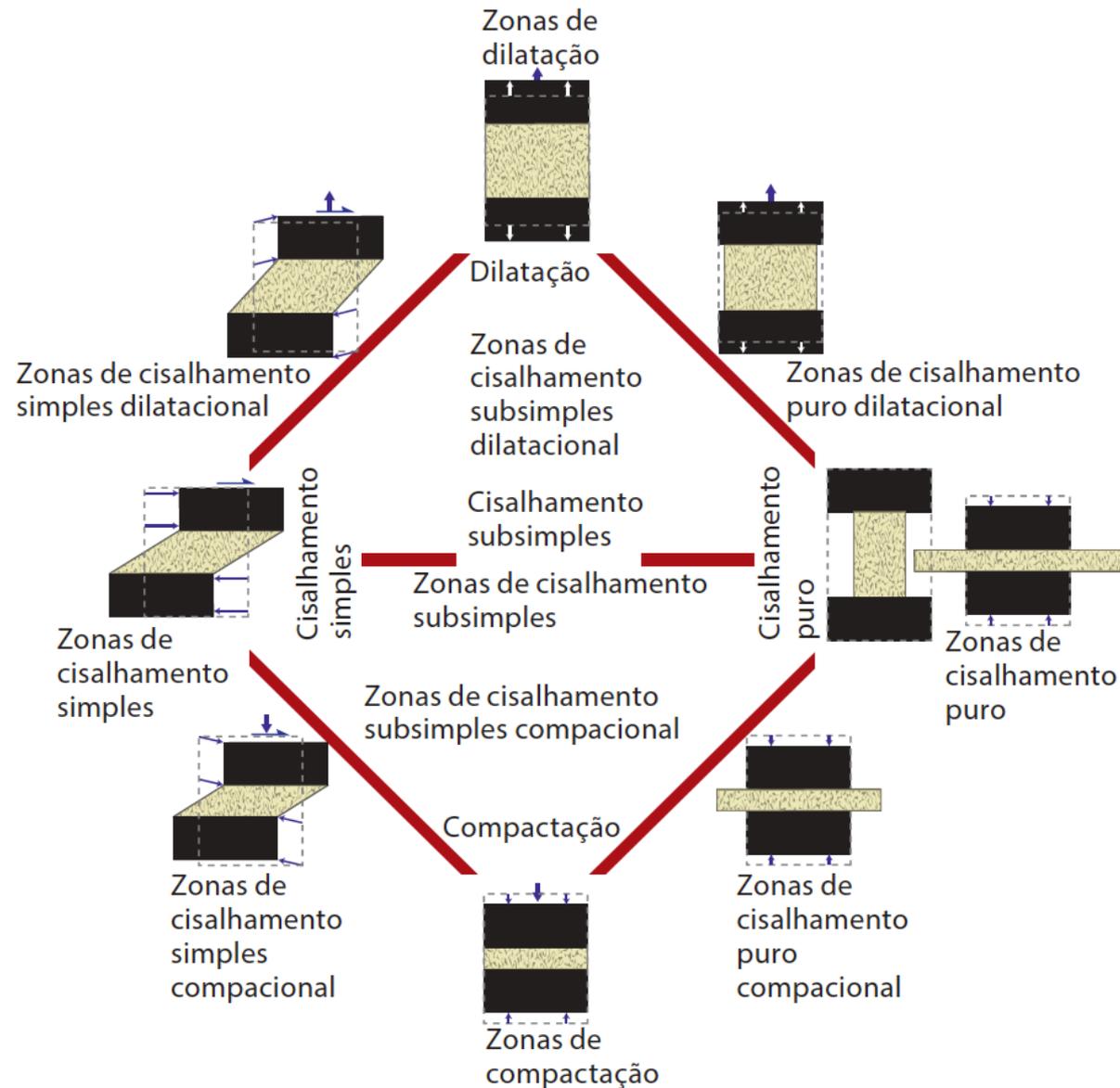
O cisalhamento sub-simples: zonas de cisalhamento sub-simples correspondem à deformação plana onde ocorrem simultaneamente os cisalhamentos simples e puro.



1. Definição, características gerais e tipologia

Grande parte das zonas de cisalhamento são dominadas pelo cisalhamento simples, mas há um espectro 2-D desde zonas de compactação, passando por zonas de cisalhamento simples, até zonas de dilatação.

Classificação cinemática de zonas de cisalhamento



1. Definição, características gerais e tipologia

1.1 Como as zonas de cisalhamento crescem?

As zonas de cisalhamento nascem e crescem a partir de pequenas bandas de cisalhamento que se interconectam, do mesmo modo que falhas crescem a partir de fraturas menores.

Geralmente, zonas de cisalhamento espessas e longas tendem a apresentar maiores deslocamentos. Mas como elas evoluem e crescem?

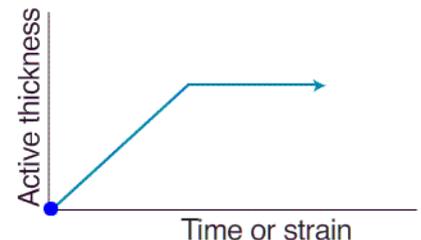
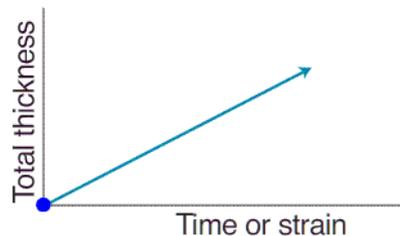
Existem 4 modelos de referência (mas na natureza é mais complicado do que isso) para observarmos como elas crescem:

Tipo 1:

- a ZC expande em direção às suas paredes, aumentando sua espessura;
- a parte central é deixada abandonada e a deformação se concentra nas bordas



Type I



1. Definição, características gerais e tipologia

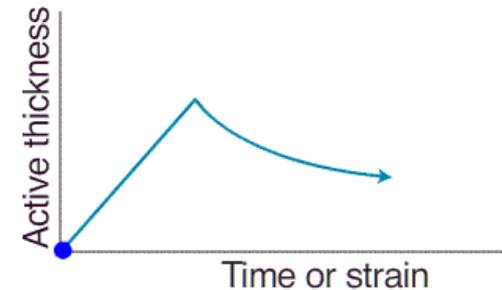
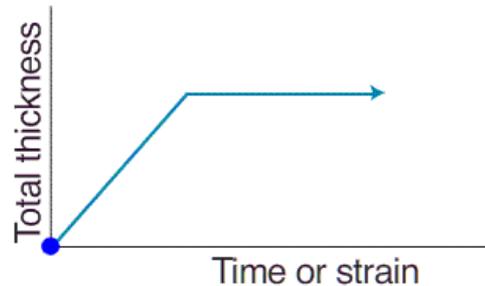
1.1 Como as zonas de cisalhamento crescem?

Tipo 2:

- a ZC expande somente por um período de tempo;
- as margens são deixadas para trás e toda deformação é concentrada no centro da ZC



Type II

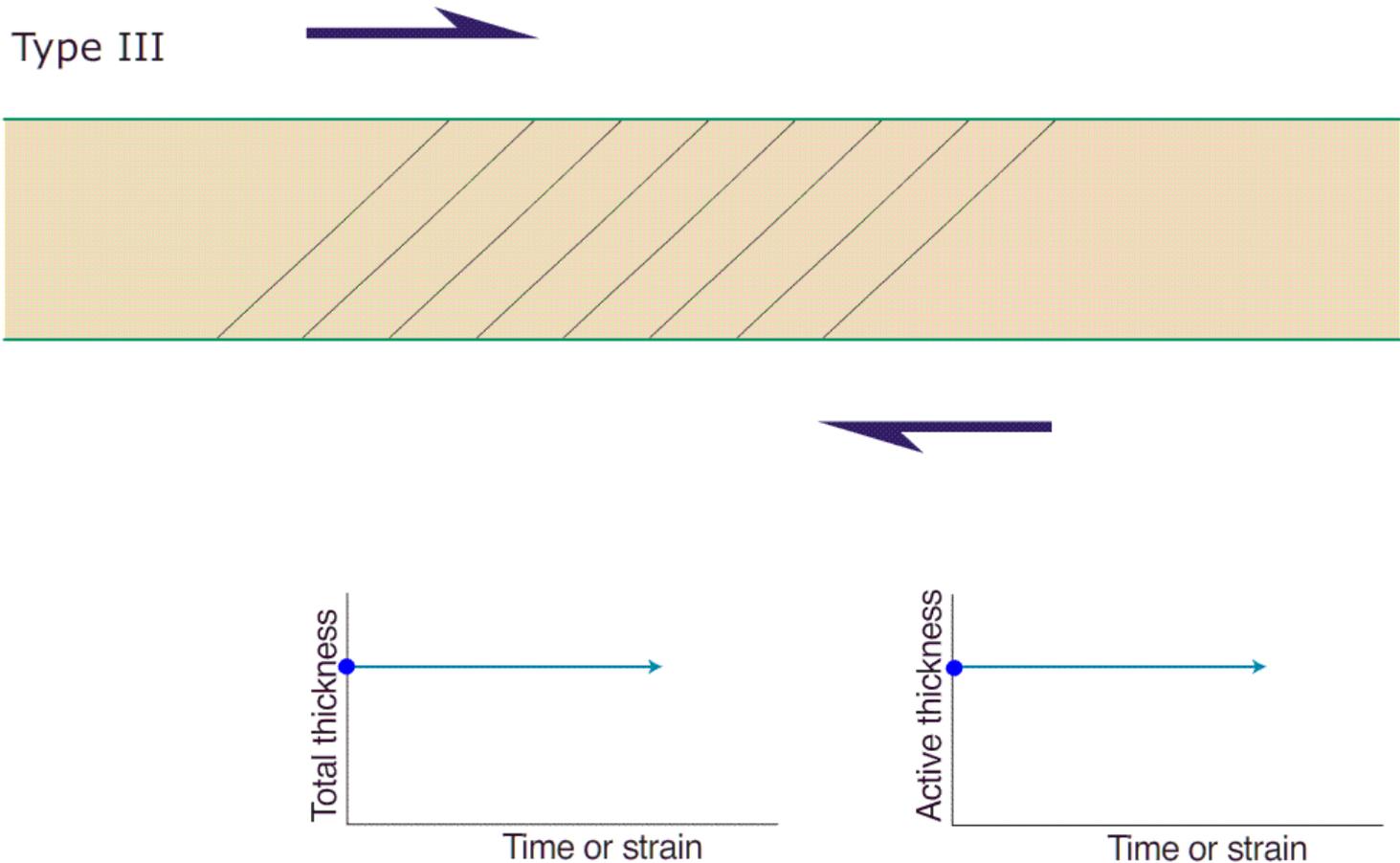


1. Definição, características gerais e tipologia

1.1 Como as zonas de cisalhamento crescem?

Tipo 3:

- a ZC se inicia já com uma certa espessura;
- a espessura é mantida constante e toda a ZC é sempre ativa



1. Definição, características gerais e tipologia

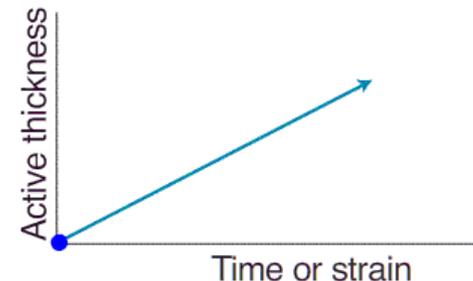
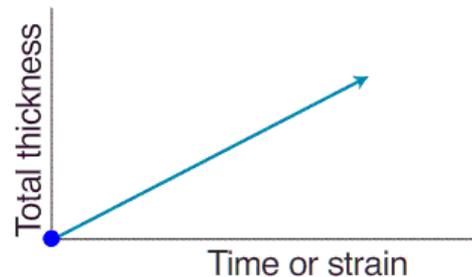
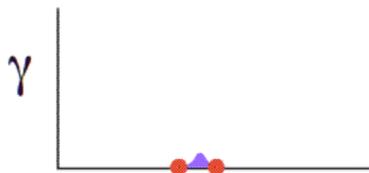
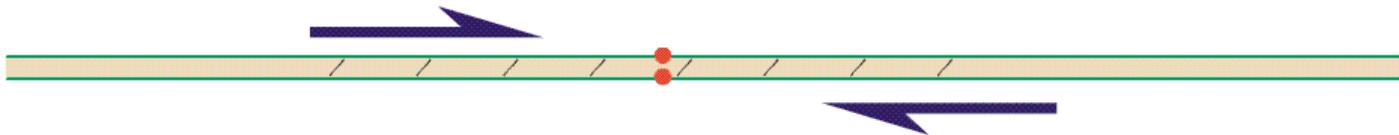
1.1 Como as zonas de cisalhamento crescem?

Tipo 4:

- a ZC se expande de forma contínua durante sua evolução;
- a ZC é sempre ativa

Enfim, ZC naturais podem ser uma junção de todos esses tipos, e variar de acordo com fluidos, rqs metamórficas, taxas de deformação e condições P-T.

Type IV

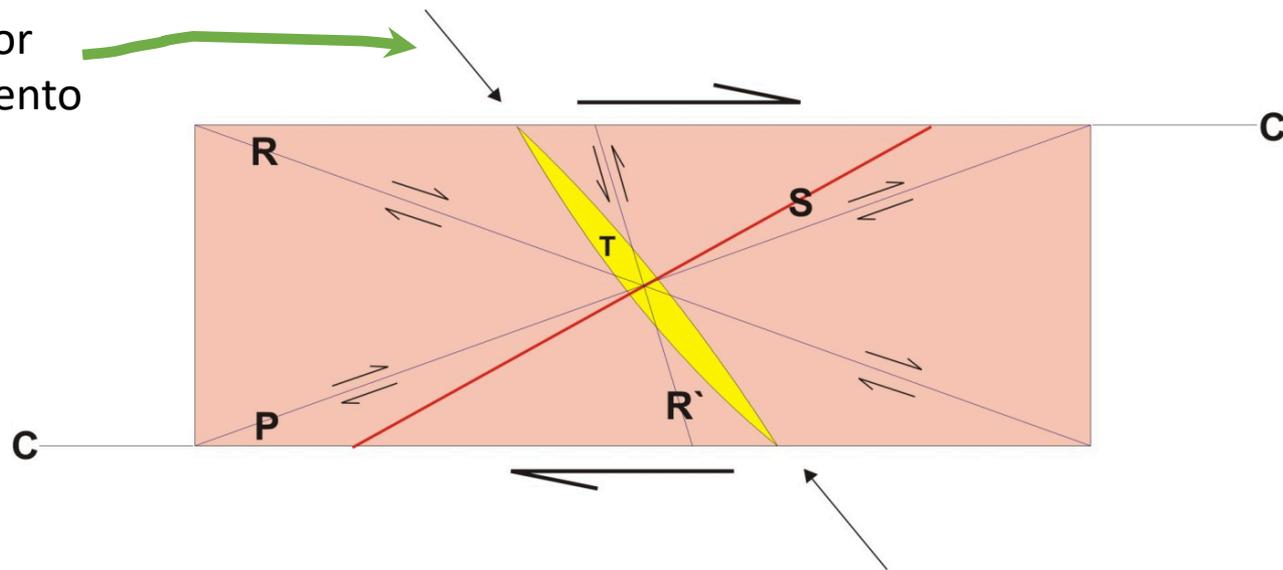


2. Zonas de cisalhamento rúpteis e rúpteis-dúcteis

Na transição rúptil-dúctil (~10 a 15 km em rochas graníticas), pode ocorrer a co-atuação de mecanismos de deformação rúpteis e dúcteis, gerando estruturas complexas que refletem essa contemporaneidade.

Cinemática Riedel – fraturas de cisalhamento e fendas de tração

σ_1 ou maior encurtamento



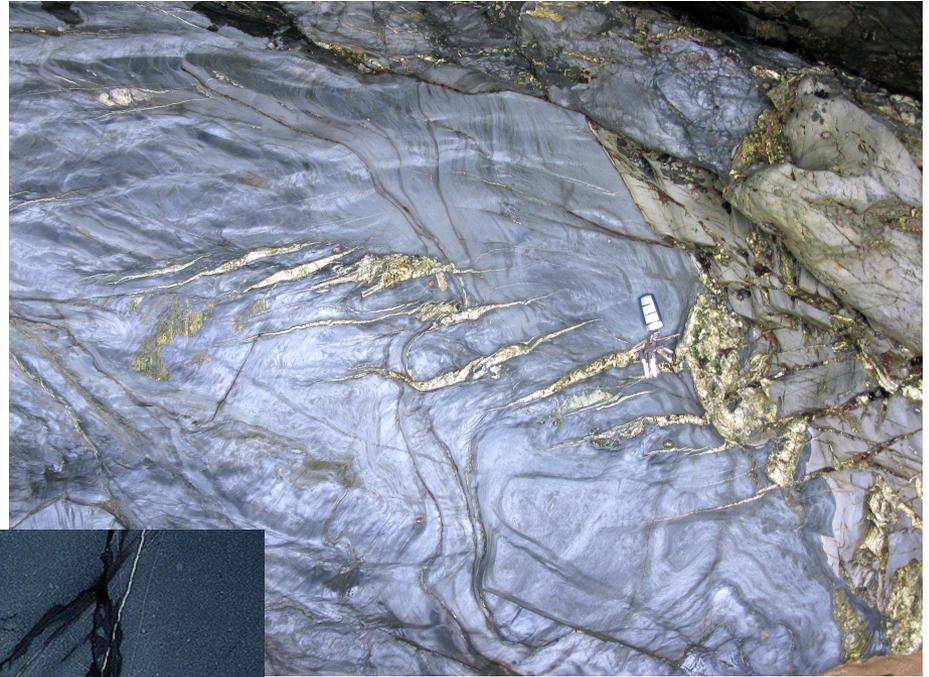
Com o acúmulo do cisalhamento associado ao maior esforço (ou encurtamento), formam-se, as seguintes famílias de fraturas de cisalhamento:

- 1) Fraturas R e, posteriormente, 2) fraturas P. Ambas com baixo ângulo com a parede da ZC e sendo sintéticas ao movimento geral;
- 3) Fraturas R' (ou *anti-Riedel shear fractures*), com maior ângulo em relação à ZC e antitética;
- 4) Fendas T, que são fraturas extensionais do tipo veio, paralelas ao maior encurtamento e ortogonais ao menor encurtamento (estiramento)

2. Zonas de cisalhamento rúpteis e rúpteis-dúcteis

As fendas-T, associadas ao cisalhamento simples, formam interessantes estruturas que misturam aspectos dúcteis:

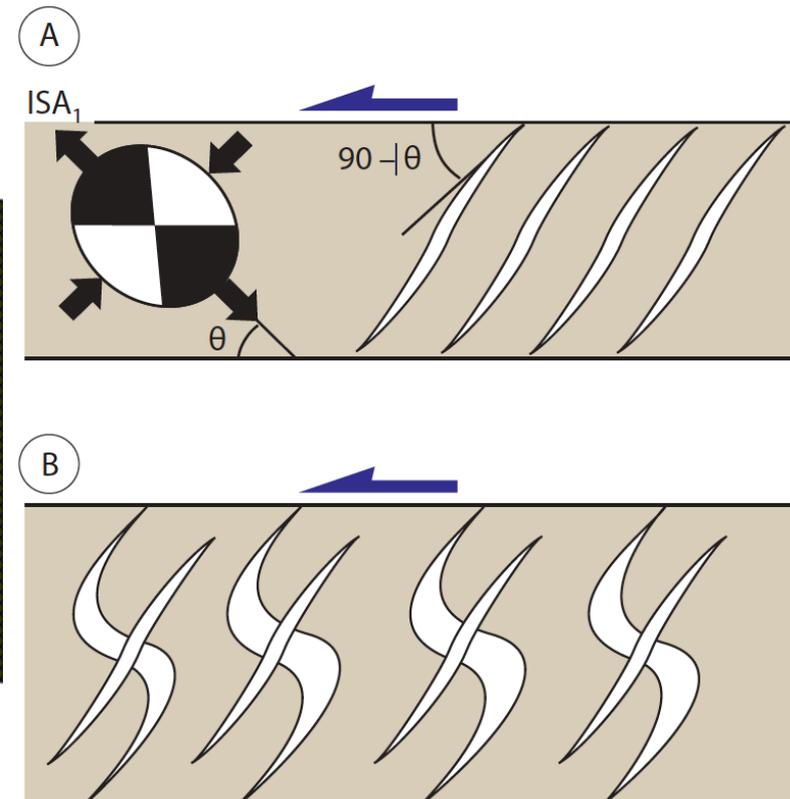
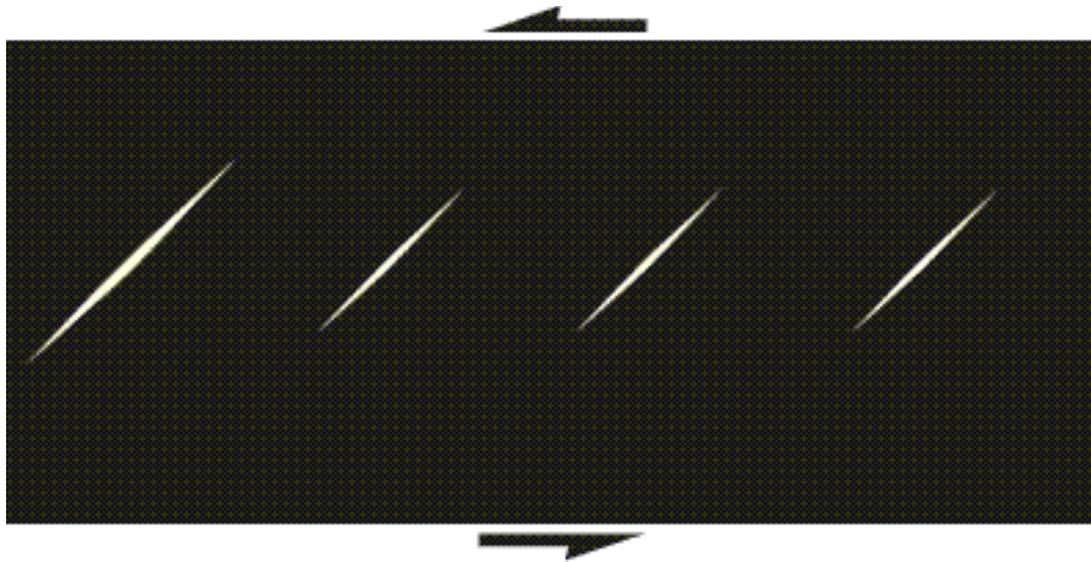
Veios en echelon
rotacionados, Cornwall UK.



Veios en echelon
preenchidos por calcopirita
em estratos pelíticos (UK).

2. Zonas de cisalhamento rúpteis e rúpteis-dúcteis

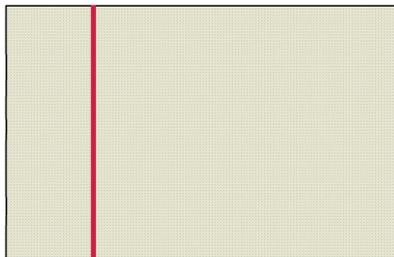
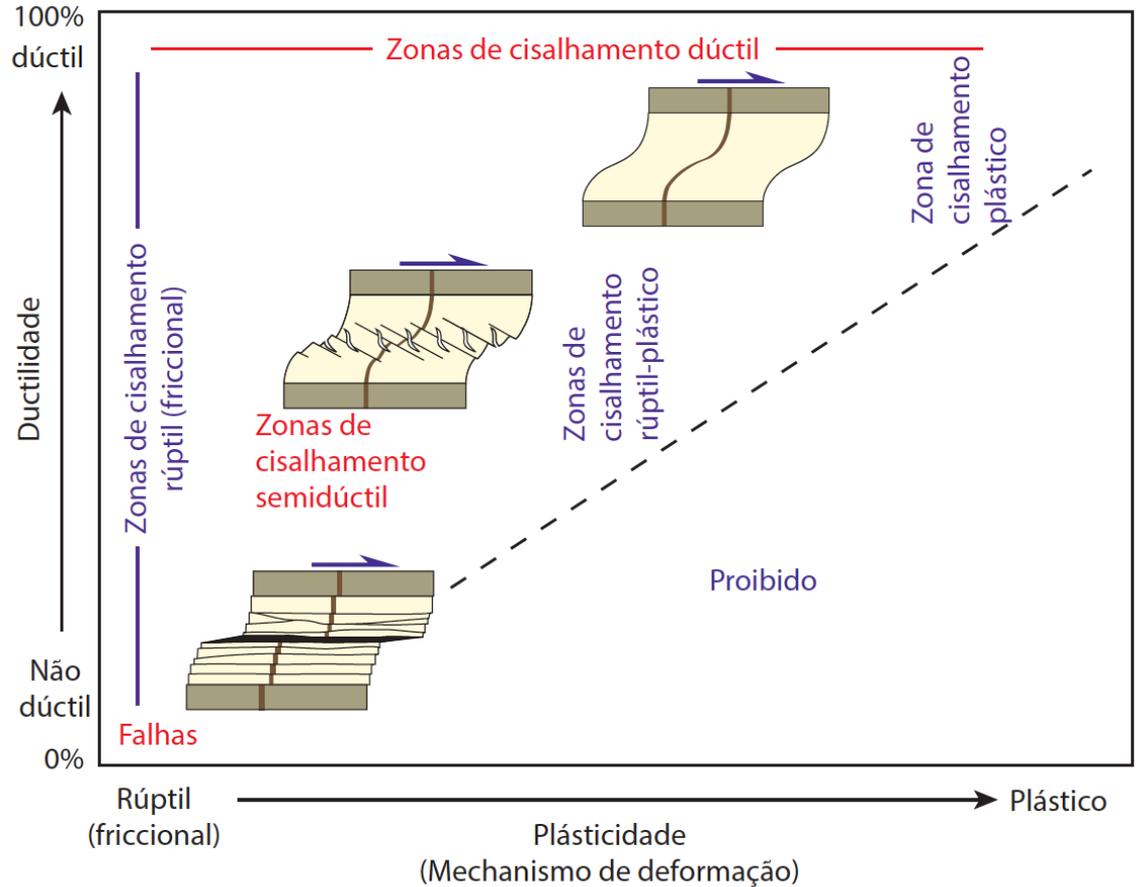
1. Veios (*tension gashes*) escalonados (*en echelon*), paralelos a σ_1 !
2. Rotação devido ao cisalhamento simples progressivo;
3. Configuração final que indica o sentido de cisalhamento!



3. Zonas de cisalhamento dúcteis/plásticas

Sobre os termos dúctil e plástico:

O termo dúctil está relacionado à continuidade de um marcador dentro de uma zona de cisalhamento. Ex. o dique vertical, que perde a continuidade em ZC rúptil e mantém sua continuidade (deformada) em ZC dúctil.



Já o termo *plástico* relaciona-se à deformação **não-recuperável** sem que seja atingido o faturamento (superfície de deslizamento)

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

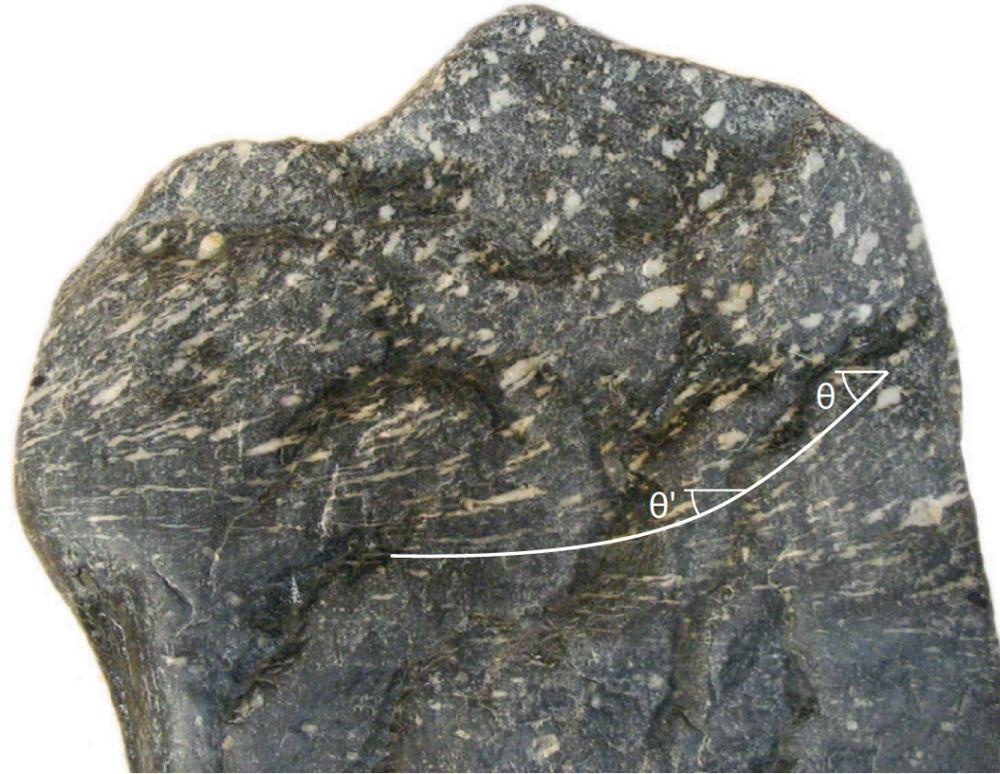


Figure 10.20b
Photograph by G. H. Davis

Observe como a foliação dessa rocha metassedimentar é infletida e forma uma zona de cisalhamento sub-horizontal.

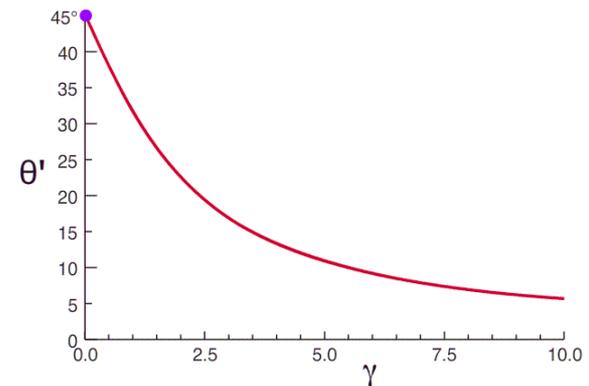
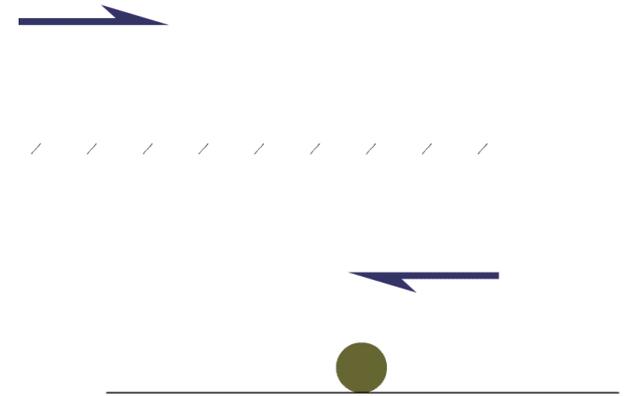
3. Zonas de cisalhamento dúcteis

Uma rocha, inicialmente isotrópica, com o desenvolvimento de uma zona de cisalhamento dúctil/plástica, **gera uma foliação**.



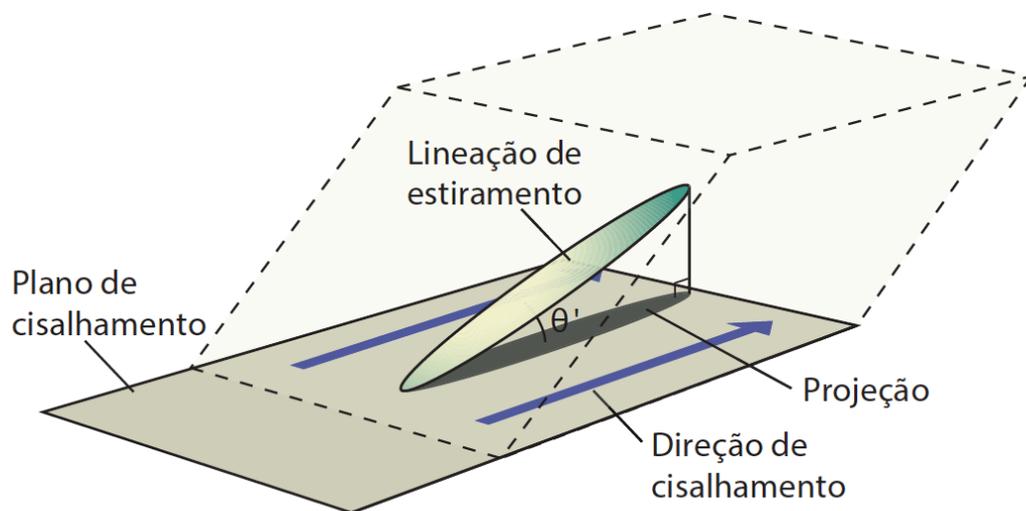
ZC dúctil formada em metabasalto, onde agregados de feldspato se tornam progressivamente mais deformados em direção ao interior da ZC.

O ângulo teta com a foliação inicial é de $\sim 45^\circ$, e vai diminuindo em direção ao centro da ZC, passando a ser θ' .

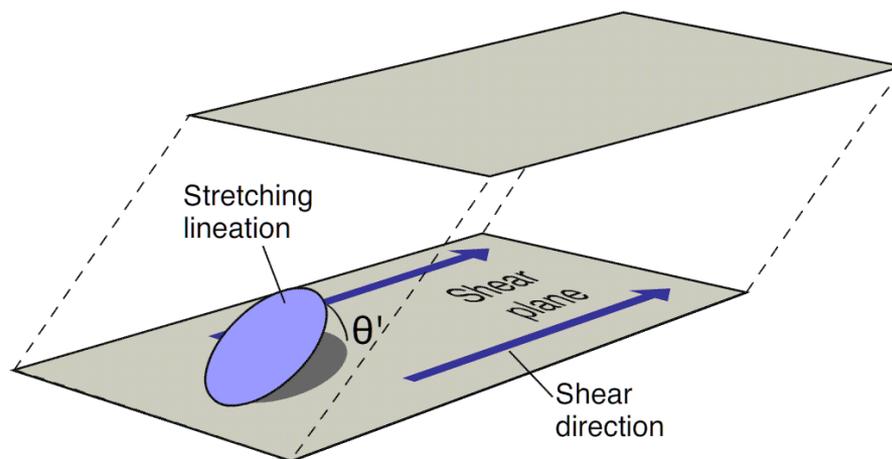


3. Zonas de cisalhamento dúcteis

Juntamente com a foliação, desenvolve-se uma **lineação de estiramento** que indica o eixo X do elipsoide de deformação, associado com o maior estiramento e na direção do cisalhamento.



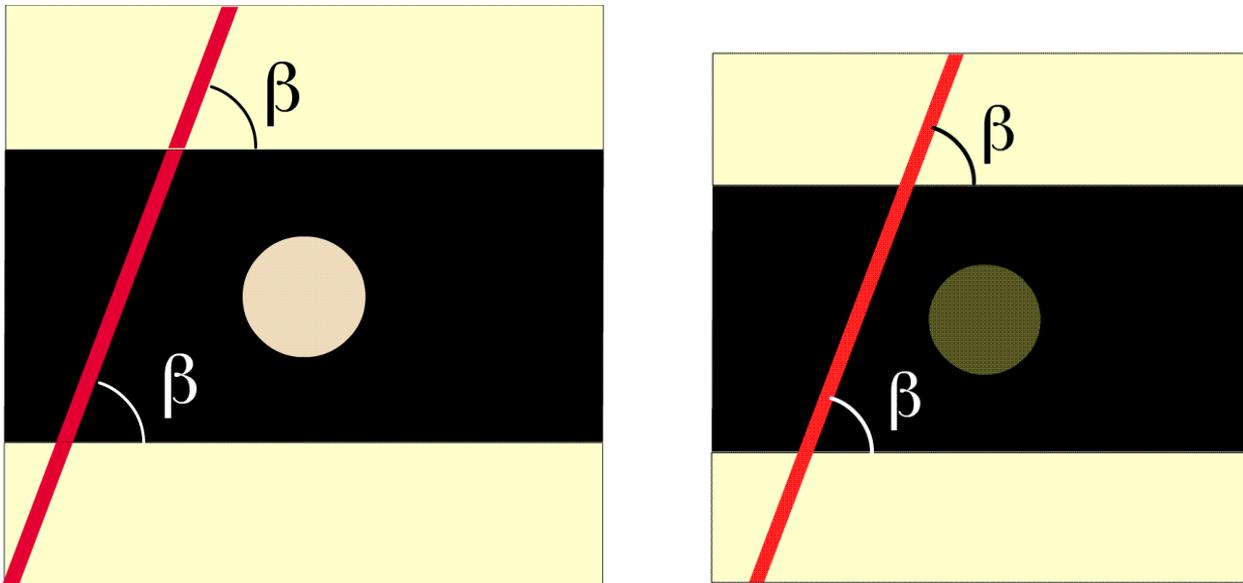
Mais para frente, veremos a importância desse par composto por foliação e lineação para o estudo de cinemática das rochas de zonas de cisalhamento.



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.1 Marcadores passivos e ativos

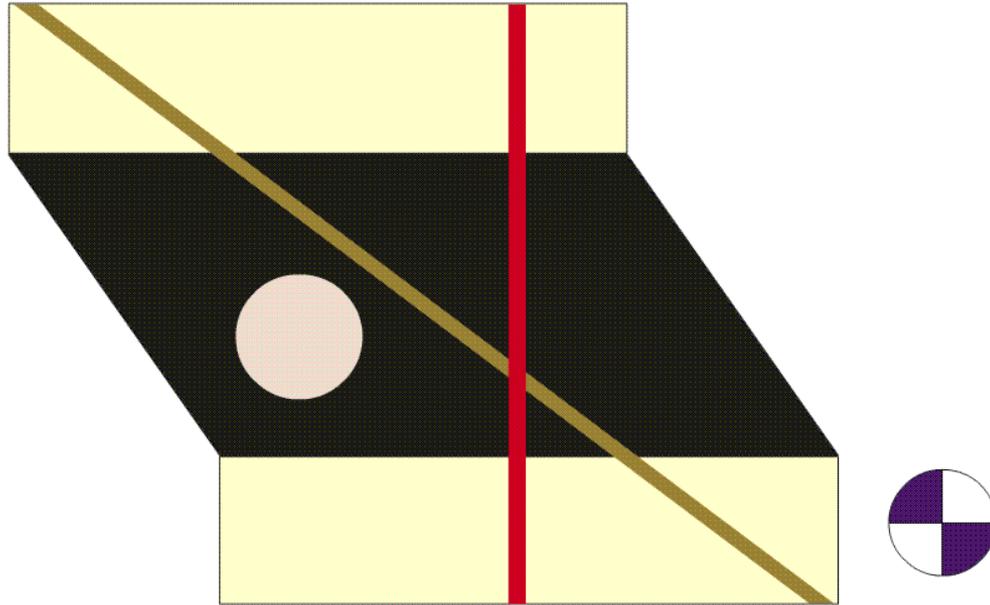
A importância de **marcadores passivos*** durante o cisalhamento puro e simples:



*Marcadores passivos não apresentam diferença de competência com a matriz. Já os ativos, são mais competentes do que a matriz.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.1 Marcadores passivos e ativos



O caso de marcadores ativos. Dependendo de sua orientação com o esforço máximo de encurtamento, podemos gerar dobras assimétricas e até dobras rompidas. OU também, podemos gerar *boudins*.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'

Em zonas de cisalhamento dúcteis, são geradas rochas miloníticas. Veremos essas rochas na aula que vem, mas é importante saber que elas têm uma estrutura muito importante chamada **foliação milonítica**.

--> Uma foliação milonítica é marcada por minerais ou agregados de minerais em arranjos paralelos, podendo ter estruturas anastomosadas e que envolvem grãos pré-existentes, chamados porfiroclastos.

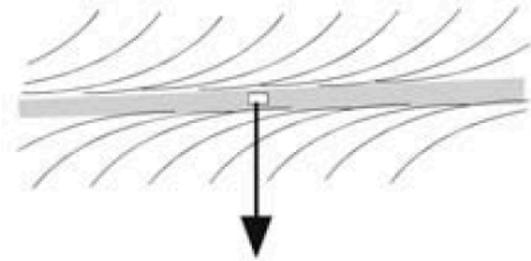
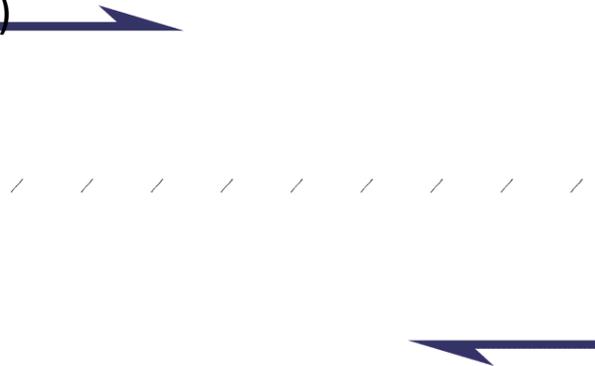
Transição de um granito milonítico (na parte superior da foto) para um granito ultramilonítico (na parte inferior da foto).



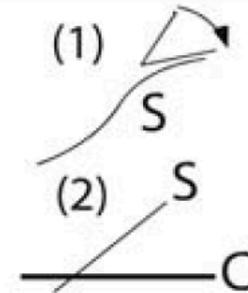
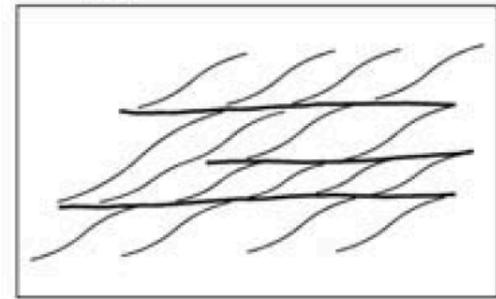
3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'

Com o cisalhamento, a foliação milonítica pode gerar bandas onde o cisalhamento é concentrado (geralmente no centro da ZC), as quais são denominadas de bandas C (de *cisaillement*)



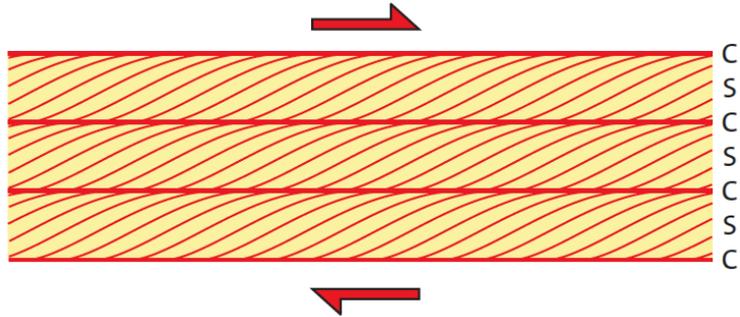
C-type shear bands



Corte de granito milonítico, paralelo à lineação de estiramento. Planos ou bandas C são horizontais e os planos S oblíquos.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'



De forma oblíqua à banda C, forma-se uma foliação ou xistosidade (S de *shistosité*) que é geralmente marcada por minerais micáceos



Essa estrutura é normalmente chamada de pares S/C

Bandas C

Bandas S

Granito milonítico.
Largura da foto é 10 cm.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'

Em rochas pobres em minerais micáceos, também é possível a geração de foliações oblíquas:

Recristalização
dinâmica do
quartzo e
estiramento
segundo S_i

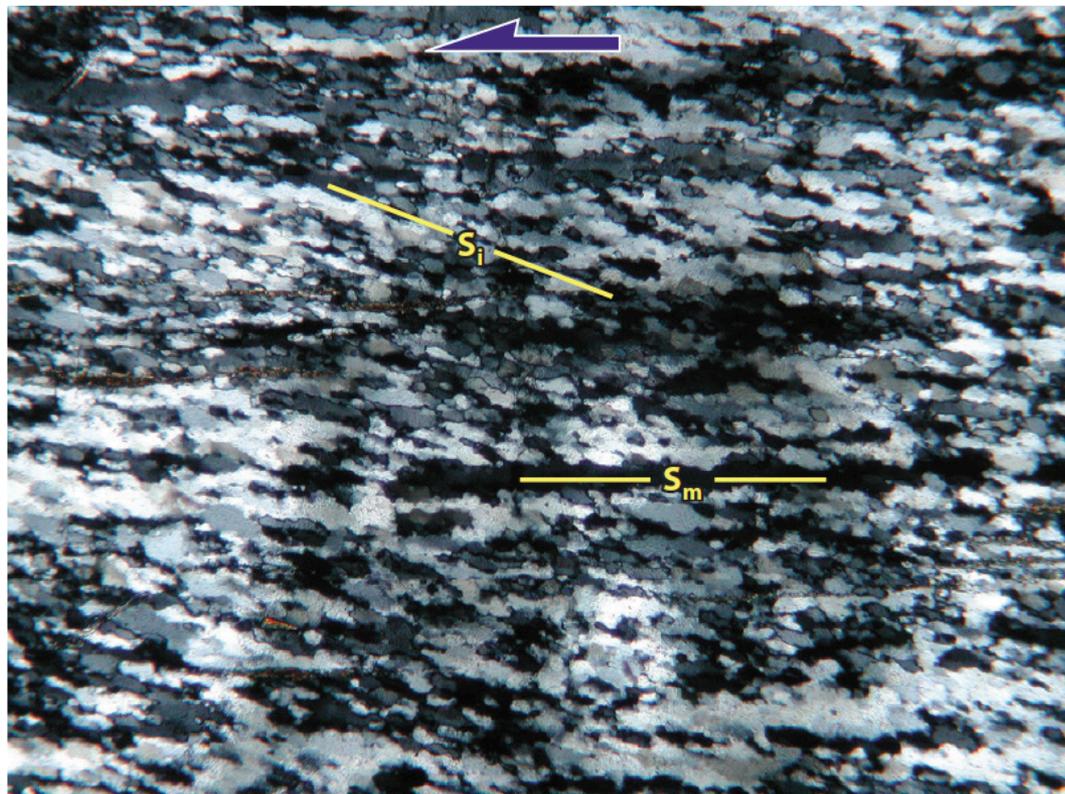
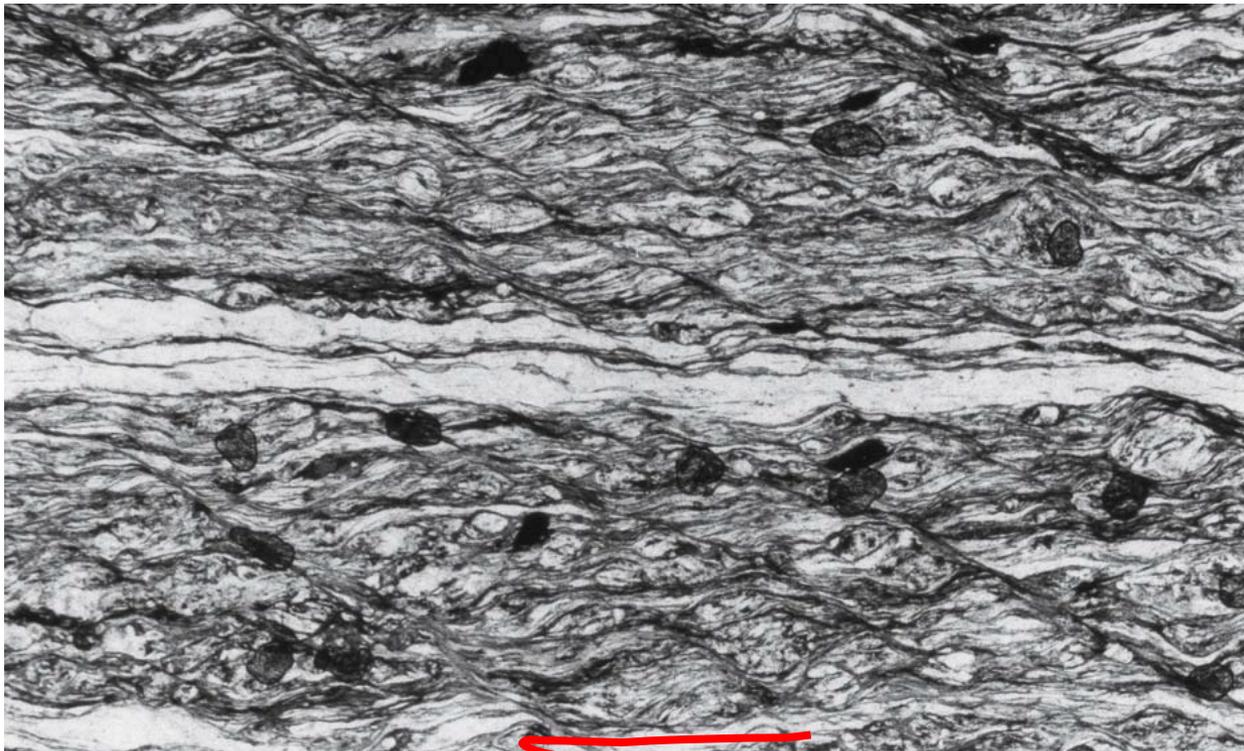
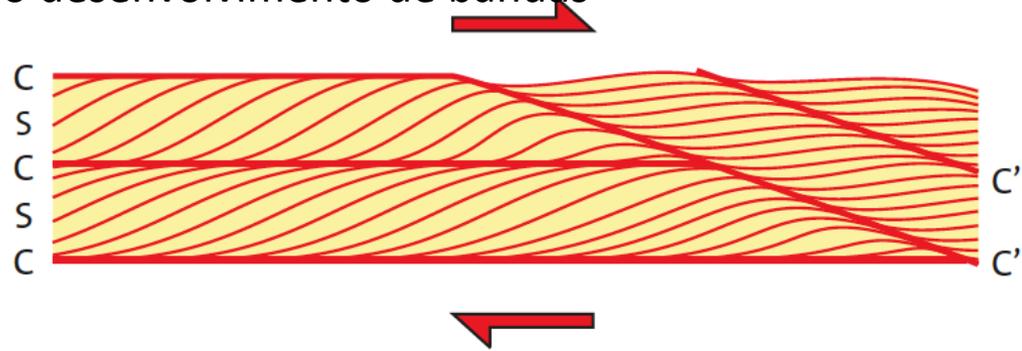


Fig 16.27
Seção delgada de um milonito com uma foliação milonítica horizontal (S_m). Os grãos de quartzo estão estirados segundo uma direção S_i oblíqua a S_m , e a relação angular é consistente com um sentido de cisalhamento anti-horário (topo para a esquerda). Podemos aplicar a terminologia S-C, onde S_m equivale a C e S_i , a S

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'

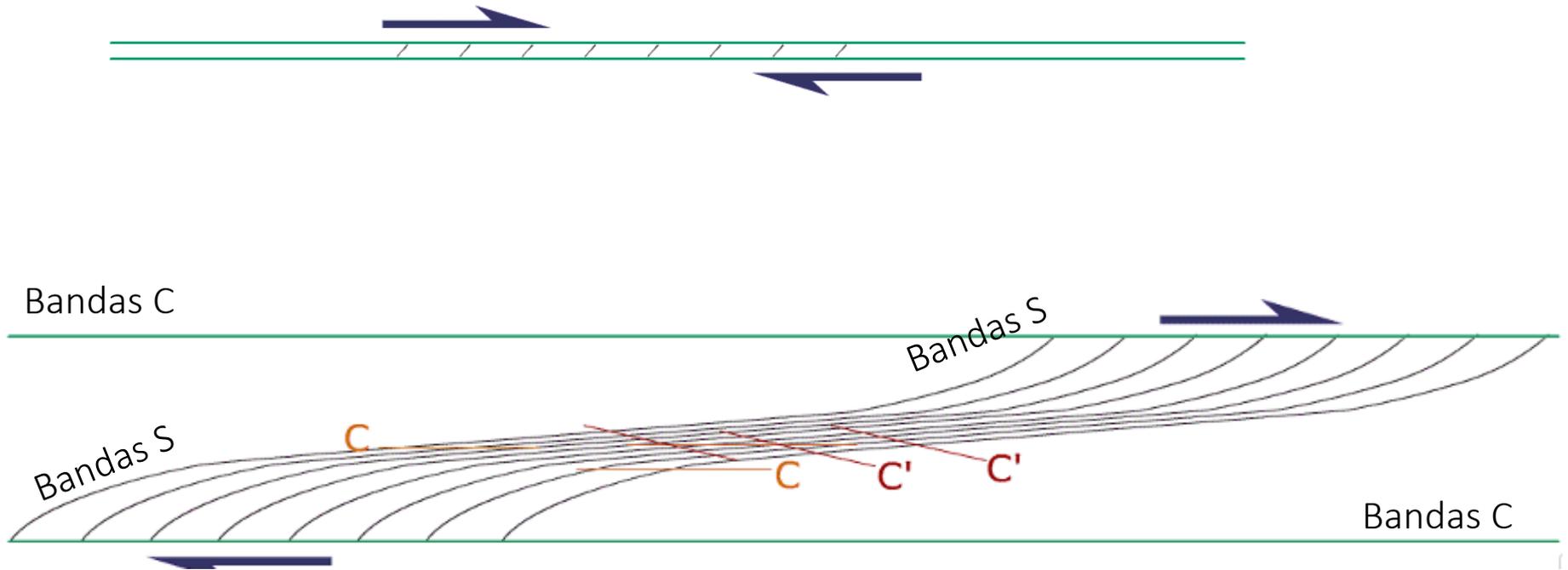
Com a progressão do cisalhamento, há o desenvolvimento de bandas extensionais, chamadas de bandas C':



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.2 Foliação milonítica e bandas de cisalhamento S-C-C'

As foliações com pares S/C e foliações C' são importantes **indicadores cinemáticos!**



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.3 Sistemas de porfiroclastos

PorfiroCLASTO é um grão mineral **reliquiar** de maior dimensão, tipicamente um feldspato ou outro mineral resistente, em uma matriz milonítica de granulação fina cisalhada. É comum apresentar extremidades assimétricas que refletem o sentido de cisalhamento. É diferente de porfiroBLASTO.



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

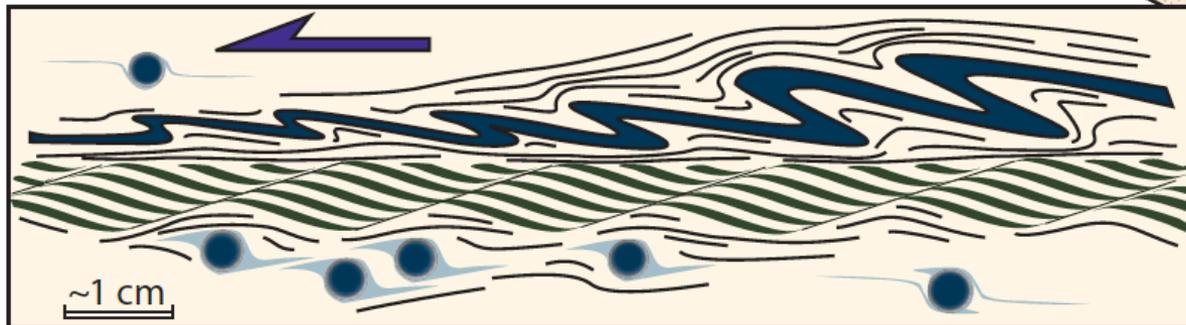
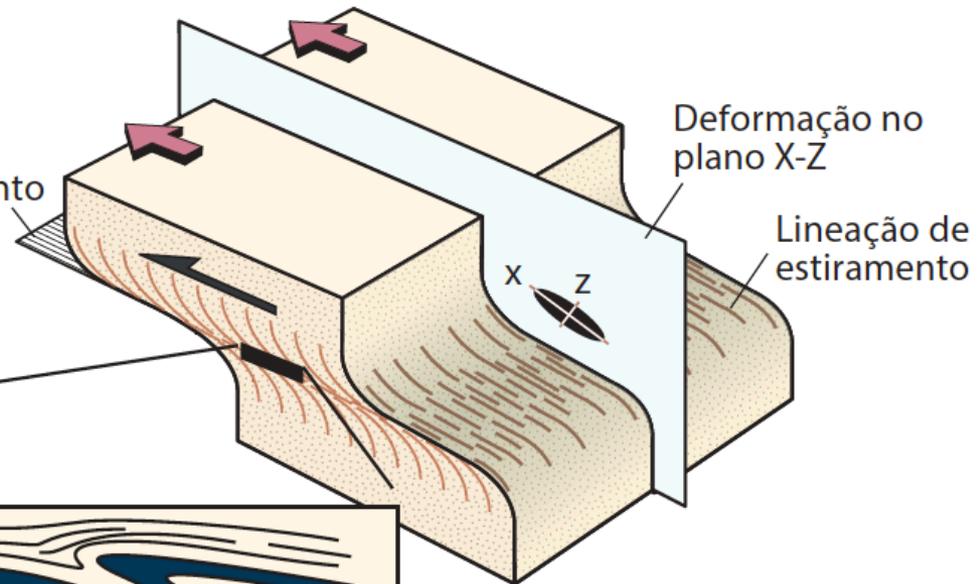
3.3 Sistemas de porfiroclastos

Podemos confiar em qualquer corte da rocha ou do afloramento para analisar cinemática?



O que querem dizer os planos do elipsoide de deformação XY e XZ?

Plano de cisalhamento



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.3 Sistemas de porfiroclastos

Os porfiroclastos de mica ou mica *fishes*: a assimetria indica o sentido de cisalhamento

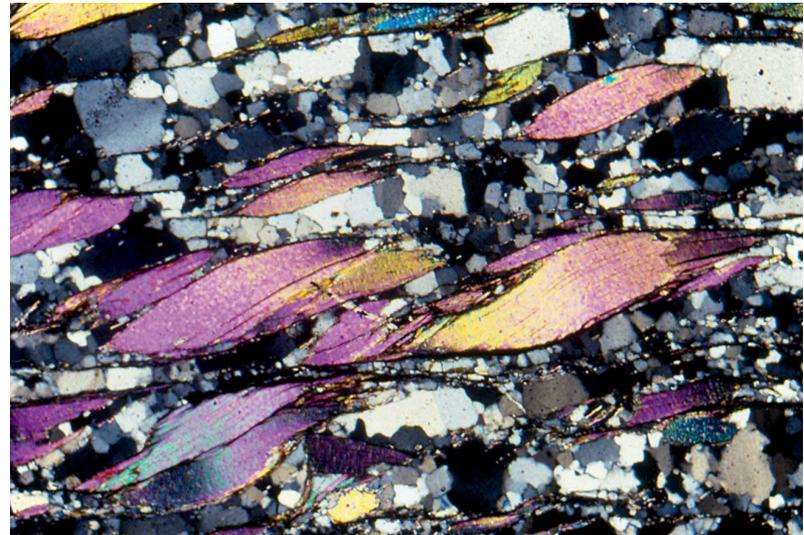
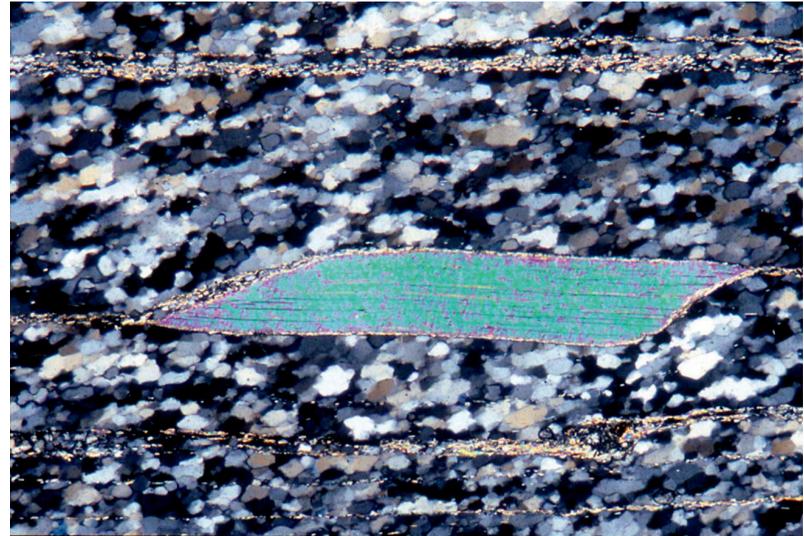
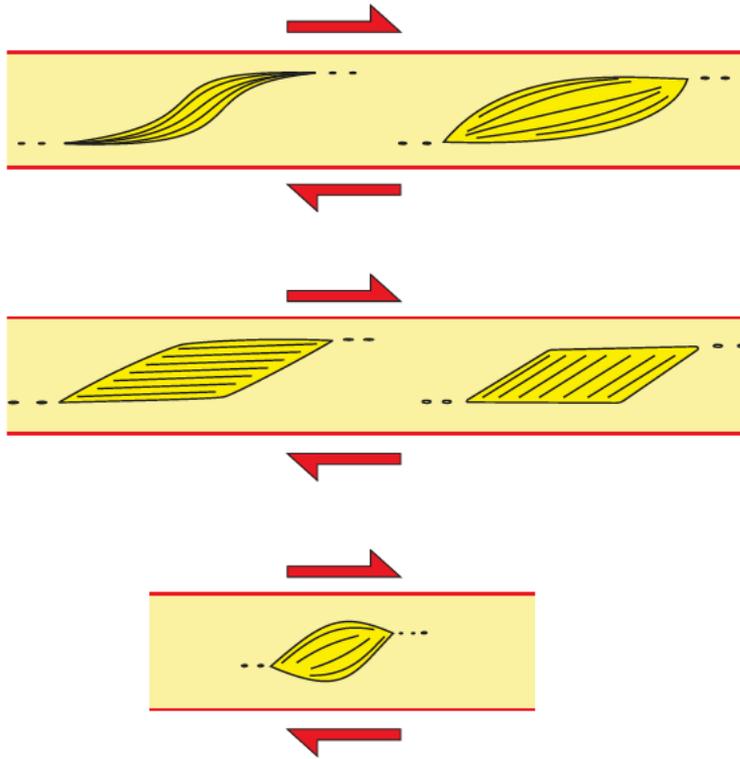
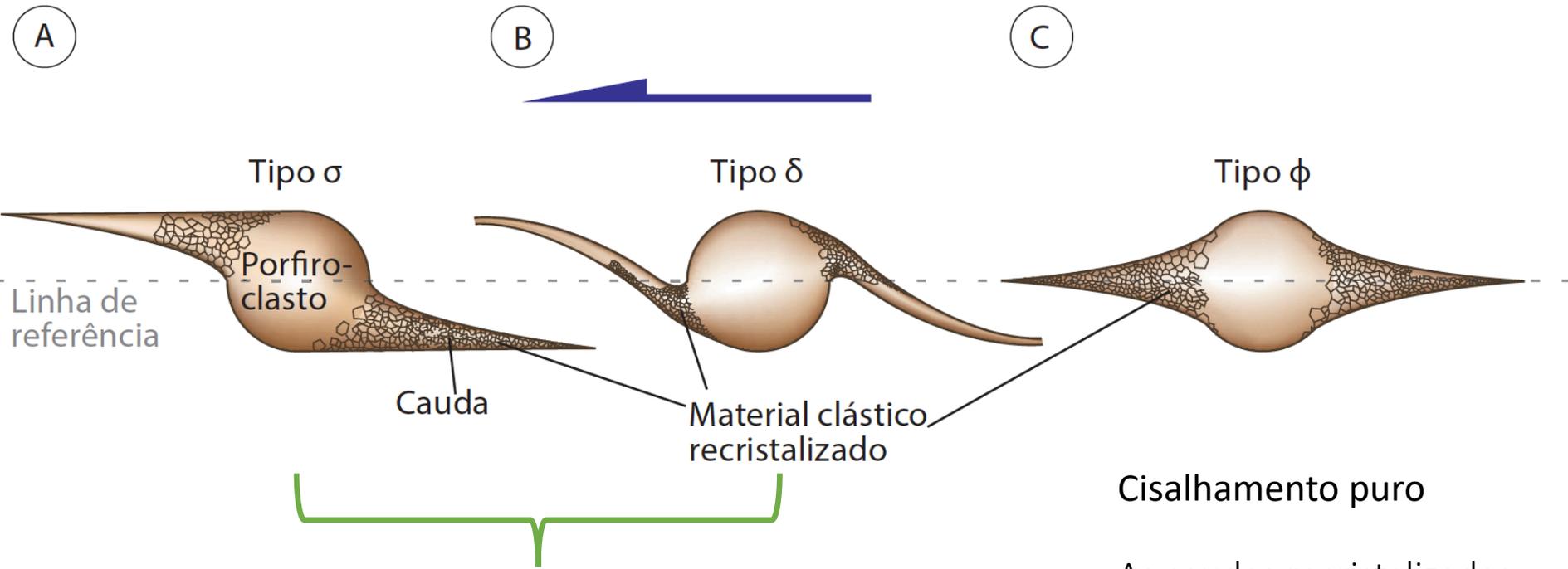


Fig. 9.5.1 Five types of mica fish, commonly encountered in nature. For further discussion see ten Grotenhuis et al. (2003) and Passchier & Trouw (2005).

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.3 Sistemas de porfiroclastos

Porfiroclastos com recristalização: as três geometrias principais



Cisalhamento simples (rotação anti-horária)



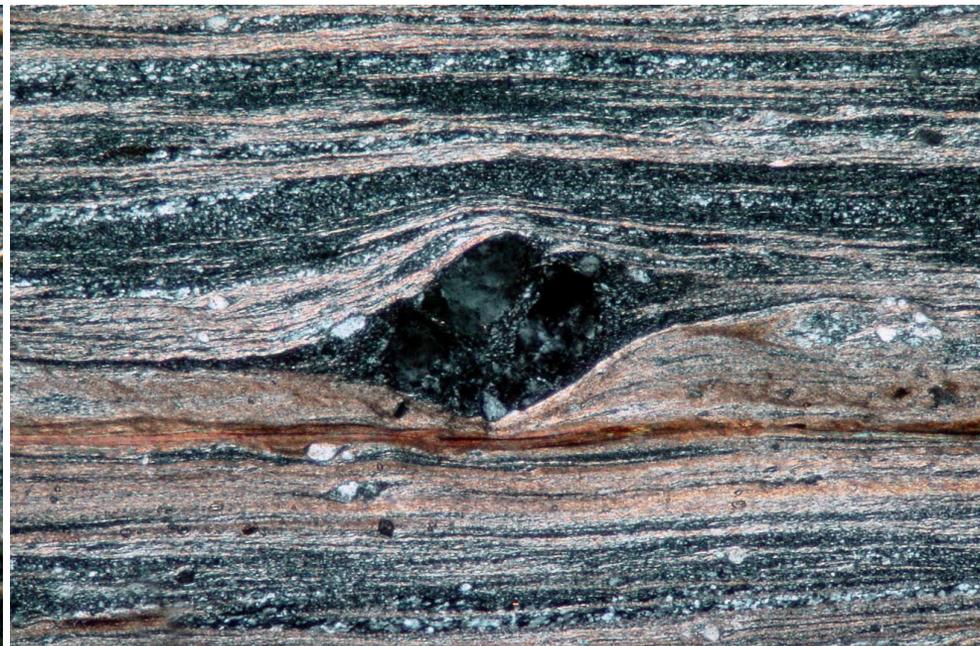
Cisalhamento puro

As caudas recristalizadas do tipo sigma mostram o sentido do cisalhamento (regra do degrau).

Já no caso do tipo delta, prestar atenção na inflexão da cauda com a rotação.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.3 Sistemas de porfiroclastos



3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.3 Sistemas de porfiroclastos

Porfiroclastos fraturados, sem recristalização: por quê ocorrem?

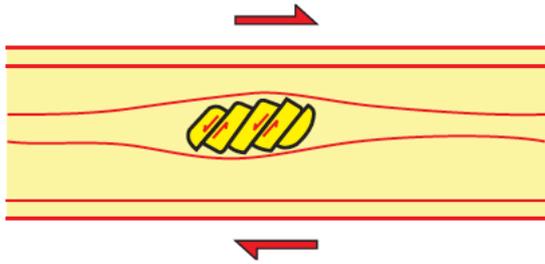


Fig. 9.7.1 Domino-type fragmented porphyroclast. Notice that the movement along the faults in the porphyroclast is antithetic to the sense of shear in the matrix and that the angle between these faults and the mylonitic foliation is usually larger than 45° .

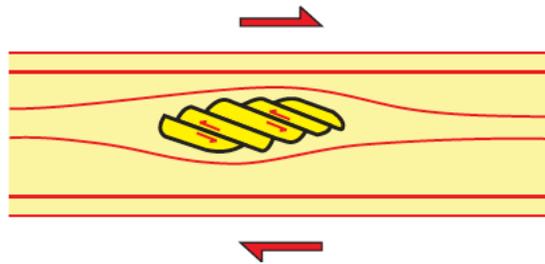
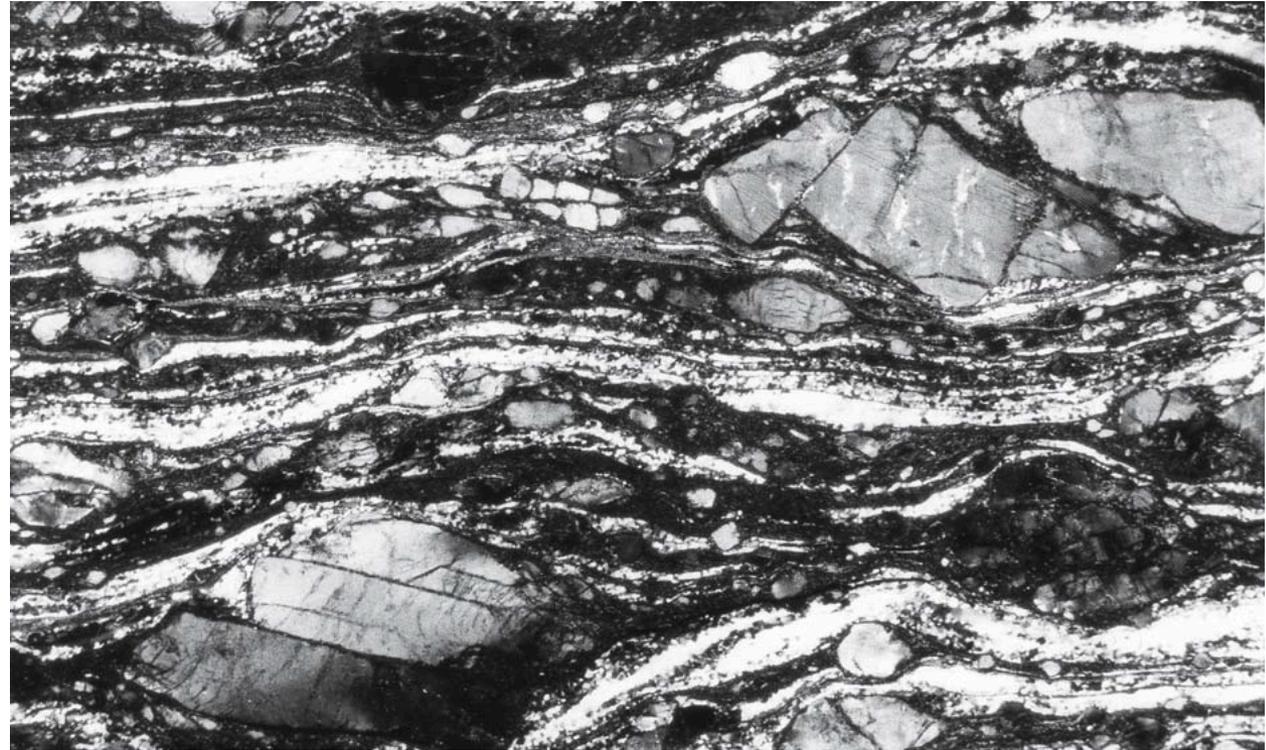


Fig. 9.7.5 Shear-band type fragmented porphyroclast. Notice that the movement along the faults in the porphyroclast is synthetic with the sense of shear in the surrounding mylonite and that the angle between the microfaults and the mylonitic foliation is smaller than 45° .



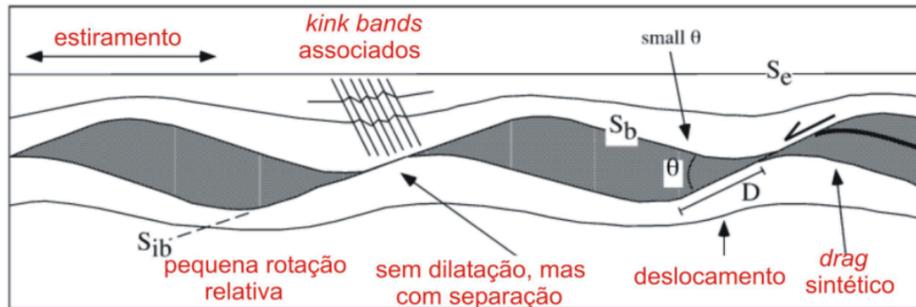
O que controla o tipo de microfraturas (se antitética ou sintética) é a orientação inicial das microfraturas nos grão, o que pode ser controlado por direções cristalográficas. Além disso, a geometria inicial dos porfiroclastos também podem influenciar, com grão arredondados dando *shear-band type*.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.4 *Boudins* assimétricos e dobras em zonas de cisalhamento

O deslocamento sintético (S) ou antitético (A) dos *boudins* depende do estabelecimento do sentido de movimento da zona de cisalhamento:

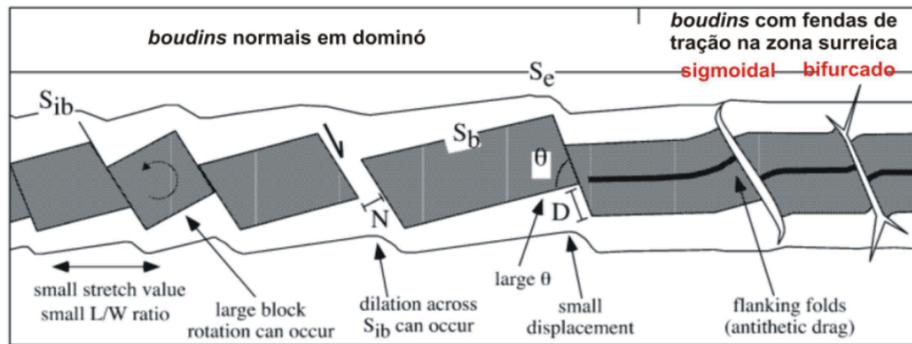
shearband boudins *Boudins* tipo-banda de cisalhamento



S_{IB} COM VERGÊNCIA ANTITÉTICA E DESLOCAMENTO SINTÉTICO

Deslocamento sintético (S-slip)
boudin com deslocamento sintético possui superfície *inter-boudin* (S_{ib}) com vergência no sentido contrário ao movimento.

domino boudins *Boudins* tipo-dominó



S_{IB} COM VERGÊNCIA SINTÉTICA E DESLOCAMENTO ANTITÉTICO

Deslocamento antitético (A-slip)
boudin com deslocamento antitético possui S_{ib} com vergência no sentido do movimento.

3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.4 *Boudins* assimétricos e dobras em zonas de cisalhamento

Boudin no bandamento milonítico e em dominó antitético

Deslocamento-A



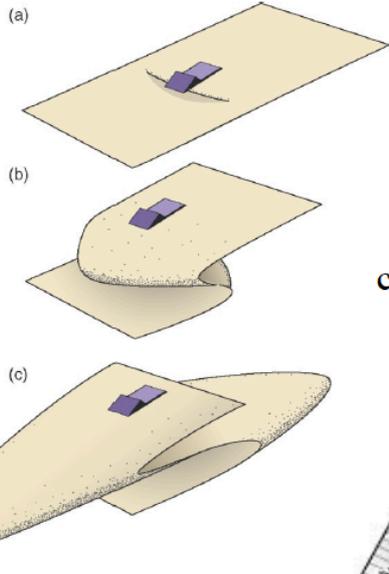
Boudin assimétrico de banda de cisalhamento (*shear band boudin*)

Deslocamento-S



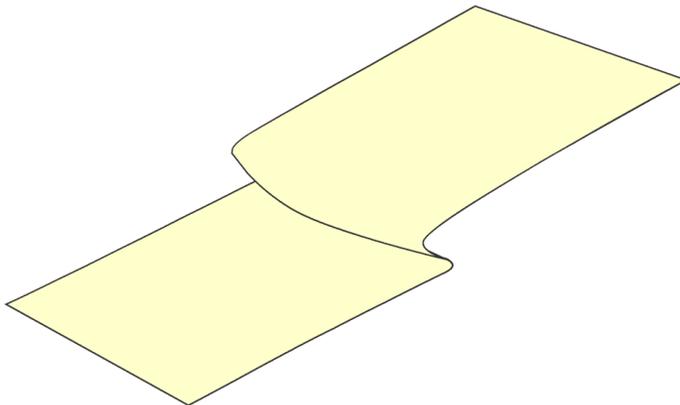
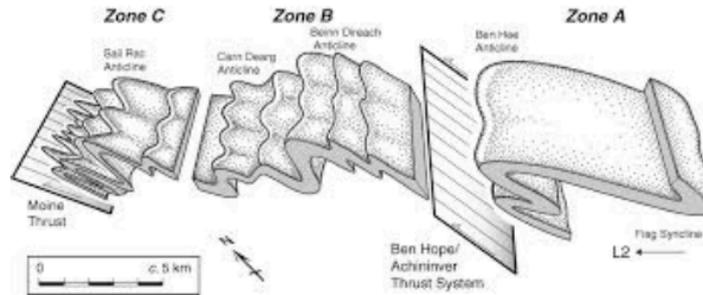
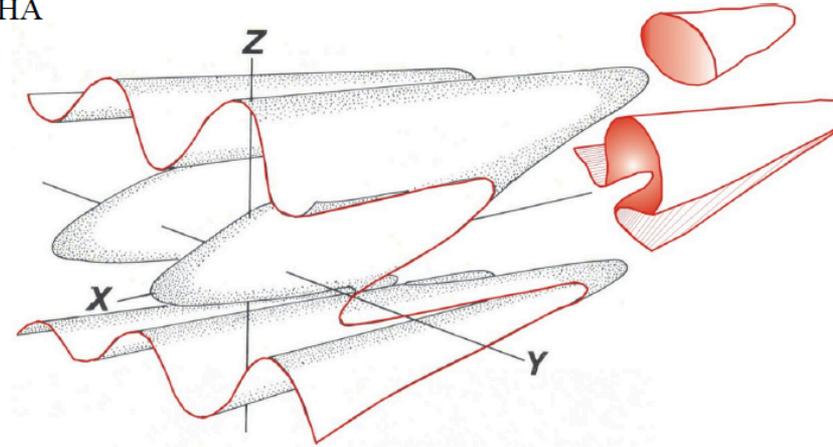
3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.4 *Boudins* assimétricos e dobras em zonas de cisalhamento



DOBRAS EM BAINHA

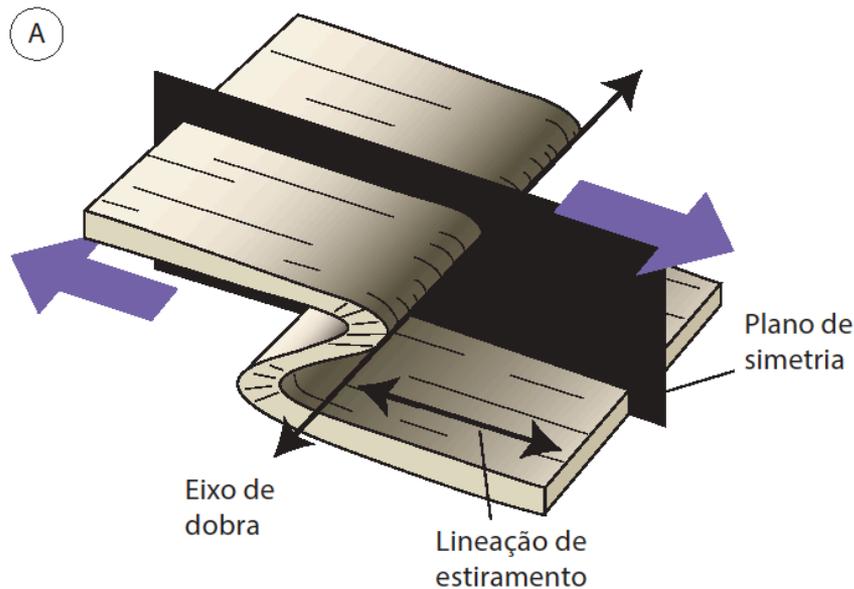
Dobra passiva não cilíndrica, com intenso encurvamento da linha de charneira, exibindo terminações agudas na direção do movimento



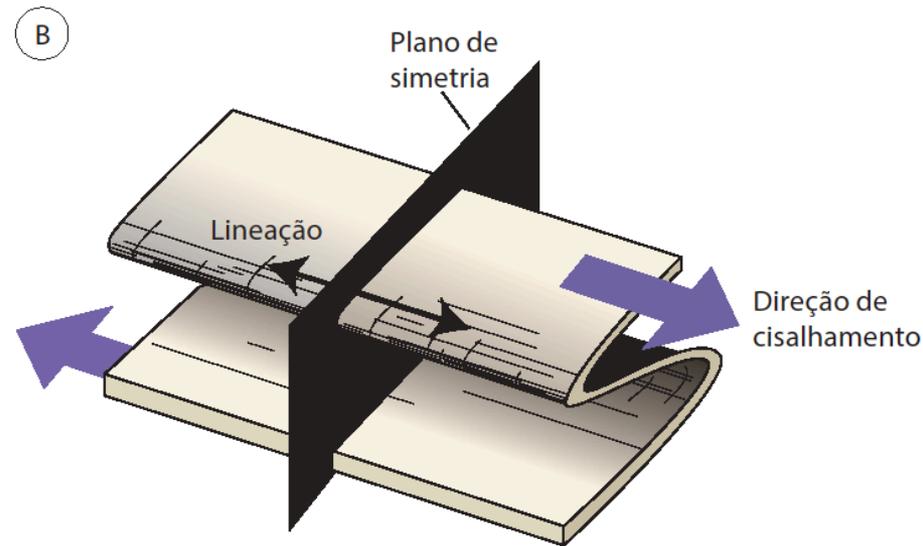
3. Zonas de cisalhamento dúcteis

3.4 *Boudins* assimétricos e dobras em zonas de cisalhamento

Os eixos das dobras e as lineações de intersecção são **geneticamente diferentes** das lineações de **estiramento**. Portanto, os eixos de dobras podem estar em alto ângulo, oblíquos ou paralelos com a direção de transporte:



Dobras assimetria na direção do cisalhamento, mas com eixo ortogonal ao transporte

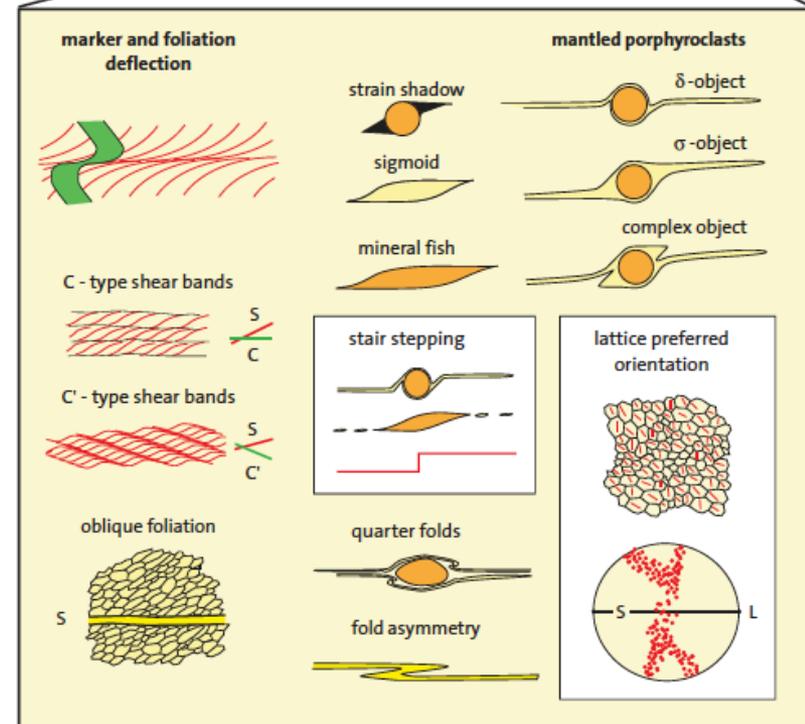
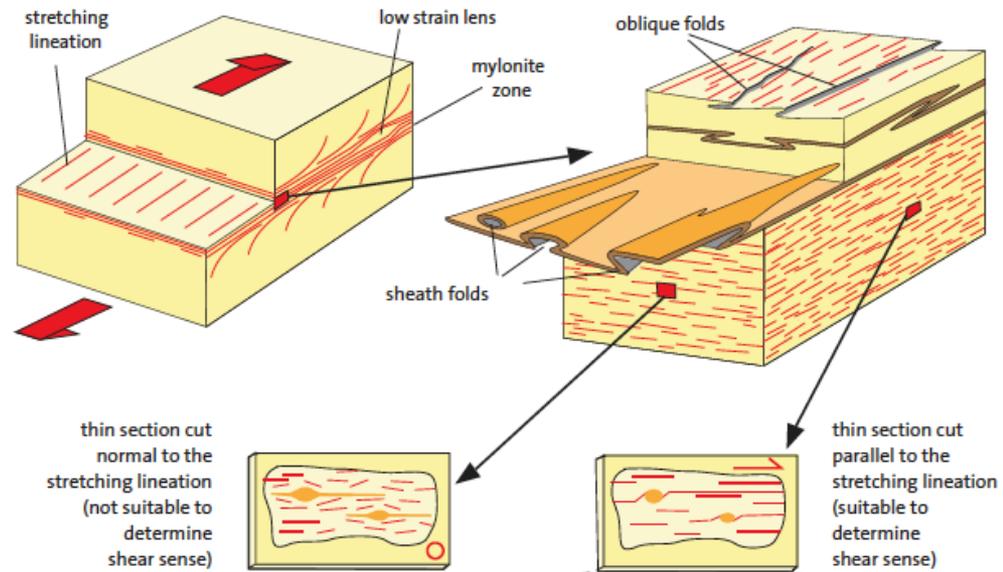
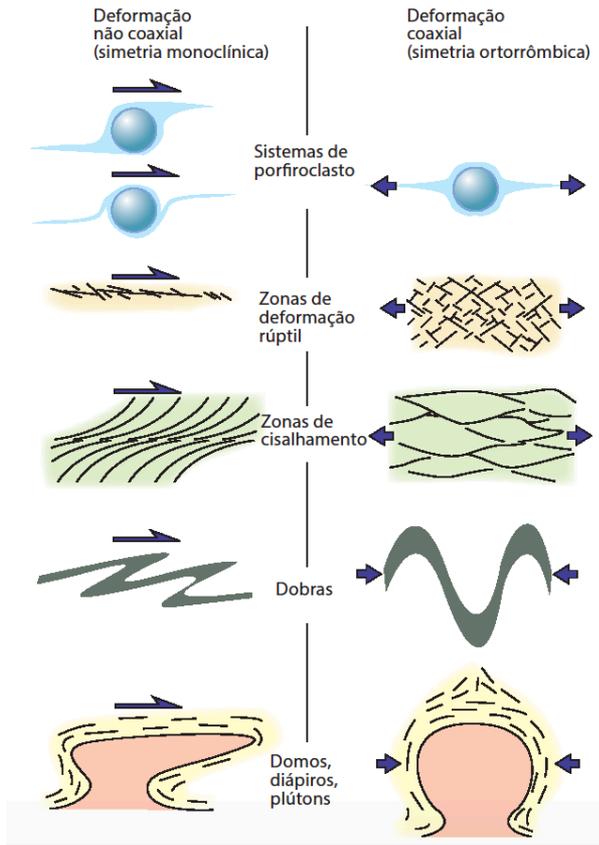


Dobras com eixo B paralelo ao transporte, também chamadas de dobras-a ou oblíquas

As dobras podem formar-se com eixos em qualquer ângulo em relação à direção de transporte, e tipicamente rotacionam para essa direção com o acúmulo da deformação.

Para reforçar:

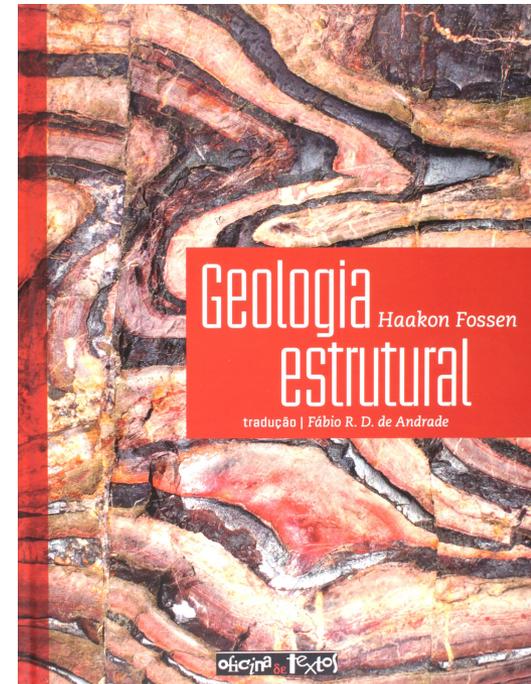
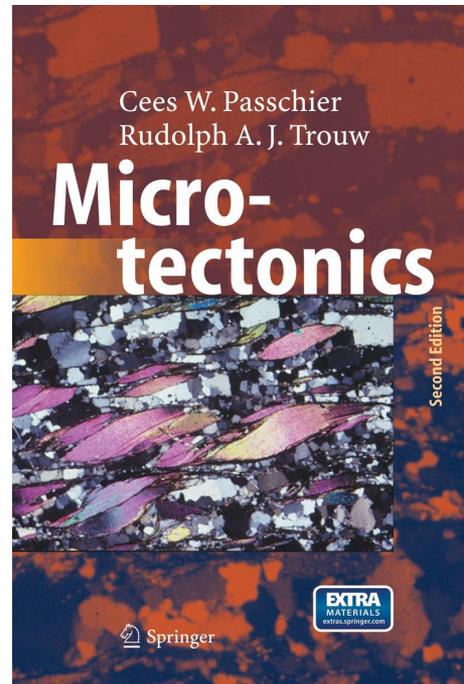
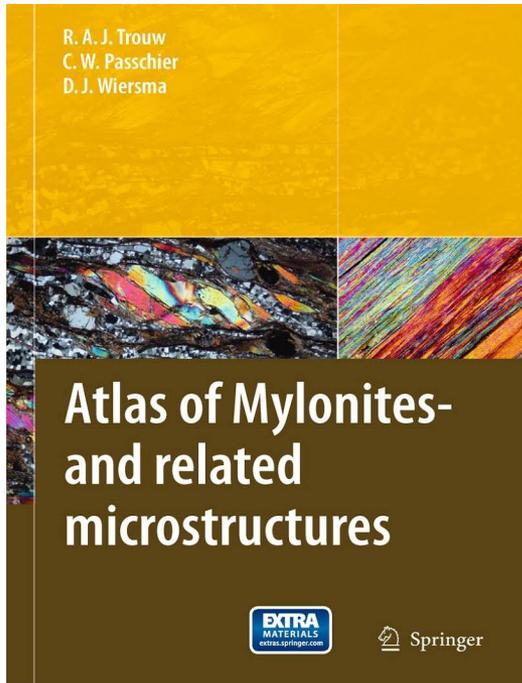
- Relação lineação e foliação milonítica para cinemática;
- Cortes XZ e XY;
- Indicadores cinemáticos;
- Zonas de cisalhamento rúpteis X dúcteis;



Sumário da aula

- Zonas de cisalhamento são zonas tabulares de concentração de deformação na crosta / litosfera;
- Zonas de cisalhamento ocorrem em todas as escalas, desde lâmina delgada até cortando toda a crosta e envolvendo centenas de km de deslocamento;
- Zonas de cisalhamento tendem a envolver considerável movimento paralelo (cisalhamento simples) às paredes das ZC, porém comumente envolvem cisalhamento sub-simples;
- Zonas de cisalhamento podem ser normais, reversar ou oblíquas;
- Zonas de cisalhamento tendem a ter menores ângulos de mergulho do que falhas;
- Indicadores cinemáticos devem ser observados nos planos formados pelos eixos X e Z de deformação;
- Cinemática tem sempre que ter uma lineação de estiramento associada.

Referências principais utilizadas nessa aula



Todas as figuras utilizadas são desses três livros.