

**DOBRAS E PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DO
DOBRAMENTO**

3

BOUDINS



Com a deformação no estado plástico as camadas são encurtadas e, as diferenças de competência entre os estratos, levam ao dobramento por *buckling*. Similarmente as camadas podem ser estiradas e divididas em pedaços individuais conhecidos como boudins. A boudinage (processo) é o contrário do buckling, isto é, extensão paralela às camadas.

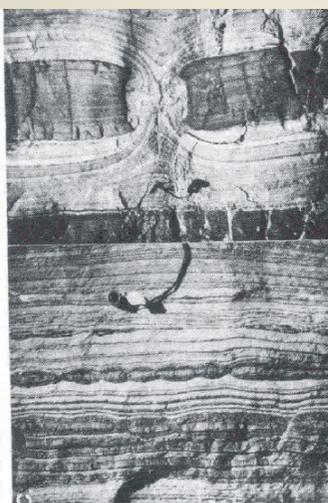
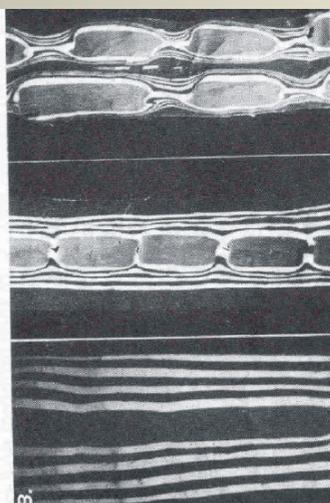
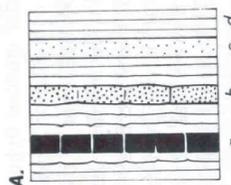
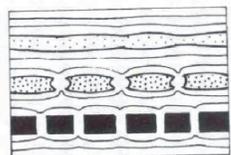
BOUDINS

Boudins são fragmentos de rocha, de forma aproximadamente retangular, separados pelo estiramento do estrato mais competente ou da foliação.

Sítios adelgaçados e regularmente espaçados de um estrato competente, sem separação em fragmentos isolados, ou quando os elementos de *boudin* encontram-se conectados, definem as estruturas ***pintch-and-swell***.

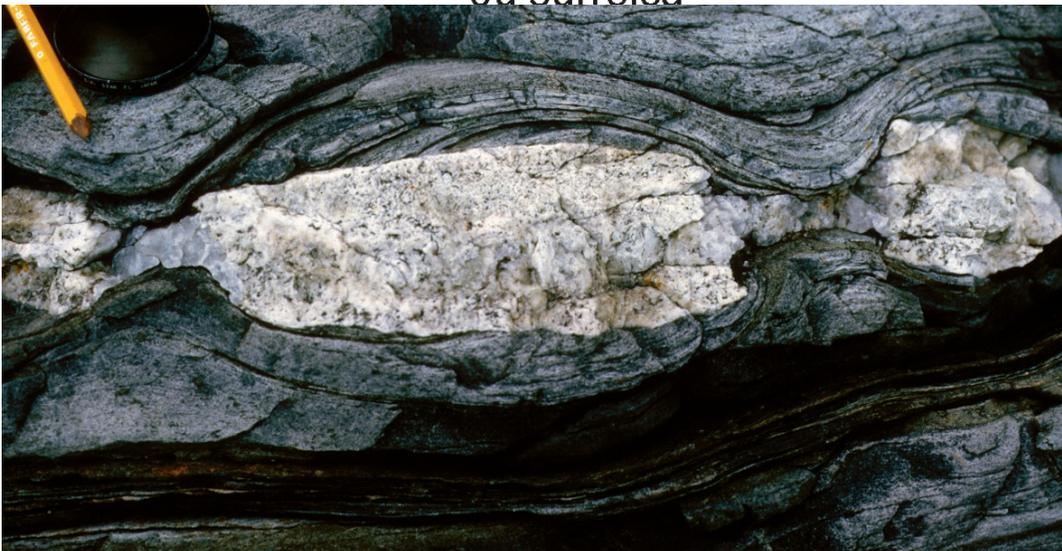
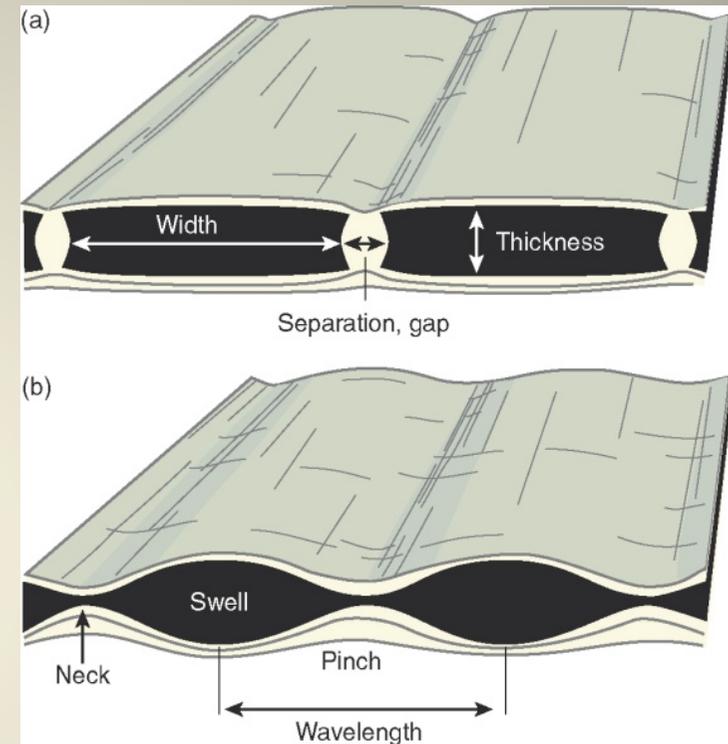
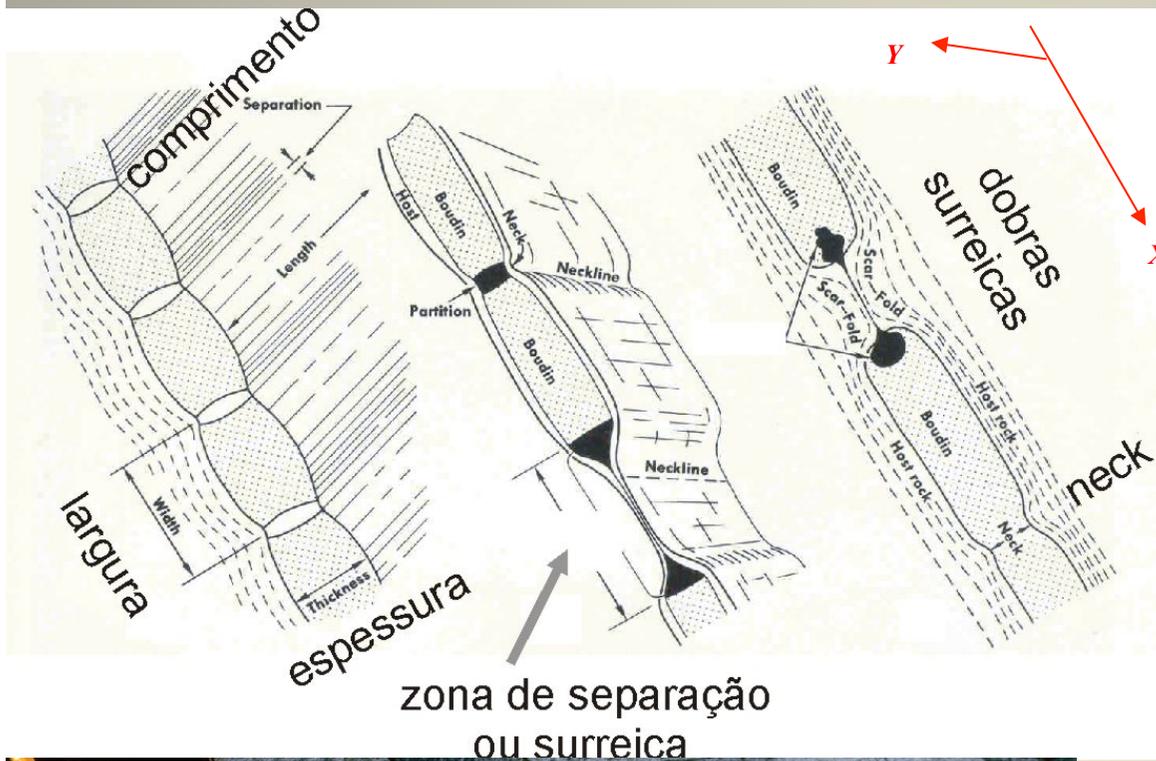
A forma dos ***boudins*** e estruturas ***pintch-and-swell*** são controladas pela temperatura, taxa de deformação (*strain*), contraste de viscosidade, ou pelo desenvolvimento da foliação.

A concentração do esforço é maior nas paredes do *boudin* e *boudins* com formas de barril ou boca de peixe são mais freqüentes com o aumento da plasticidade do nível mais competente.



BOUDINS

Cisalhamento puro ($e+$ ao longo da camada), morfologia, estruturas pinch-and-swell

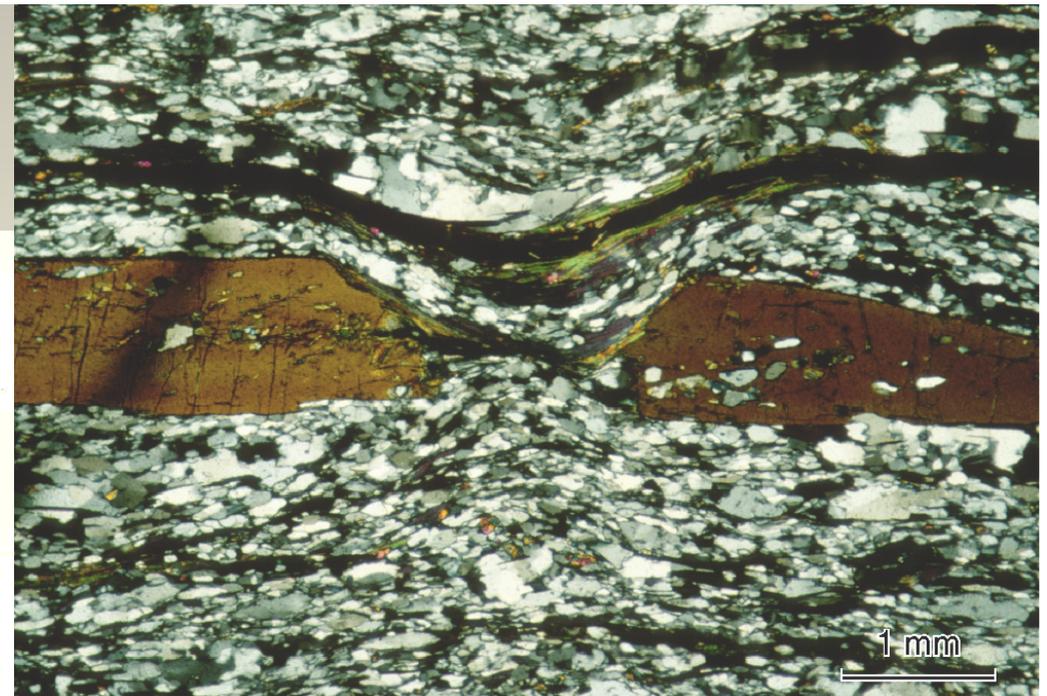
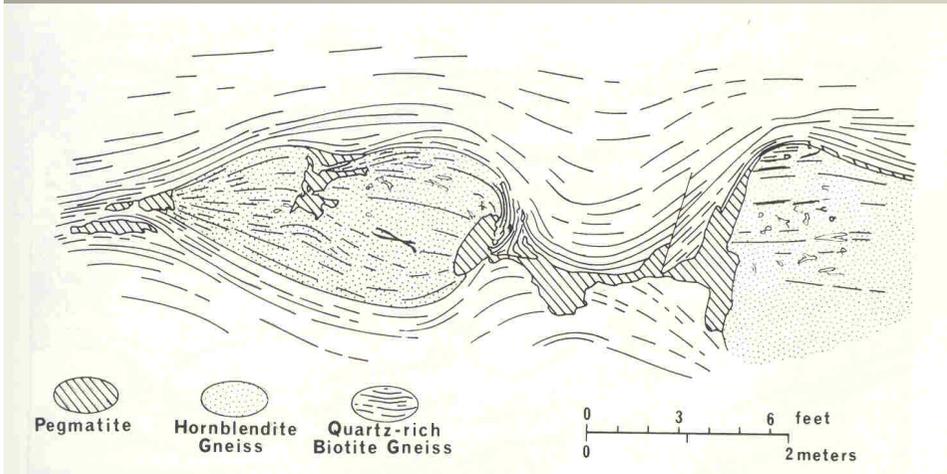


ESTRUTURA LINEAR CONTROLADA PELOS EIXOS DE DEFORMAÇÃO FINITA

Neck de boudin – lineação paralela ao eixo Y do elipsóide de deformação.

Condições do metamorfismo durante a extensão.

Fluxo dirigido de soluções e precipitação



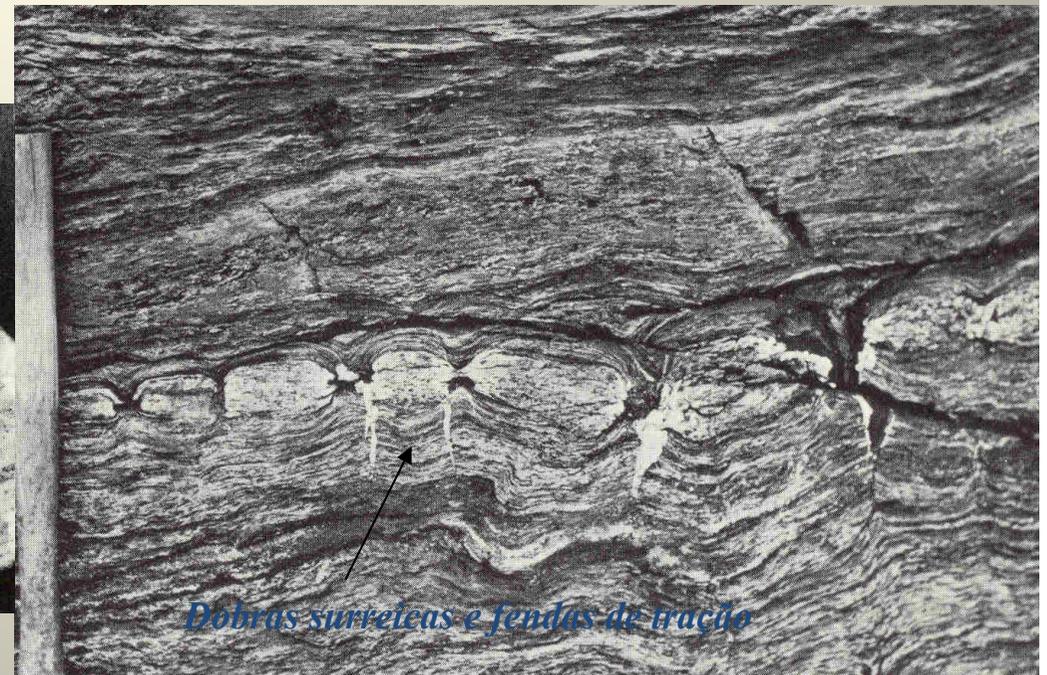
Boudinage simétrica de anfibólio na escala microscópica

Anfibolito com fusão parcial ou injeção de líquido silicático a partir da zona de separação do boudin

Boudin simétrico com fendas de tração nas zonas surreicas

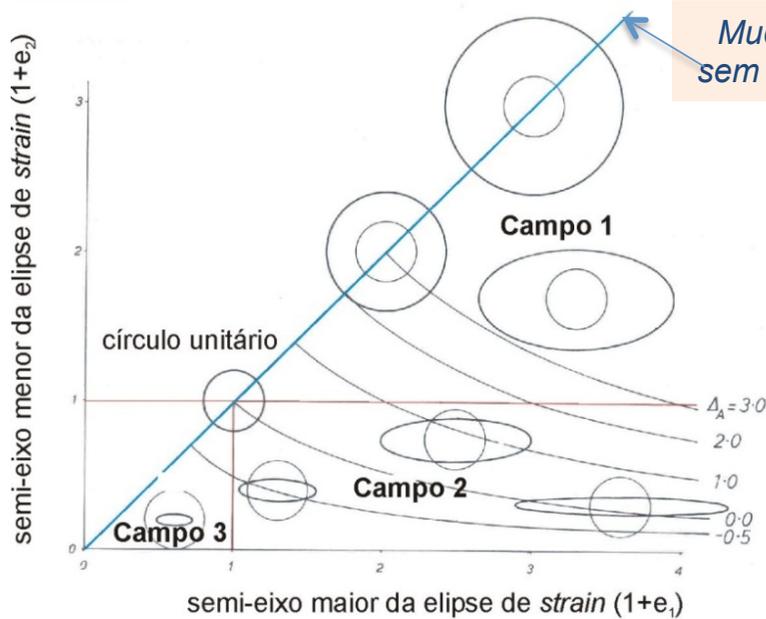


Leucossoma estromático e surreico



Boudinage e ellipse de strain

Os boudins, normalmente observados na seção X-Z do elipsóide finito de *strain*, podem também ocorrer na direção Y-Z, ou associarem-se a dobras nesta direção, dependendo do campo de ellipse de *strain* que se encontra a deformação.



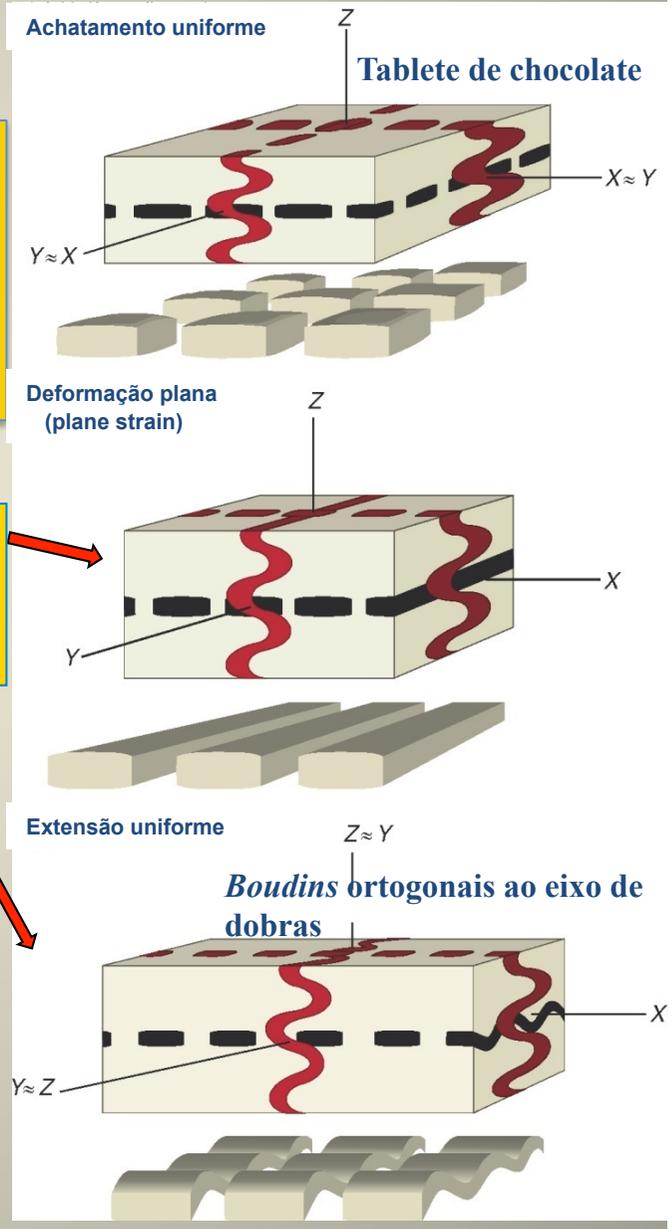
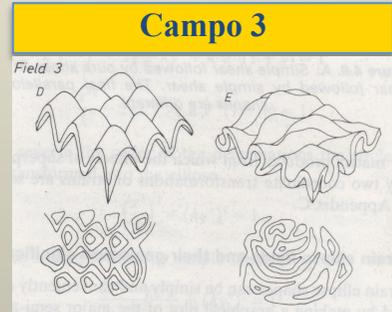
Classificação da forma das elipses de *strain*

Campo 1: $e_1 > 1 < e_2$ estiramento ao longo dos eixos X e Y do elipsóide de *strain*.
 Campo 2: $e_1 < 1$, $e_2 > 1$ estiramento ao longo do eixo X e contração ao longo do Y. Com o aumento da contração em Y os elementos de *boudin* serão dobrados.
 Campo 3: $e_1 < 1 > e_2$ contração ao longo dos eixos X e Y (contração em todas as direções), caso a deformação ocorra durante uma única fase as dobras serão muito irregulares (formas de pano amassado) com linhas de charneira e planos axiais com orientações variáveis. Caso o *strain* finito resulte de duas contrações ortogonais separadas no tempo (superpostas) as dobras exibem um padrão de interferência regular, com linhas de charneiras e planos axiais ortogonais)

Mudança de volume, sem mudança de forma

Campo 1
 Dobra da camada paralela ao eixo de encurtamento maior do elipsóide de deformação. *Boudins* nas direções X e Y do elipsóide de deformação das camadas perpendiculares ao eixo de encurtamento maior.

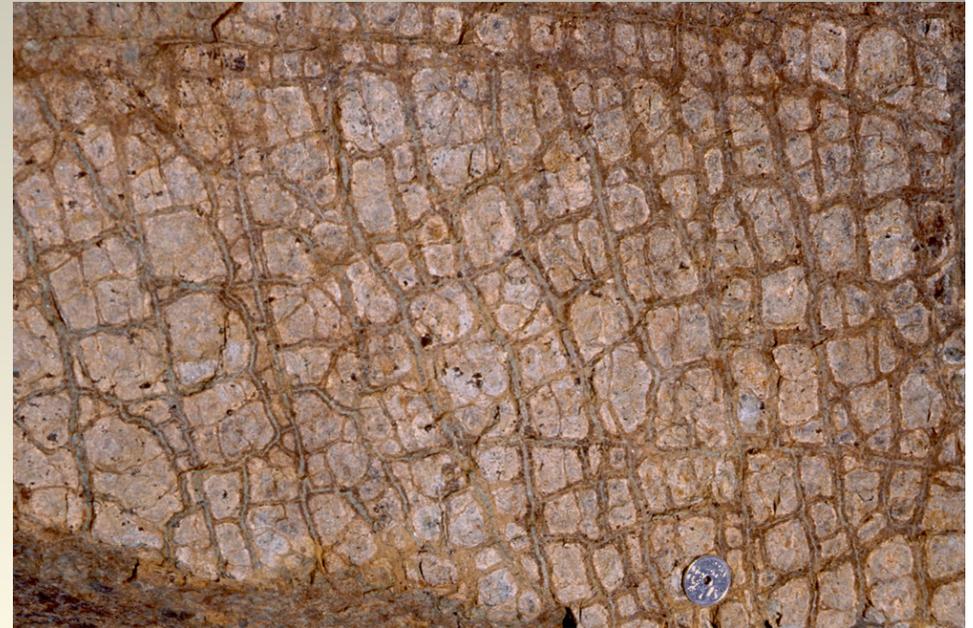
Campo 2
 $e_1 > 1 - e_2 < 1$ tem-se a intersecção do círculo unitário por duas linhas de não deformação longitudinal finita.



Boudinage e ellipse de strain



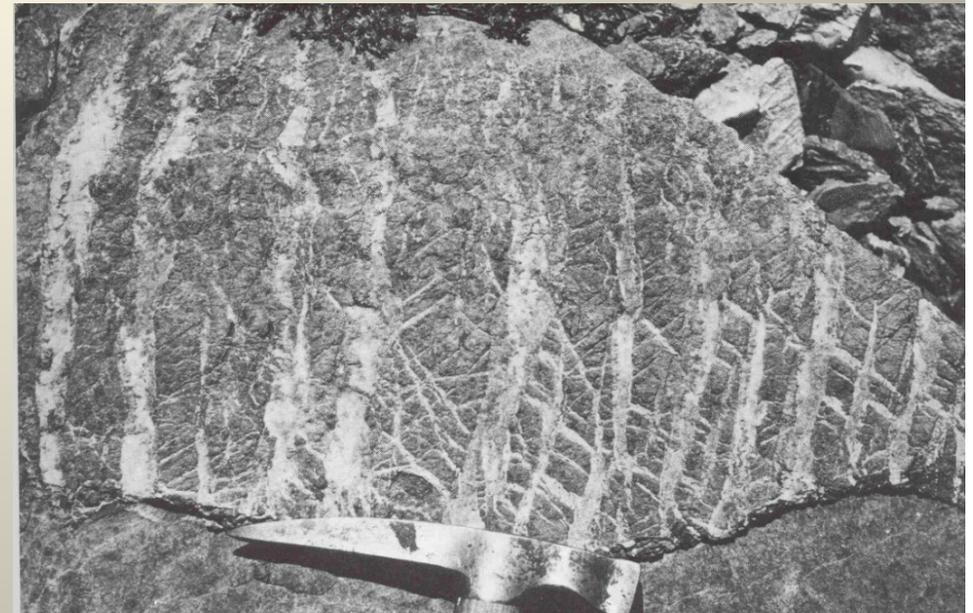
Combinação de *boudin* e dobra – campos 2 de elipses de deformação



Boudins tipo tablete de chocolate – campo 1 de elipses de deformação ($e_1 > e_2 > 1$) – duas direções semi-ortogonais de extensão.



Extensão paralela ao eixo-B



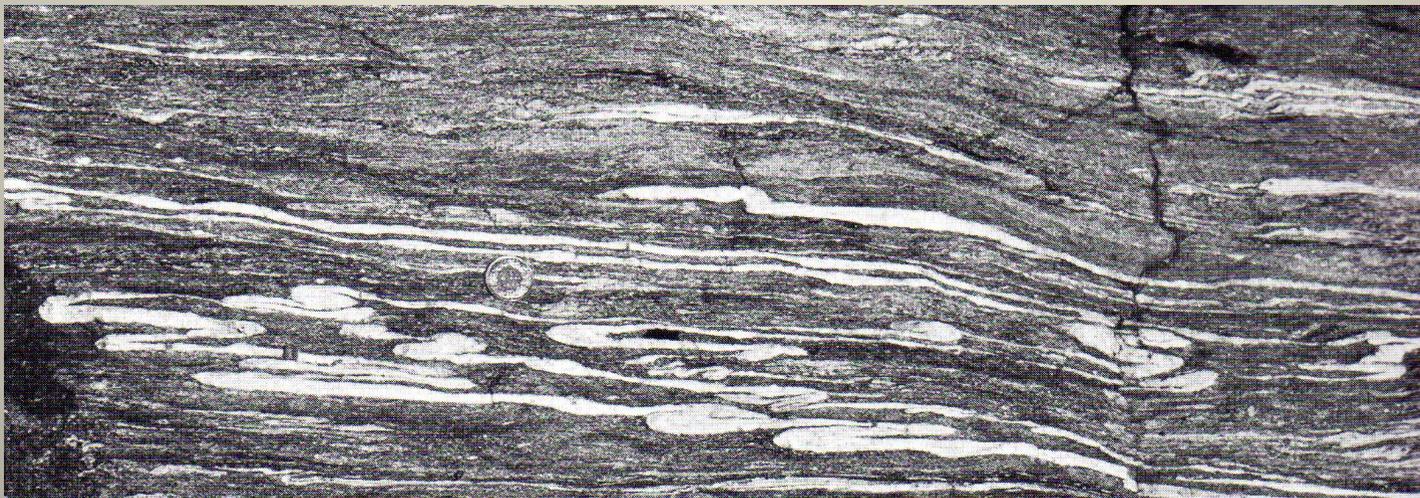
Boudins e o processo geral da deformação progressiva

Dobras passivas e *boudins* – deformação com incremento da extensão



Dobras podem ser estiradas, com adelgaçamento de flancos, *pintch-and-swell* e *boudinage*, preservando as charneiras (podem evoluir para *rods*, ou a dobras-em-anzol).

Flancos destacados como bandas e restos de charneiras evidenciando a compressão oblíqua associada a intenso estiramento, responsável pelo rompimento da trama ondulada original das dobras – **dobras passivas intrafoliais e transposição**



Fendas-T (fendas de tração) e boudinage

Fendas de tração, em camadas boudinadas, desenvolvem-se com maior intensidade nas proximidades da zona surreica. *Boudins* simétricos da camada mais competente.





Fusão parcial *sin-boudin* evidenciada pela cristalização de granito na zona de dilatação (surreica) do *boudin* e interconectado com leucossomas estromáticos e estirados na foliação (*Sierras de Cordoba, Argentina*)



Granito hololeucocrático muito grosso na zona surreica de *boudin* de anfibolito em gnaiss (Armação de Búzios, Rio de Janeiro)

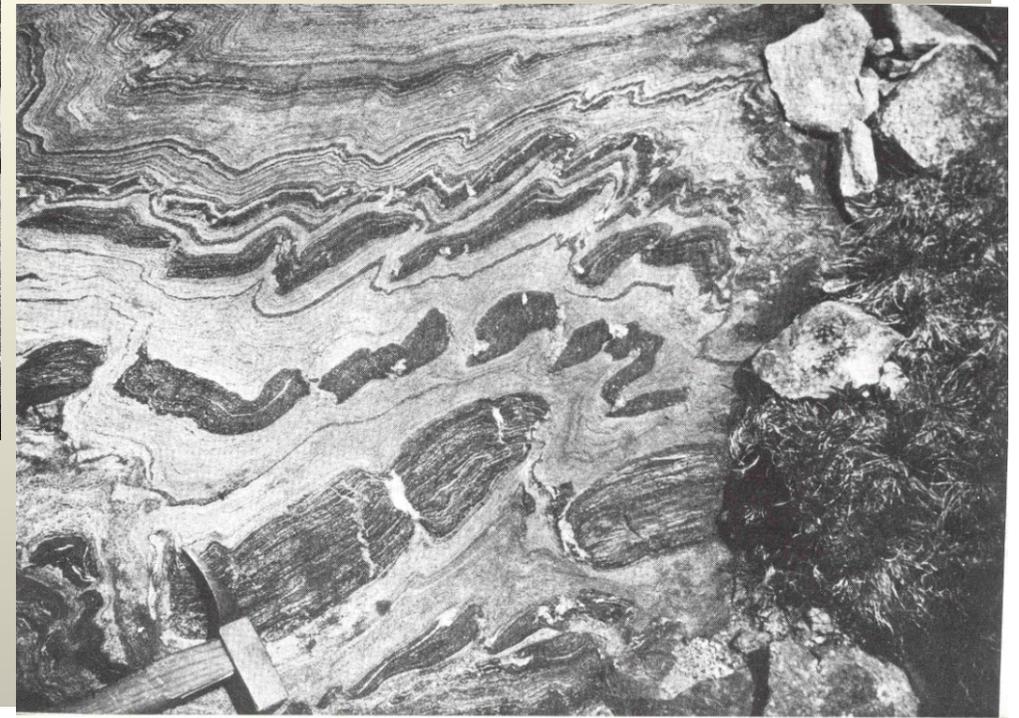
Boudins e superposição de deformação

Boudins dobrados

Boudins dobrados e comprimidos, com diminuição da razão largura/espessura da camada boudinada



Neck e zonas surreicas dos boudins preenchidos por veios quartzo feldspáticos. O dobramento destes veios evidencia um estágio de extensão seguido pela compressão (camadas competentes de anfibolito em biotita gnaiss bandado, relativamente incompetente)



BOUDINS DE FOLIAÇÃO – deformação coaxial e não coaxial

Ausência de contrastes de competência. Boudinage desenvolvida na foliação de um único tipo litológico

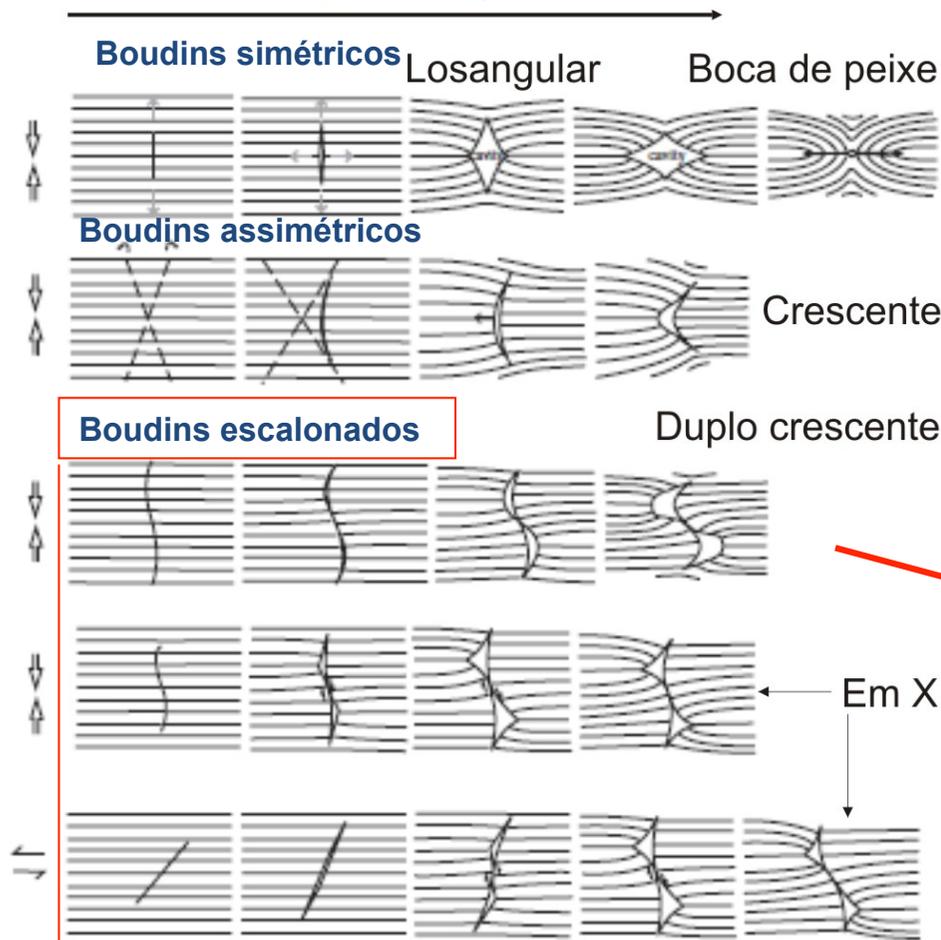
Fratura de tração, abertura do fraturamento, percolação de fluídos e preenchimento. Deflexão da foliação nas paredes da fratura durante o processo de abertura, dobramento flanqueado da foliação.

Boudins de foliação

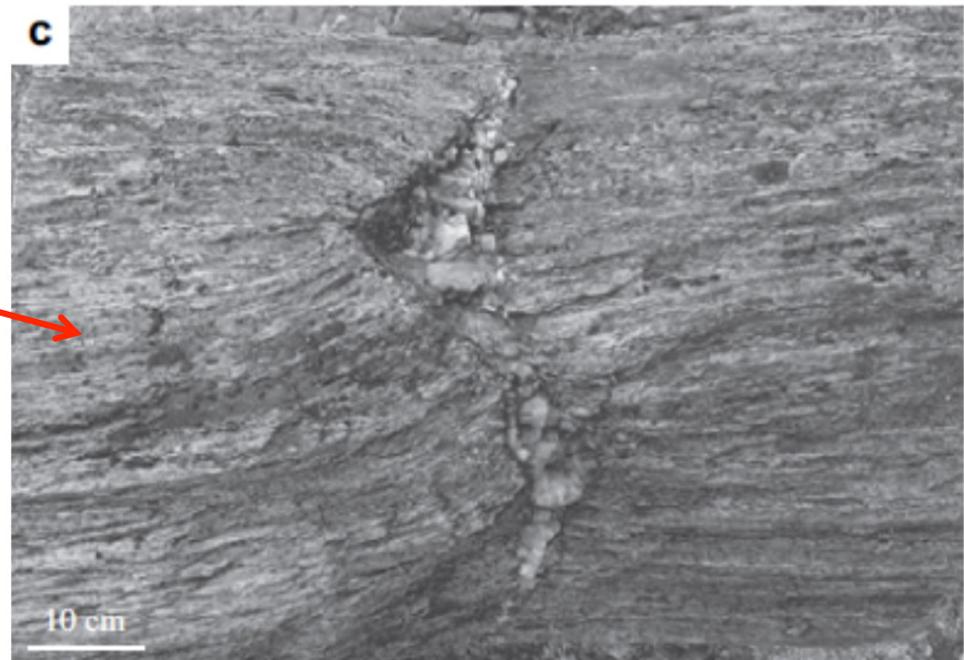
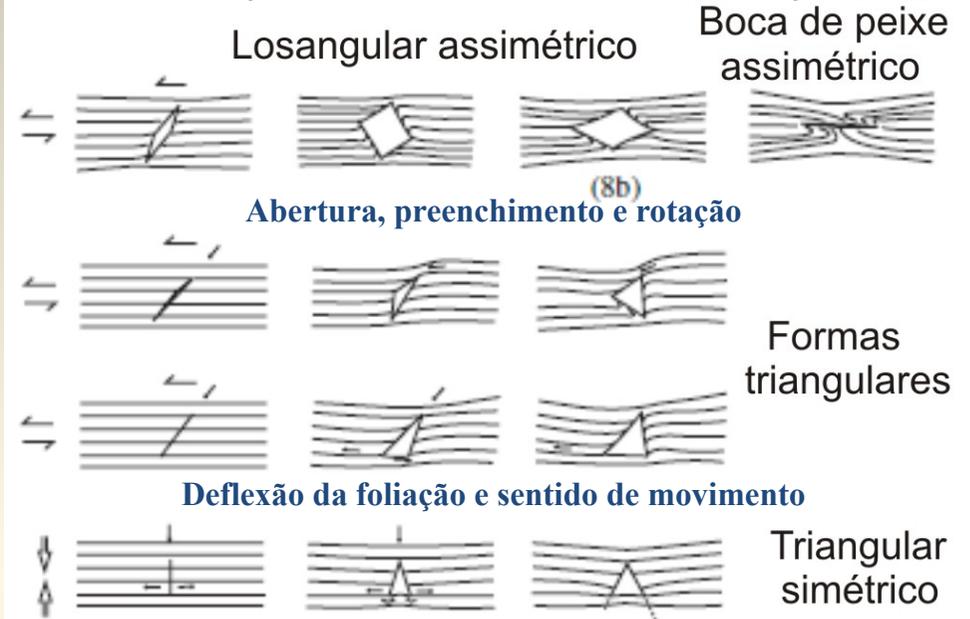
Arslan et al/ J. Structural Geol 30 (2008) 291-309

ESFORÇO PRINCIPAL ORTOGONAL A FOLIAÇÃO

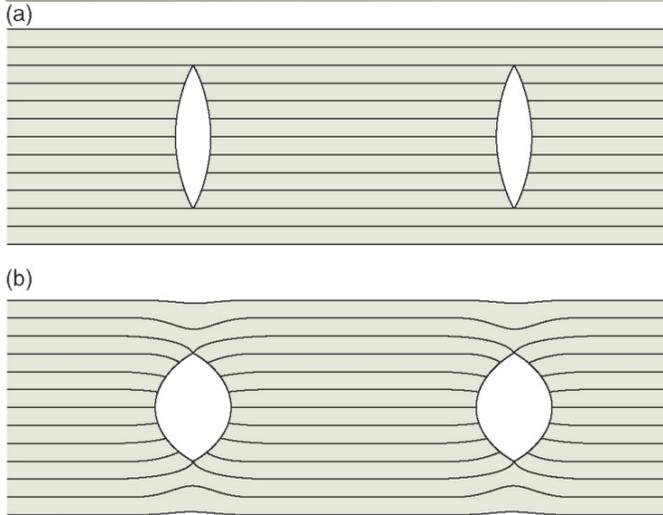
Deformação progressiva Abertura e preenchimento



ESFORÇO PRINCIPAL OBLÍQUO A FOLIAÇÃO



BOUDINS DE FOLIAÇÃO – deformação coaxial e não coaxial



Boudins de foliação simétricos – deformação coaxial



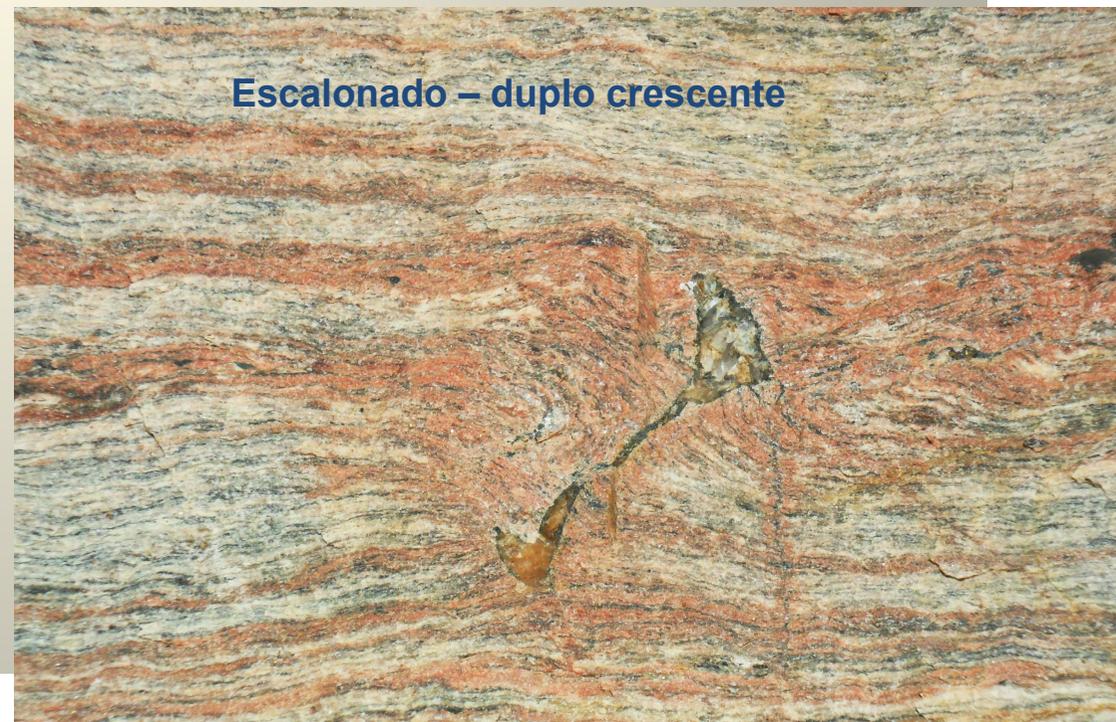
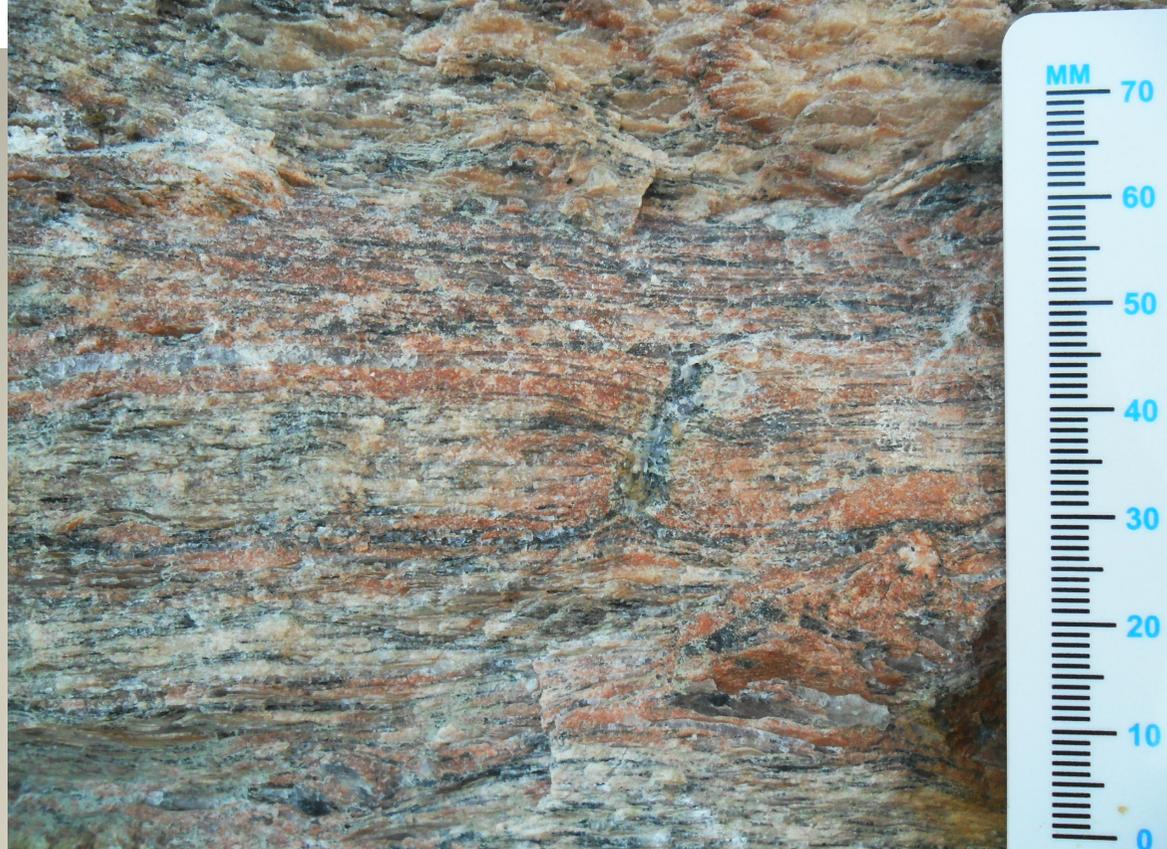
Quartzito Carrancas, Serra de Minduri



Gnaise fácies anfibolito

Boudins de foliação assimétricos – deformação não-coaxial
Abertura e rotação anti-horária de fenda preenchida por quartzo



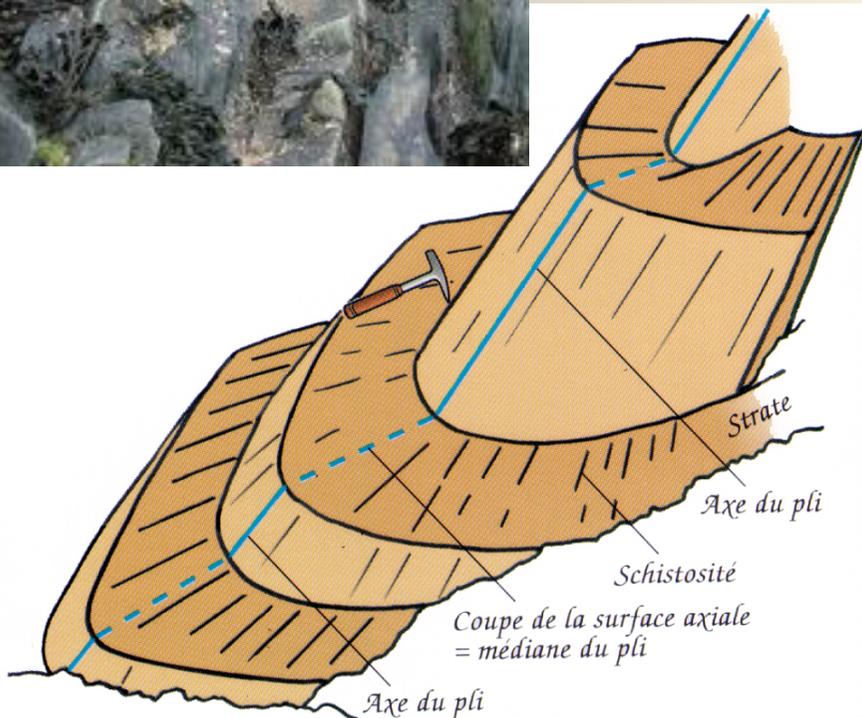


ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

Estruturas lineares tectônicas são objetos alongados que definem as **lineações penetrativas** ou **relacionadas aos eixos do elipsóide de strain** - fábrica-L (agregados minerais deformados, seixos de conglomerados deformados, etc) e as **lineações geométricas** - eixos de dobra (linhas de intersecção entre dois conjuntos de estruturas planares, linhas de charneira, eixos de dobras e lineações de crenulação).



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

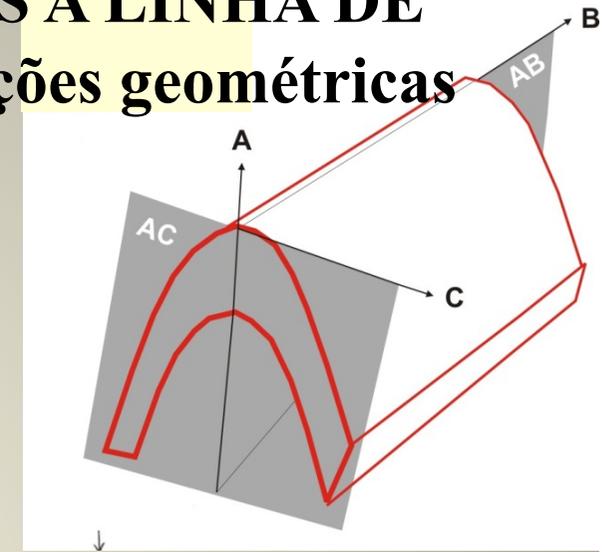


Linha de charneira do dobramento cilíndrico corresponde ao eixo-B

ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

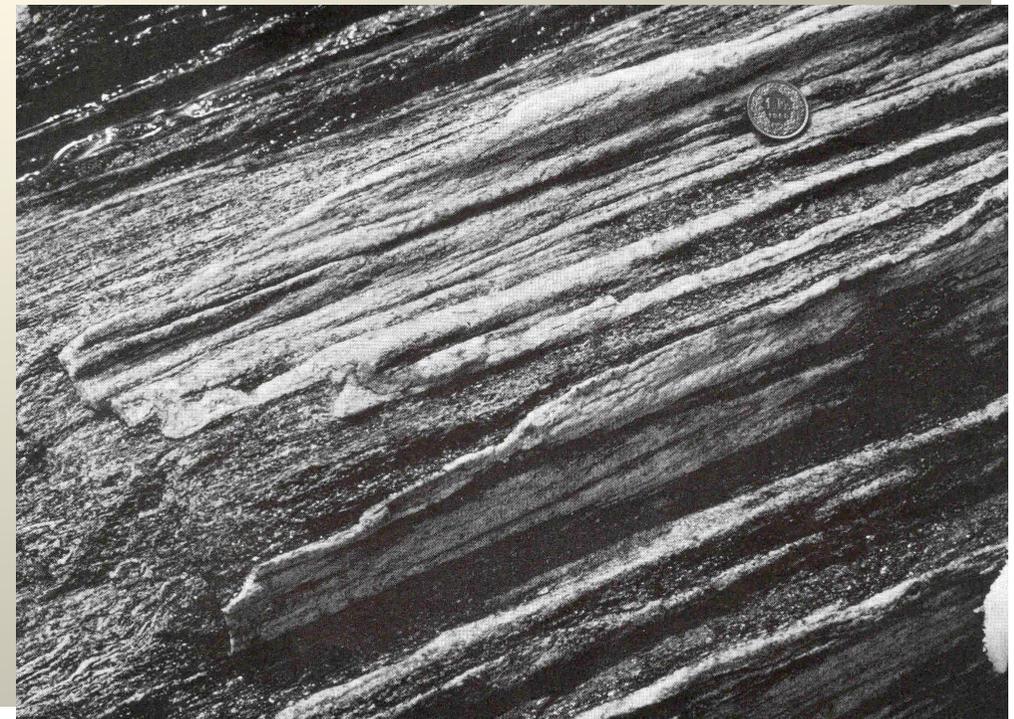
Lineação de crenulação (Lcr)

Crenulação zonal e discreta, vista na superfície da xistosidade



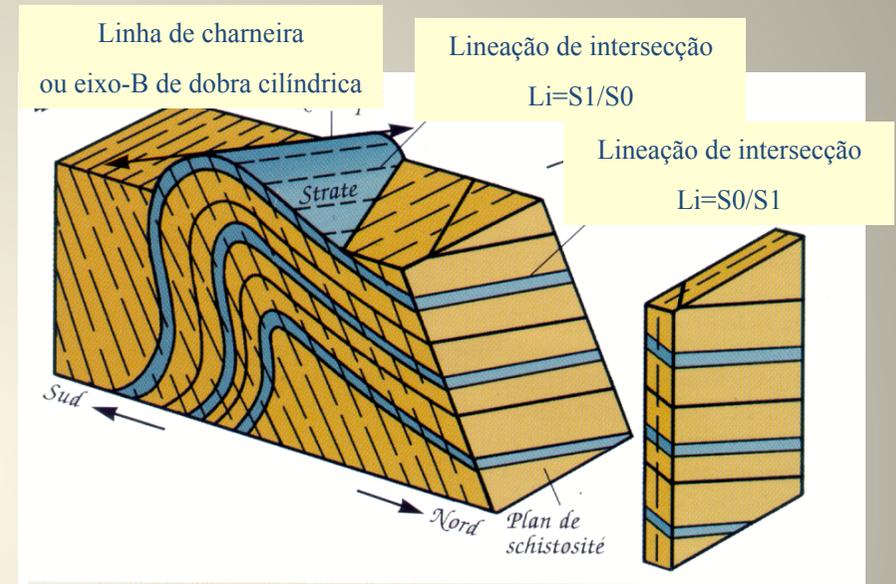
Lineação de charneiras cilíndricas – eixo-B (LB)

Dobras em cúspide e lobadas – baixo contraste de competência - *mullions*



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

Lineações de intersecção ($L_i = \text{eixo-B de dobras cilíndricas}$)

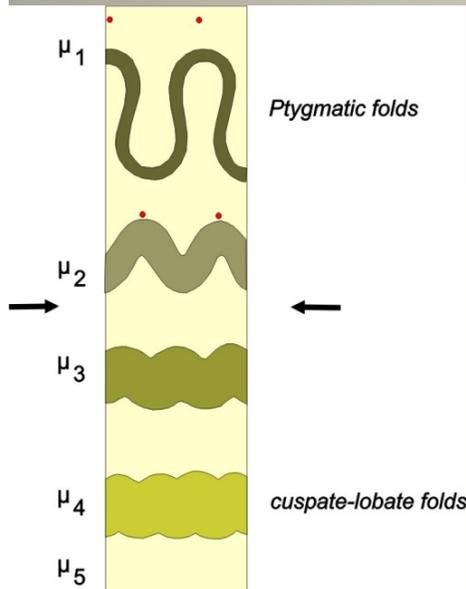


As lineações produzidas pela intersecção entre os elementos estruturais relacionados a geometria cilíndrica de um dobramento, são paralelos a geratriz deste dobramento cilíndrico.

Intersecção entre um destes elementos e uma superfície qualquer produz uma lineação qualquer.



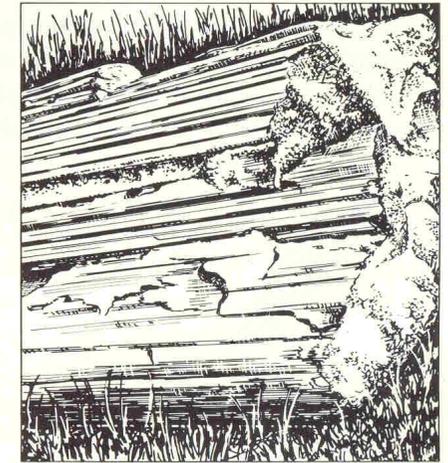
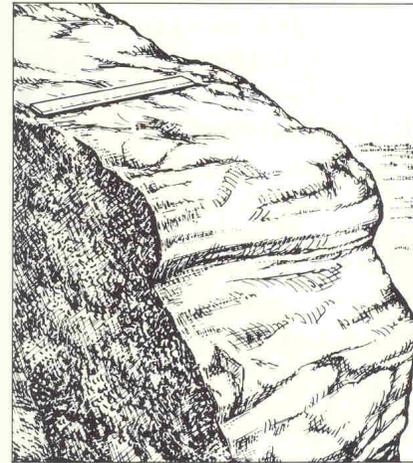
ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas



ESTRUTURAS EM MULLION

Baixo contraste de competência e dobras concêntricas.

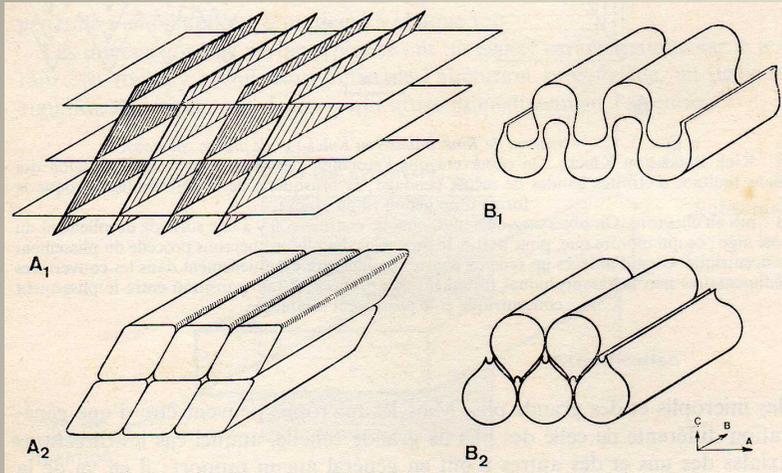
Estruturas colunares e cilíndricas, paralelas ao eixo-B do dobramento



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

Lineações de intersecção ($L_i = \text{eixo-B de dobras cilíndricas}$)

COLUNAS OU MULLIONS DE INTERSECÇÃO E DOBRAMENTO

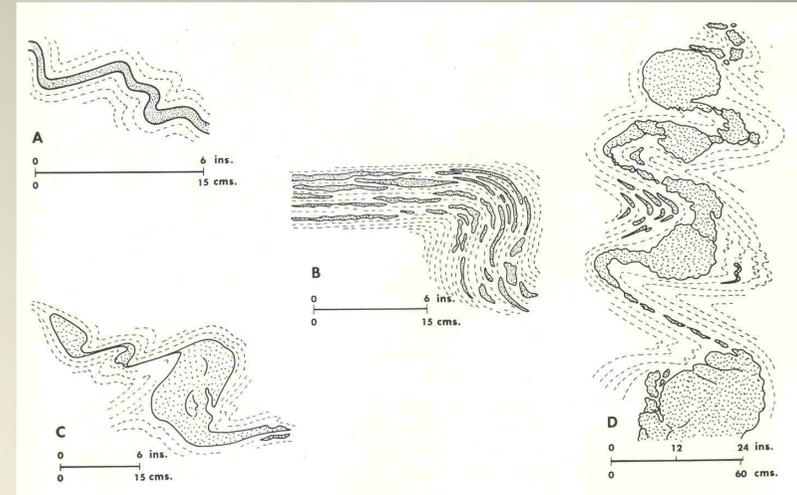


ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

Rodding ou rods

Corpos cilíndricos, monominerálicos e de composição distinta da rocha encaixante. Sua origem está ligada a segregação mineral, por fluidos e a partir da rocha encaixante, durante o metamorfismo e o dobramento, seguido de extensão.

São pequenas dobras, de flancos adelgaçados ou inexistentes, sob intensa deformação. Os cilindros das zonas de charneira orientam-se na direção B do dobramento maior.

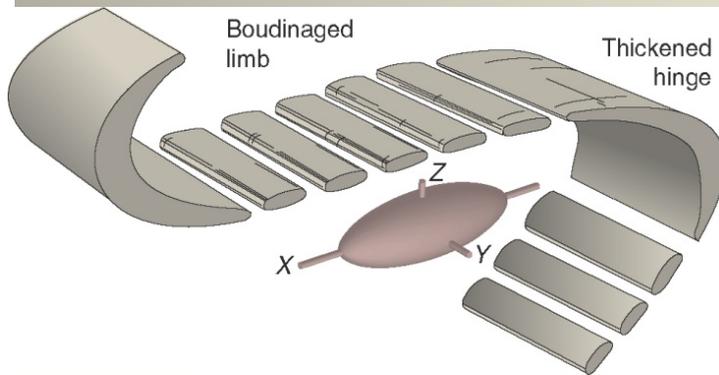


Lineação, na superfície dobrada, definida por charneiras concêntricas e alongadas



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO – lineações geométricas

Boudins desenvolvidos durante o dobramento com extensão paralela ao plano axial (ao longo do eixo-a) e perpendicular ao eixo-B. Neste caso a linha de *boudin* ou *neck* de boudin (eixo-Y) é paralelo eixo-B da dobra

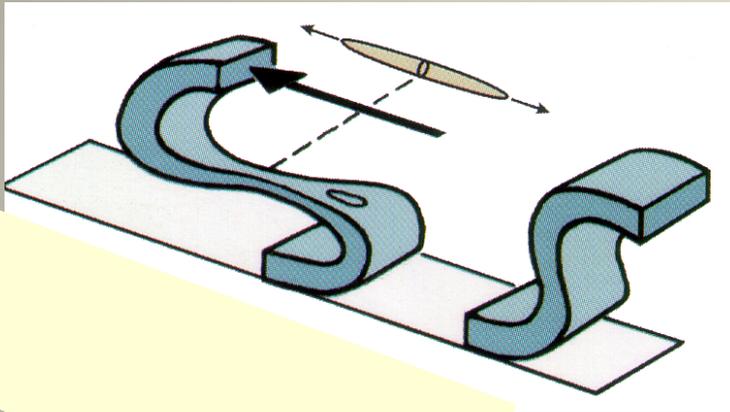


Eixo-X paralelo ao eixo-B



ESTRUTURAS LINEARES SENSÍVEIS A FORMA DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO

LINEAÇÕES DE ESTIRAMENTO – EIXO-X DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO

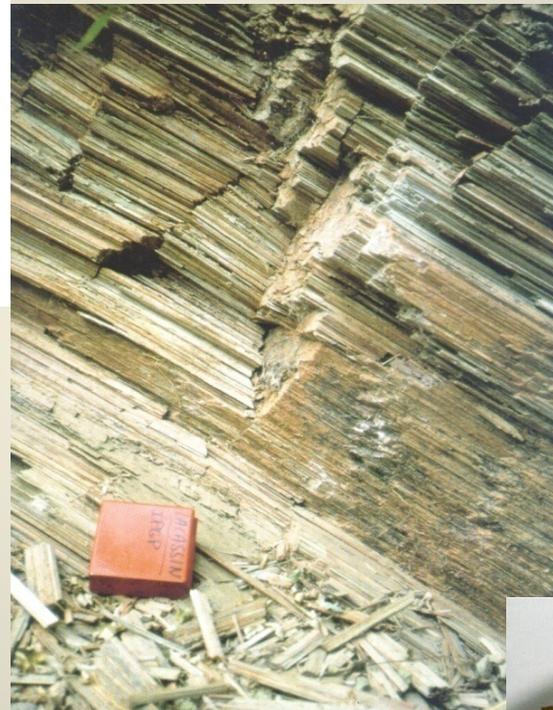


Dobra passiva com estiramento, por deformação não-coaxial, paralela ao eixo-a cinemático, no plano axial.

Lineações que indicam uma das direções de alongação principal de elipsóides de deformação.

Os lápis de rocha, quando produzidos pela intersecção entre clivagens, relacionam-se a linha de charneira das dobras da ultima fase. Não há padrão textural isotrópico no plano perpendicular a lineação (YZ)

Lápis de rocha – tectonito-L (por estiramento)



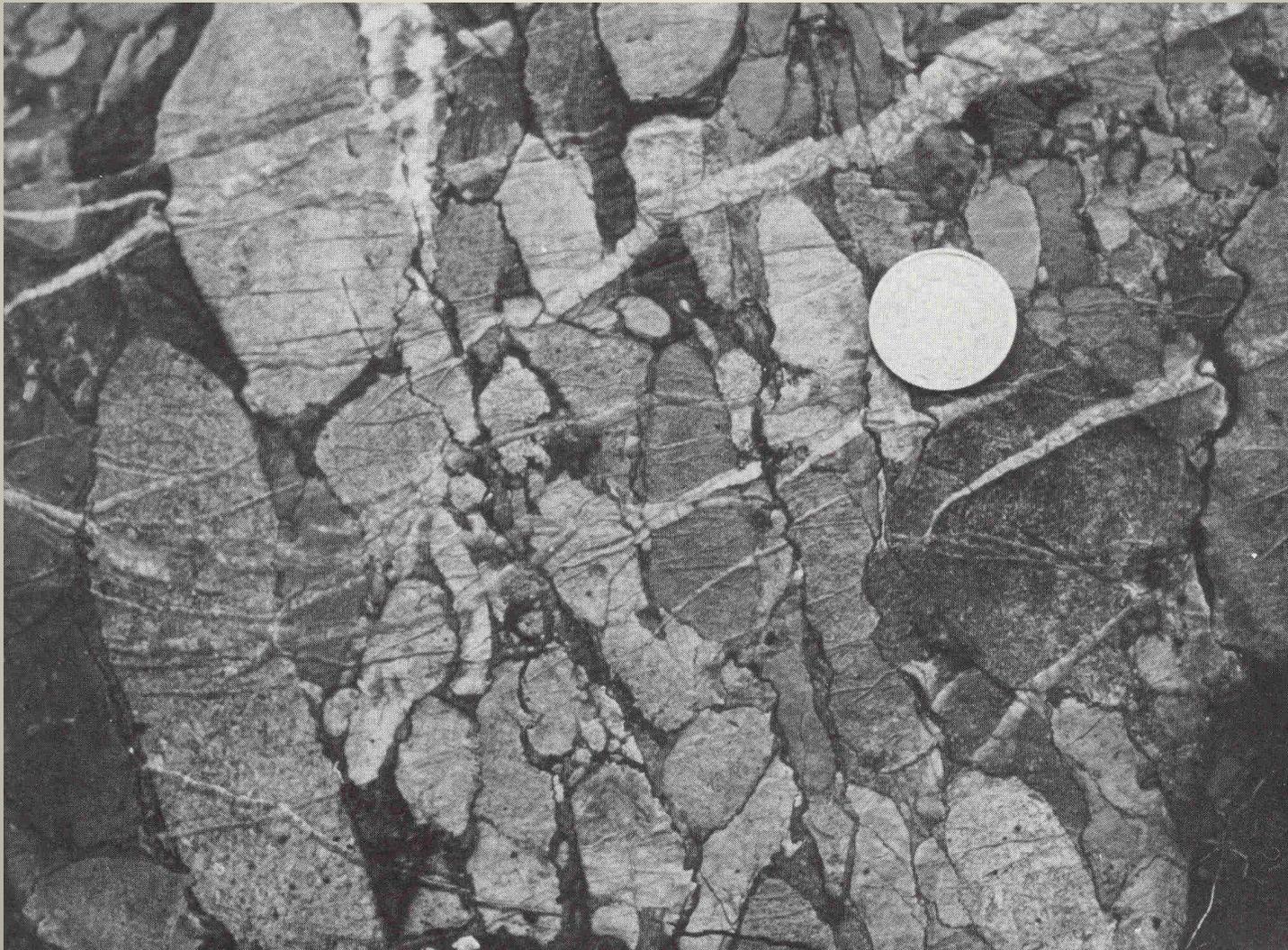
Notar as estruturas nos planos XY e YZ do tectonito-L



ESTRUTURAS LINEARES SENSÍVEIS A FORMA DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO

Exemplo da elongação preferencial de seixos em uma rocha conglomerática. Notar a associação com fendas de tração.

Orientação do eixo-X do elipsóide de deformação

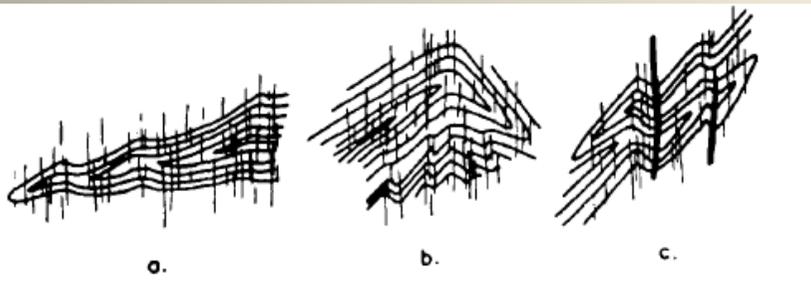


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Dobras Pré-Xistosas

CRITÉRIOS

- 1-xistosidade cortando dobra
- 2-dobramento do plano axial
- 3-dispersão de lineações
- 4-figuras de interferência

Relação entre a xistosidade e a dobra anterior



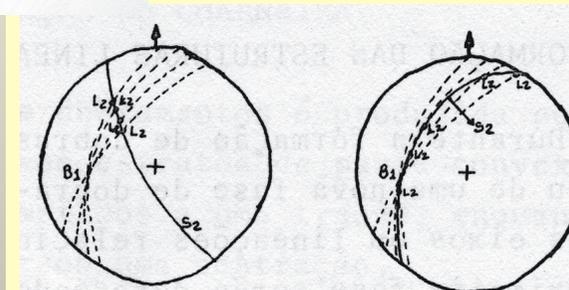
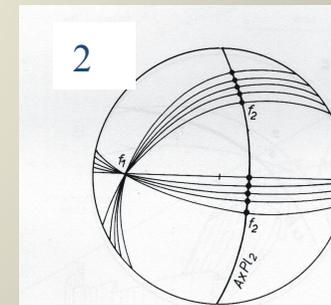
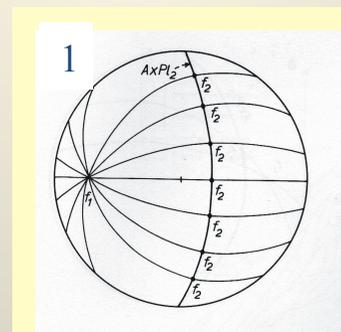
Os tipos básicos da dispersão de lineação de intersecção (L_i) entre a xistosidade (S) e uma superfície dobrada anteriormente.

L_i dispersa mas contida na foliação- S . Define, no estereograma, um grande-círculo que representa a foliação- S .

A maior ou menor dispersão depende da orientação da S_2 em relação ao plano axial da dobra anterior e a forma da dobra anterior

Xistosidade cortando dobra e a dispersão de lineações de intersecção

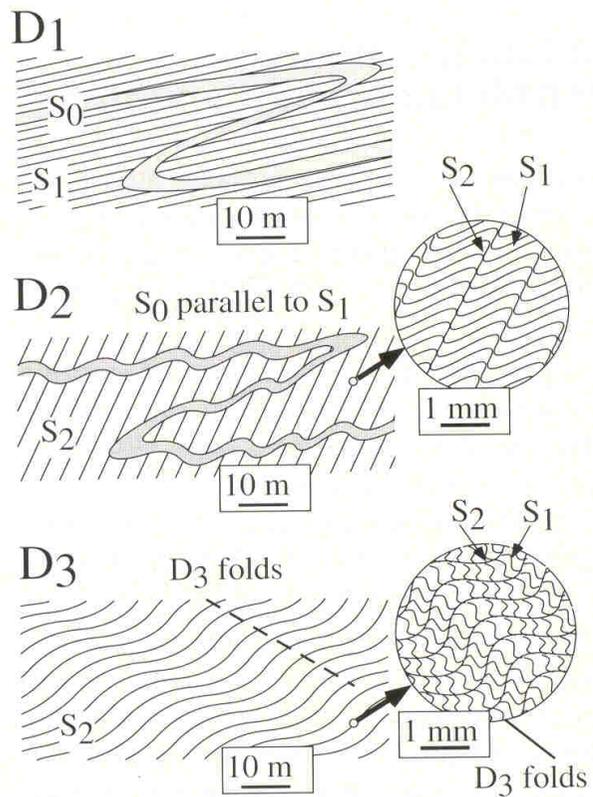
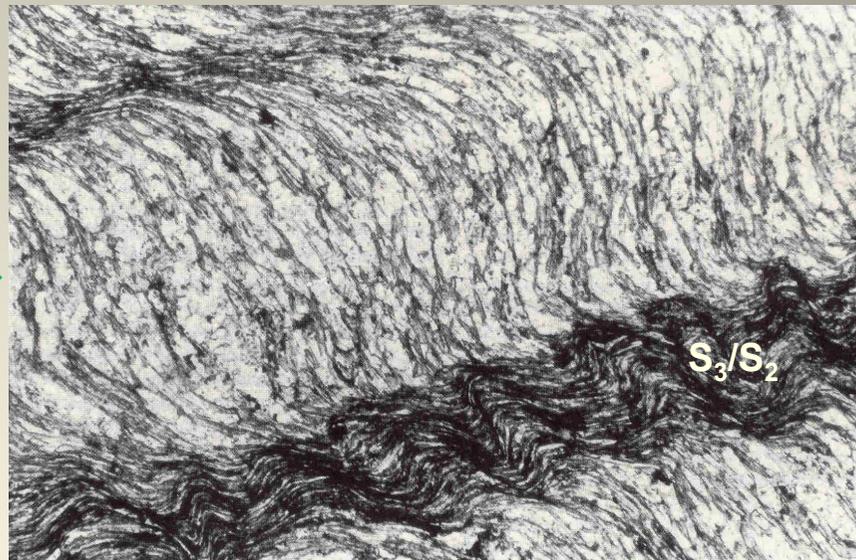
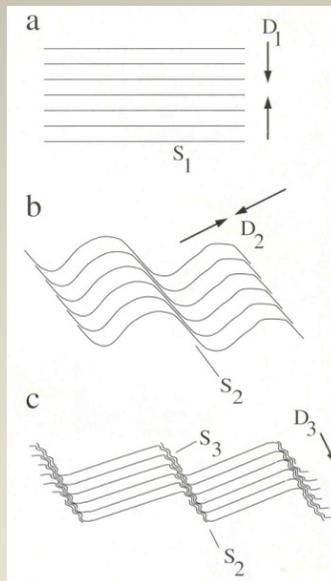
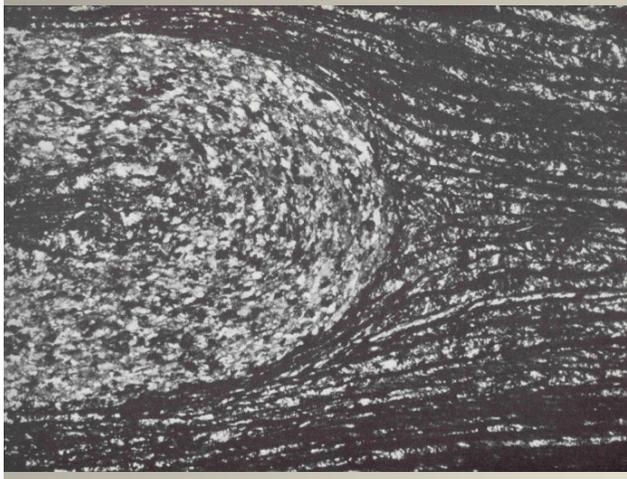
1. Dobras com baixa razão A/λ : a clivagem ou xistosidade superposta pode ser definida pelo plano que contém as lineações de intersecção dispersas.
2. Dobras com charneiras agudas, tipo sanfonadas: L_i concentradas, no plano da xistosidade superposta, em duas orientações controladas pelos flancos da dobra precedente.
3. Dobras antigas quase-isoclinais:
 - 3.1 Xistosidade superposta oblíqua ao plano axial anterior : L_i concentrada (simetria axial)
 - 3.2 Xistosidade superposta subparalela ao plano axial da dobra anterior: grande dispersão de L_i



A dispersão das lineações de intersecção entre uma xistosidade e uma superfície já dobrada anteriormente, depende da forma das dobras precedentes e define a xistosidade.

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Superposição de Xistosidades

S_2/S_1



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Lineações dobradas e superposição de lineações



Lineações de intersecção $L_i = L_1$ entre as superfícies- S_0 e a foliação S_1 . As superfícies S_1 e as lineações L_1 estão dobradas (linha de charneira D_2) e cortadas pela L_2 (charneiras de pequenas dobras com λ subcentimétricos a milimétricos)

Lineação L_2 ($S_0=S_1$), na superfície S_2 , dobrada e cortada pela lineação de intersecção, $L_i=L_3=S_3/S_2$

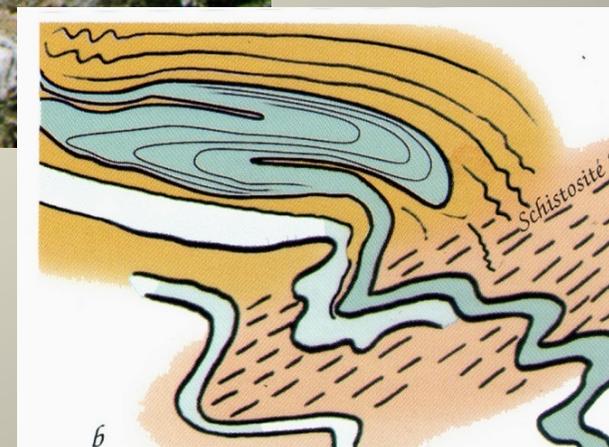
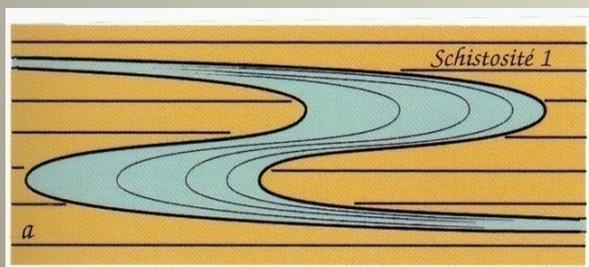
Lineações de crenulação- L_3 em lâminas micáceas da foliação- S_1 preservadas em charneiras sinformais L_2



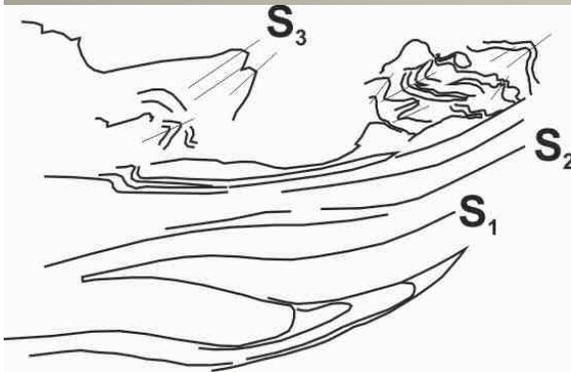
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Dobra com xistosidade plano-axial dobrada



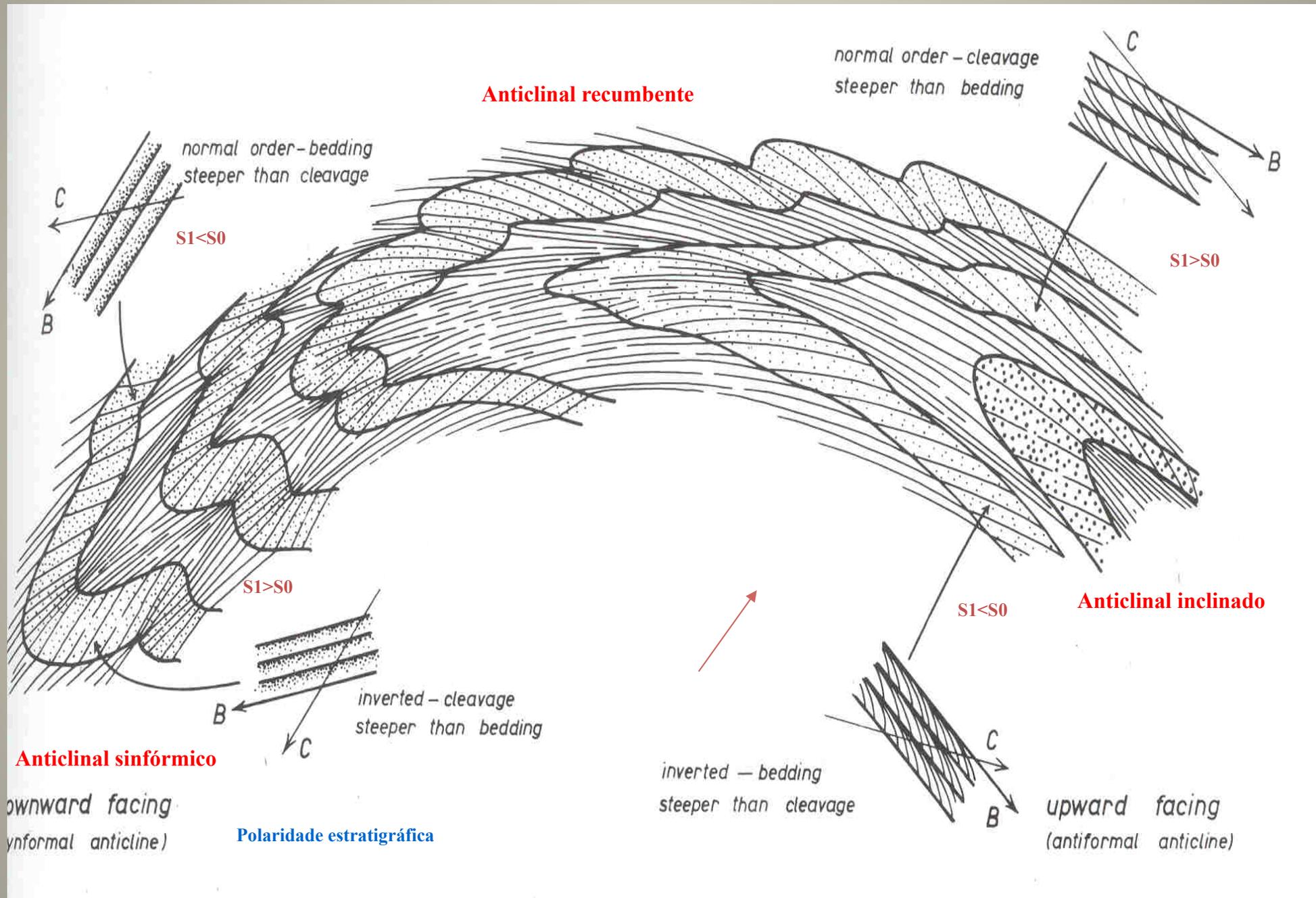
Dobramento passivo, isoclinal, D_1 e redobramento anisopaco (sub-classe 1C) D_2



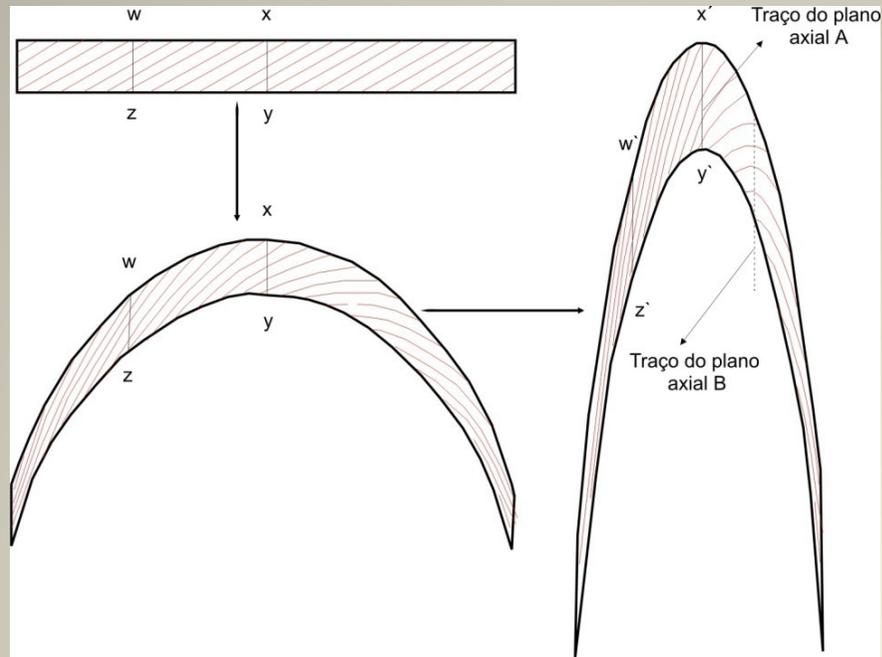
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Dobra com xistosidade plano-axial dobrada



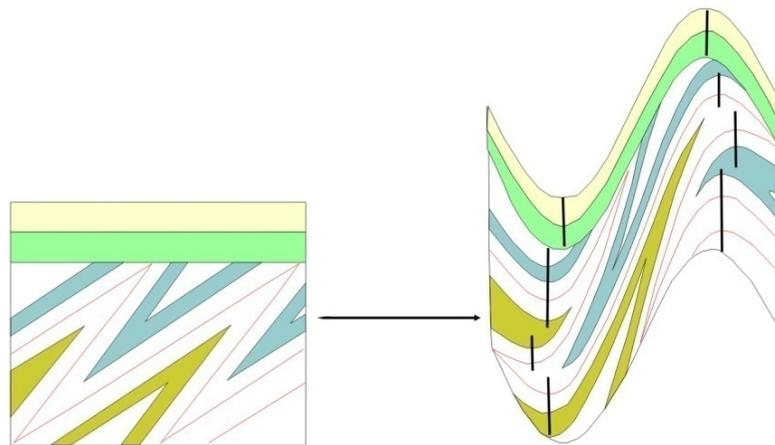
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Dobra com xistosidade plano-axial dobrada



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Configuração dos Planos-Axiais



Modificação por dobramento de duas superfícies inclinadas

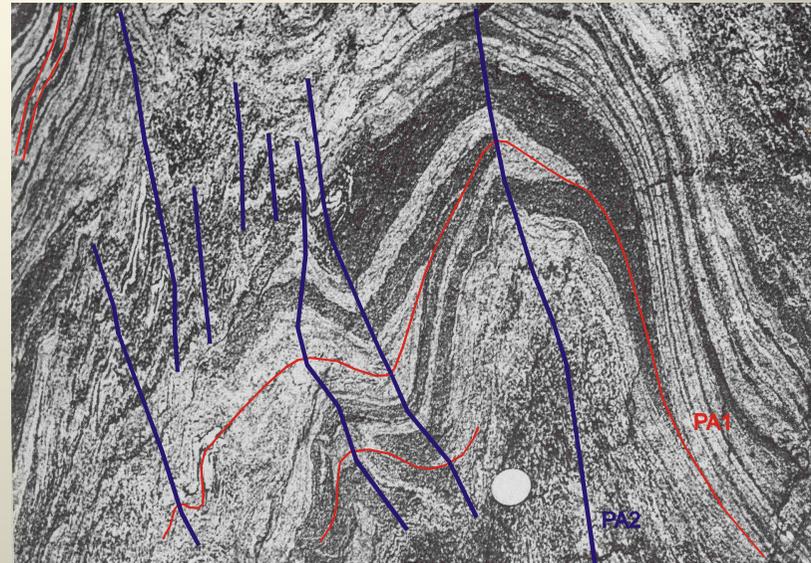
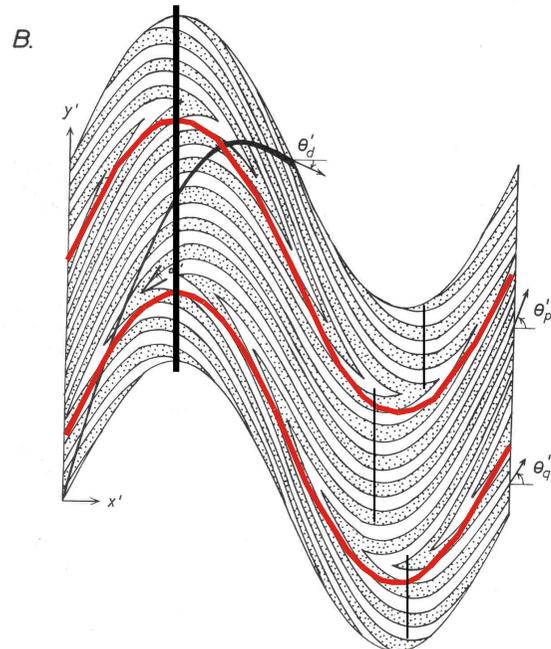
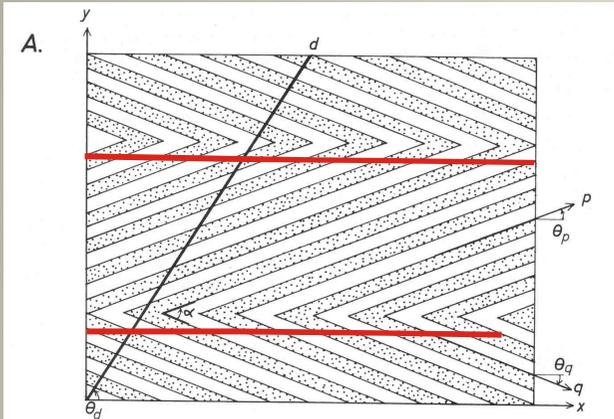


Dobramento similar de dobras pré-existent e de uma superfície de discordância angular. Verificar a modificação escalonada da posição dos traços dos planos-axiais das novas dobras, controlada pelas diferentes orientações das superfícies dobradas.

Descontinuidade no plano axial do redobramento

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Configuração dos Planos-Axiais

O redobramento poderá ser simétrico se as superfícies dobradas anteriormente encontrarem-se perpendiculares ao plano axial superposto



A disposição curviplanar (dobrada) de um plano axial (ou de elementos estruturais a ele relacionados – foliações) é o princípio básico de hierarquia entre as fases superpostas.

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

A superposição de dobras de dimensões semelhantes, em um mesmo espaço, gera uma FIGURA DE INTERFERÊNCIA

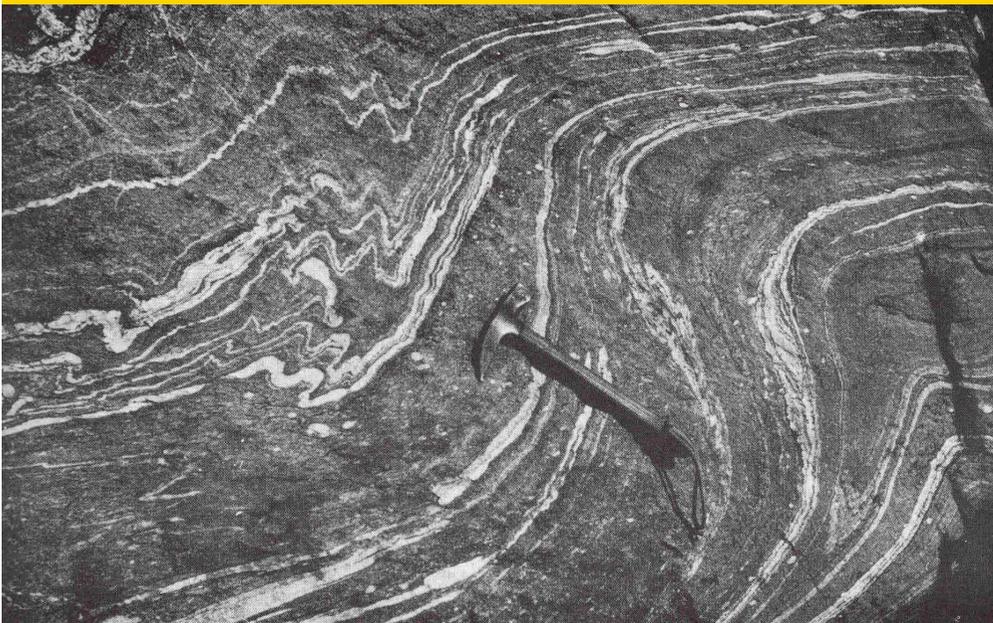
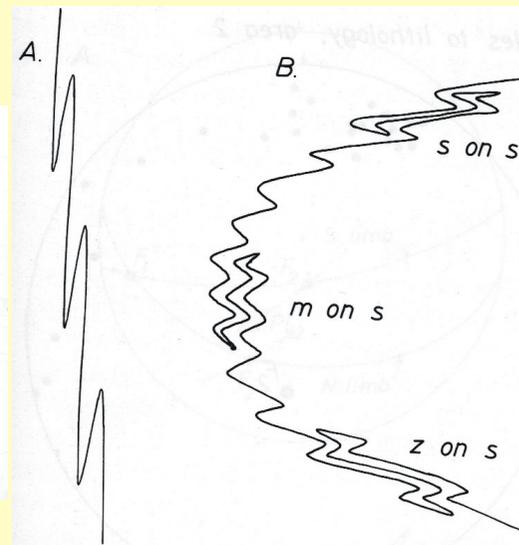
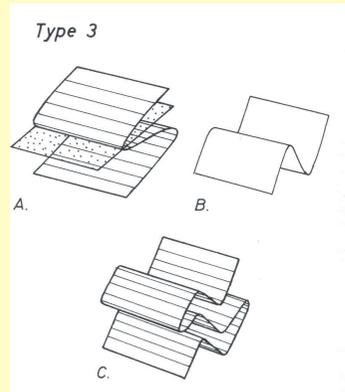
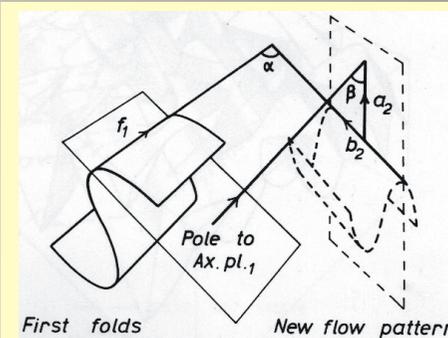


Figura de interferência tipo-3 (em laço)

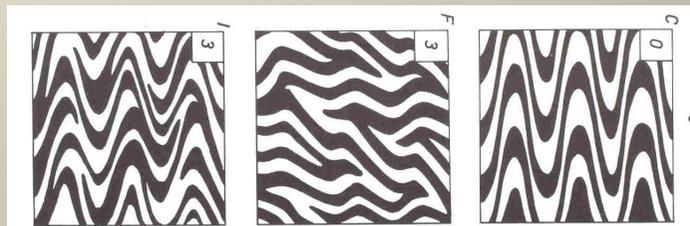


A forma da figura de interferência depende das relações angulares : 1- entre os eixos das fases superpostas (B1 e B2), 2- entre a direção a_2 do plano axial superposto e a perpendicular ao plano axial precedente.



Eixos das dobras superpostas são paralelos (dobras homoaxiais) e os planos axiais possuem mergulhos quase-ortogonais.

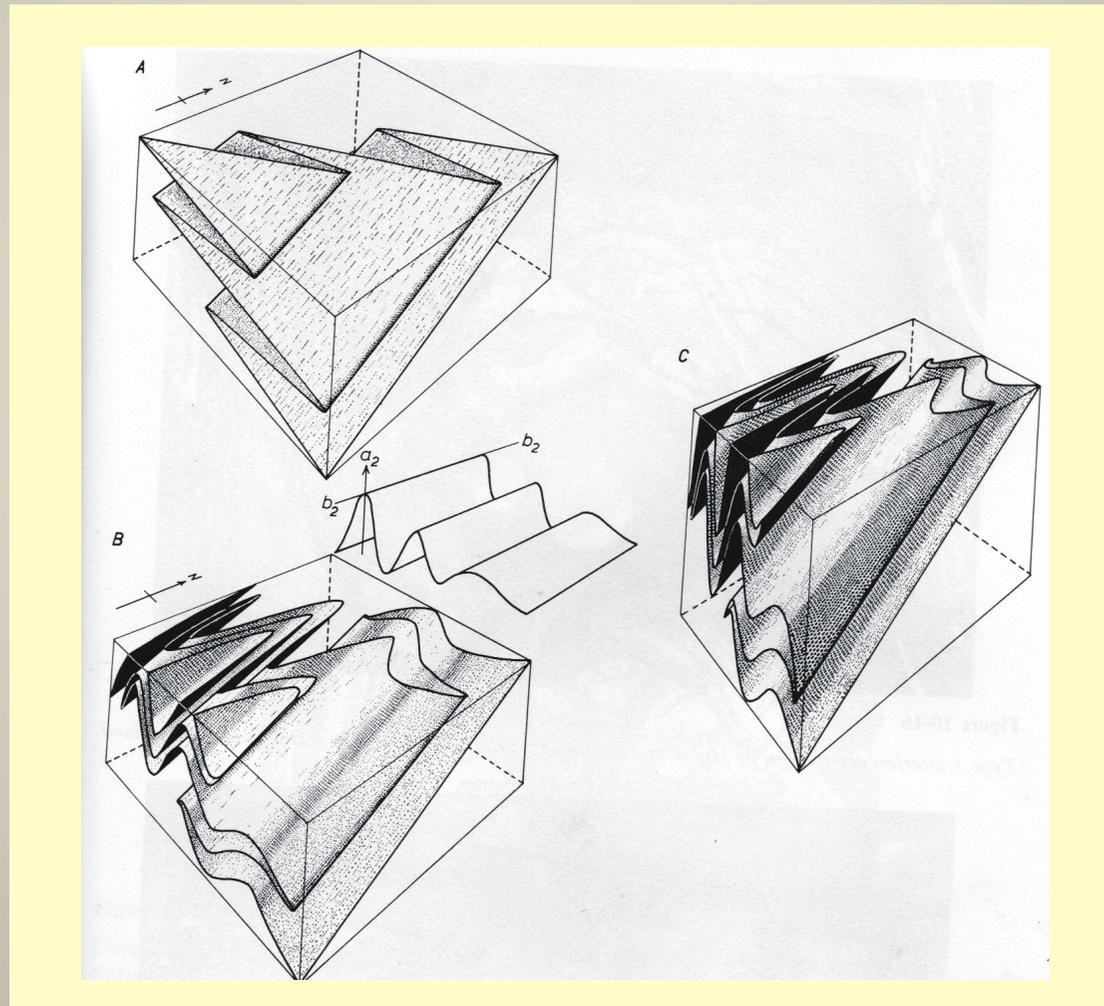
ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a_2 , NO PA2
 90° Entre 0° e 90° 0°



ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2
 0°

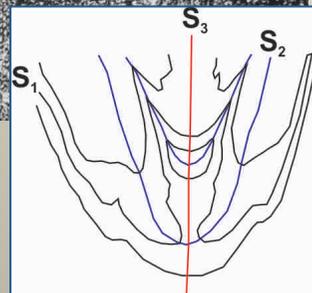
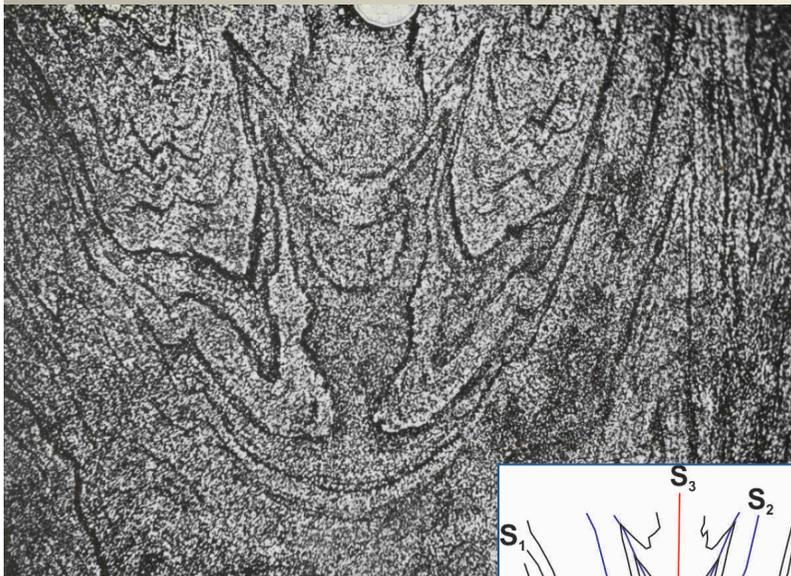
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

FIGURA DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-3 (EM LAÇO)

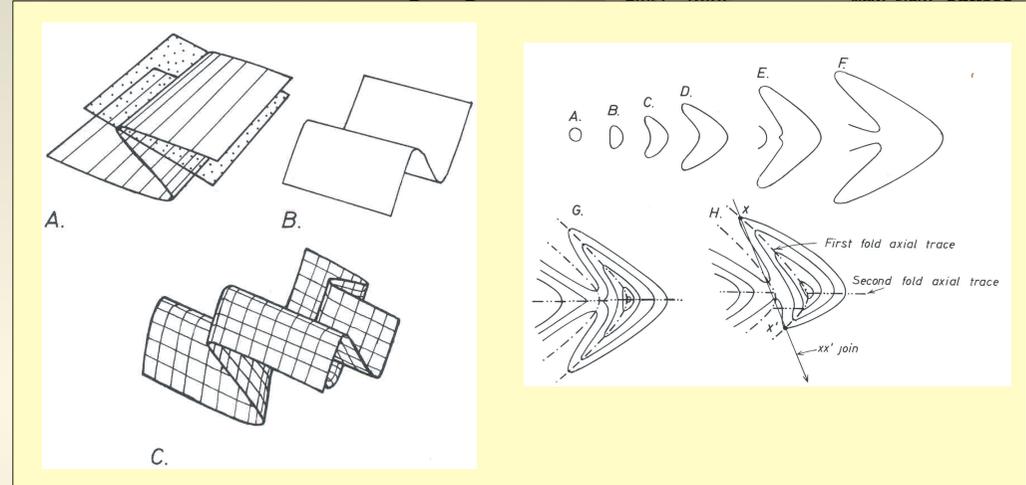
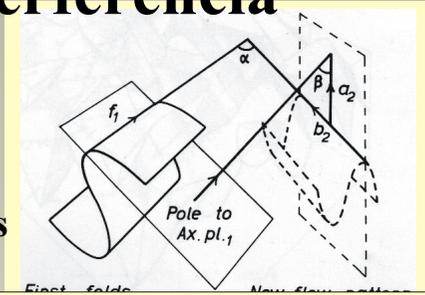


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)

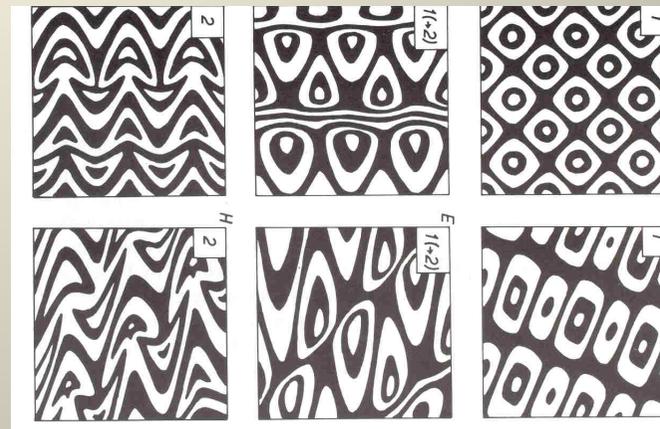


Grande obliquidade entre os eixos e os plano axiais das dobras superpostas.



ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a2, NO PA2

90° Entre 0° e 90° 0°



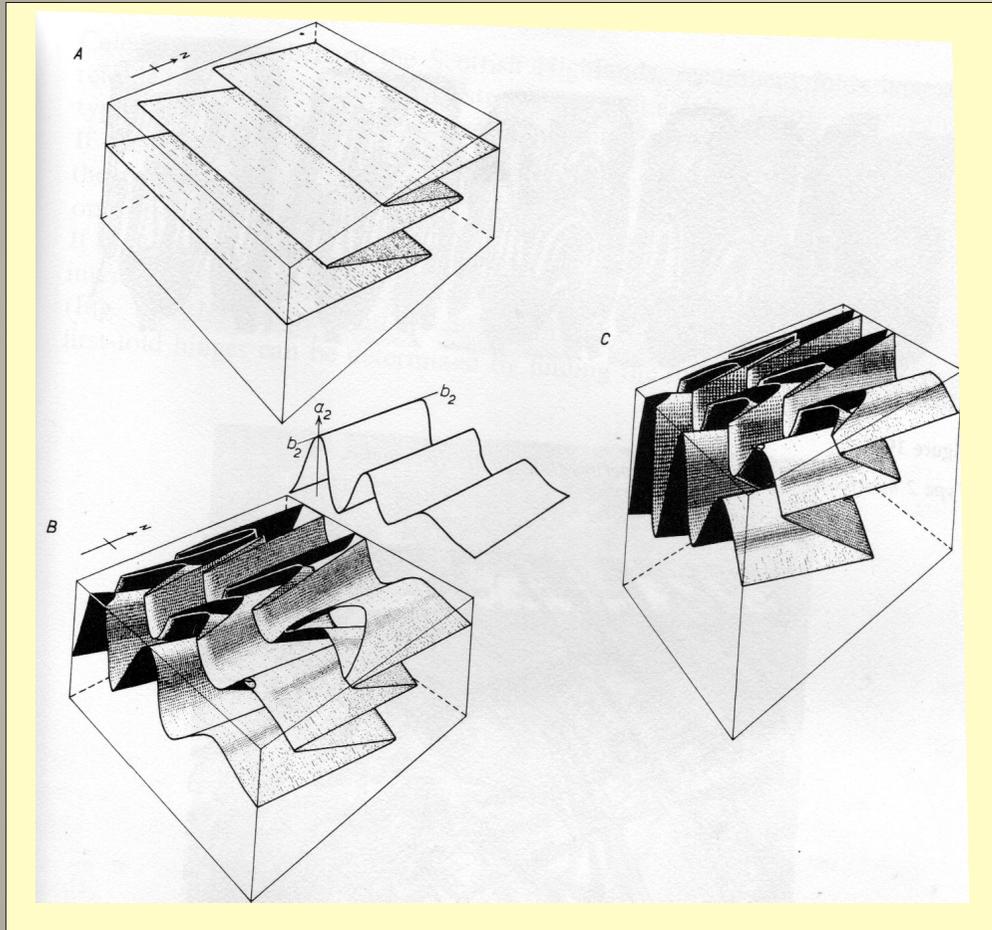
90°

0°-90°

ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)

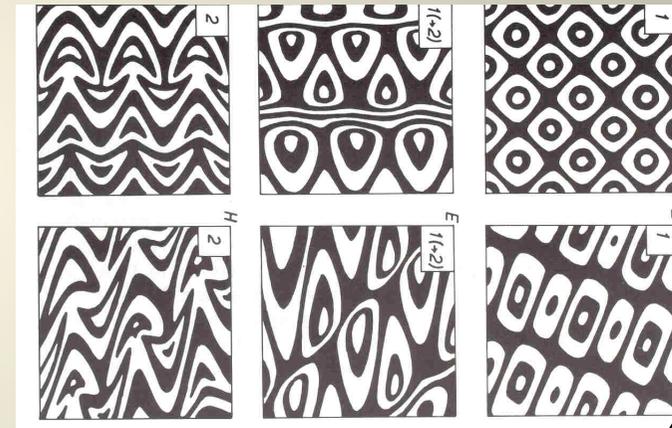


ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a2, NO PA2

90°

Entre 0° e 90°

0°



90°

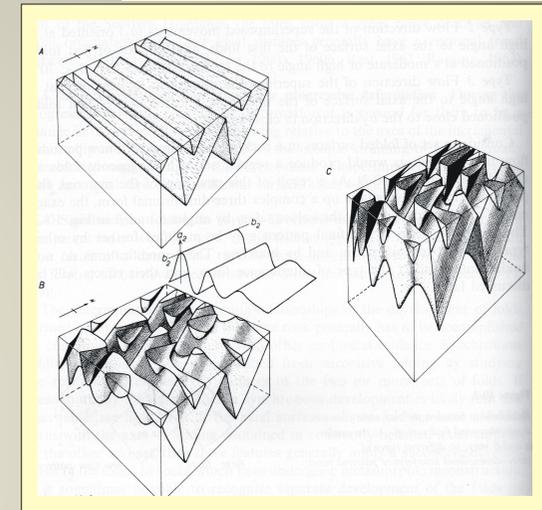
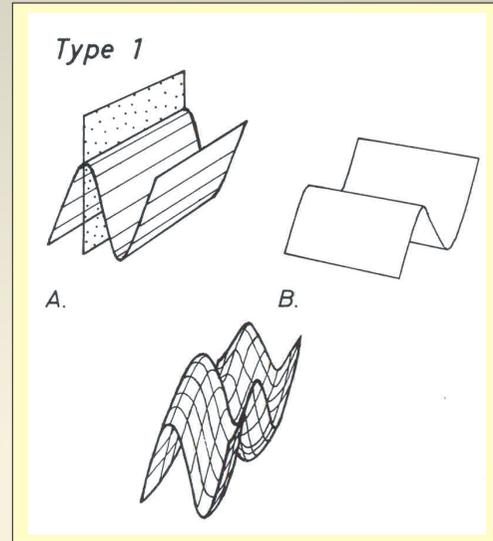
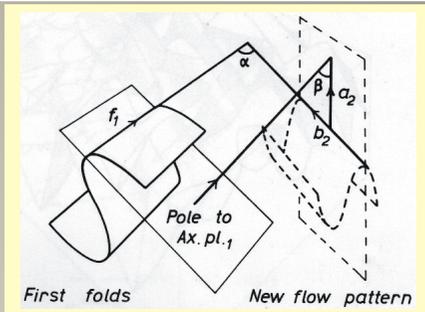
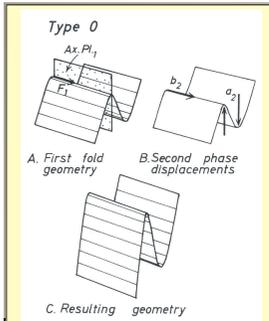
0°-90°

ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

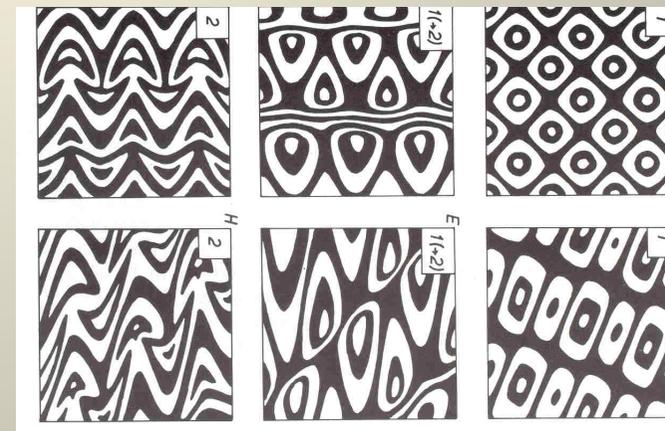
FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-1 (DOMOS E BACIAS)

Padrão ortogonal do dobramento superposto



ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a2, NO PA2

90° Entre 0° e 90° 0°



90°

0°-90°

ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

0 5 10 15 20
Scale in cm

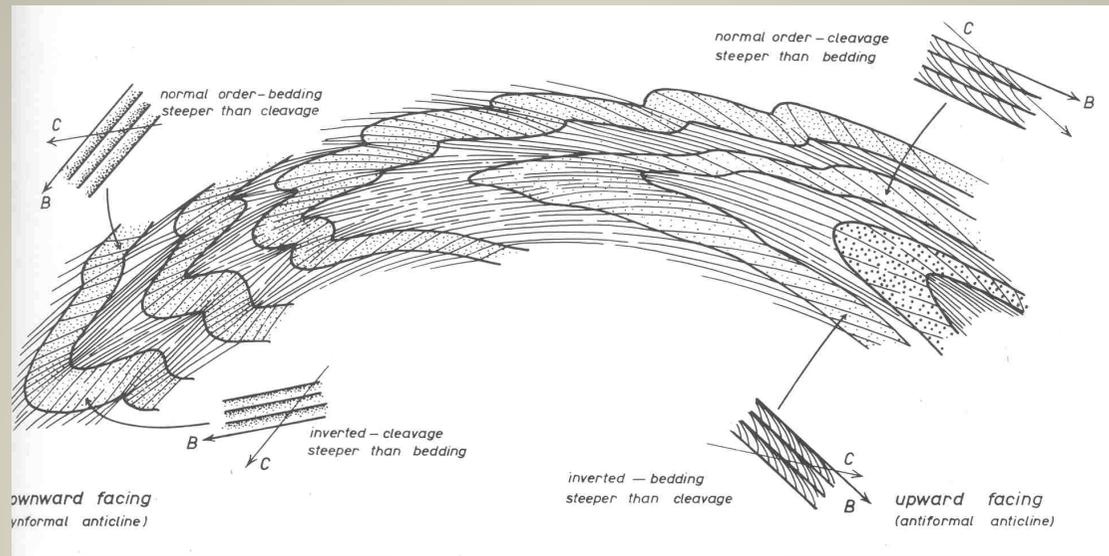
First fold trend

Second fold trend

- Antiform
- Synform
- Areas of mutual antiform culmination
- Areas of mutual synformal depression

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

Qual é a figura de interferência ?

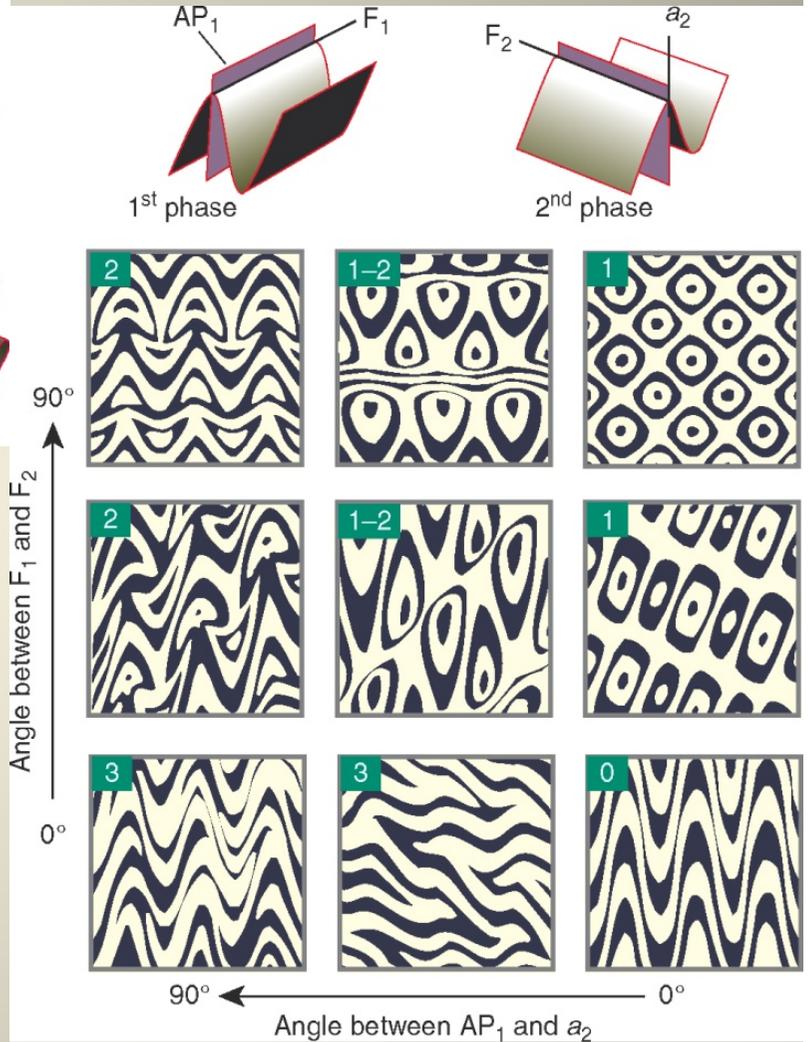
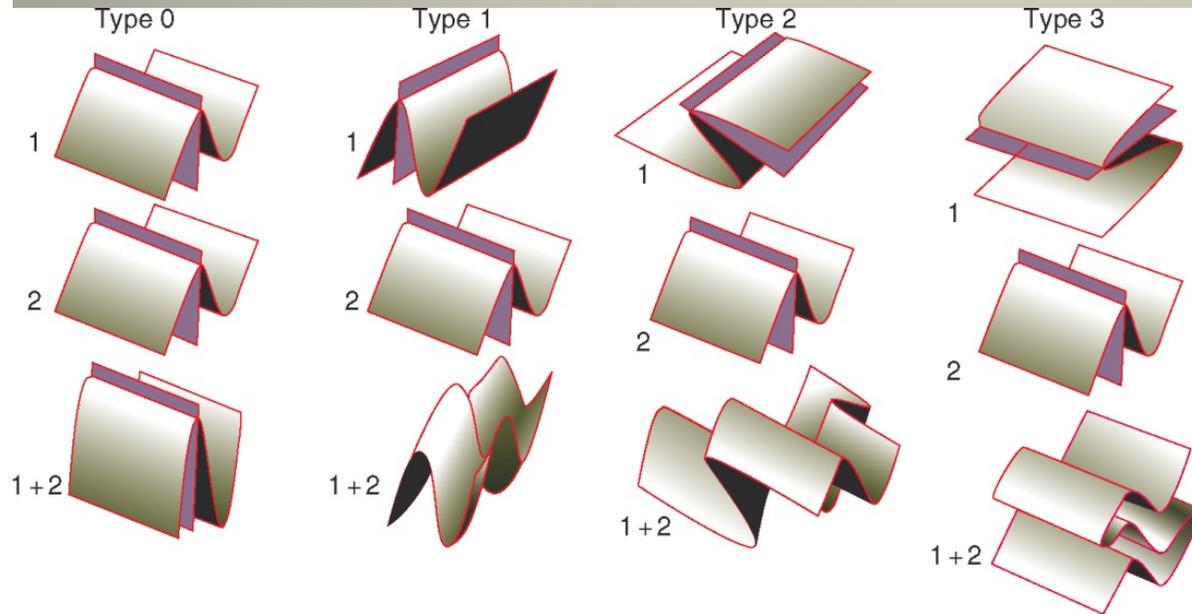


Qual é a figura de interferência ?

Qual o critério para definir a presença ou não de dobramento superposto nesta foto?

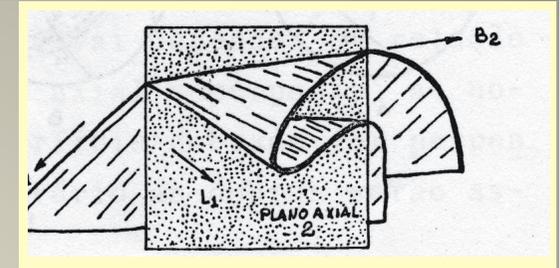


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

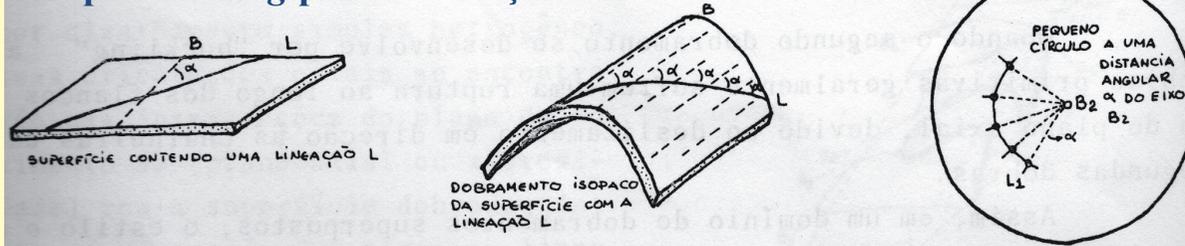


Análise do dobramento

DEFORMAÇÃO DE LINEAÇÕES ANTERIORES

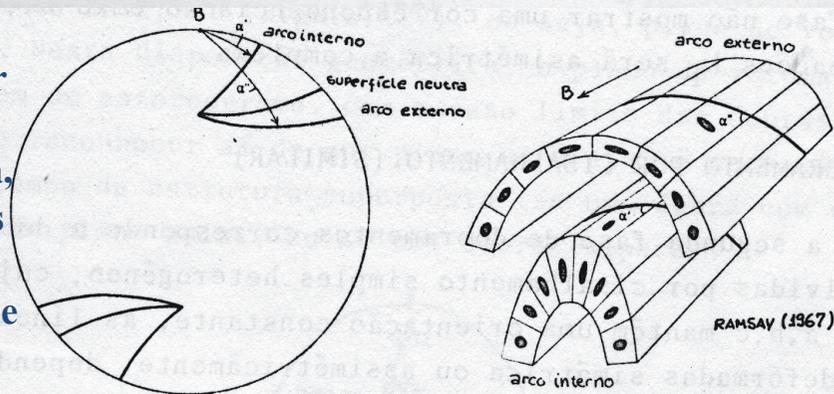


Dobras por *buckling* por deformação de flanco – sub-classe 1B

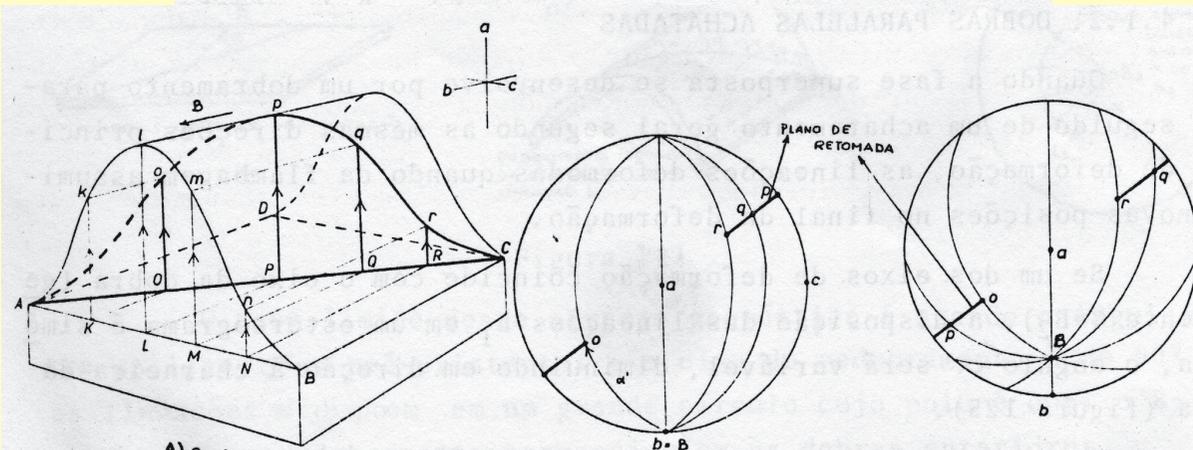


Lineação L1 deformada por redobramento isopaco (sub-classe 1b)

Dobras por *buckling* por deformação de charneira, alternâncias de classes e sub-classes de forma



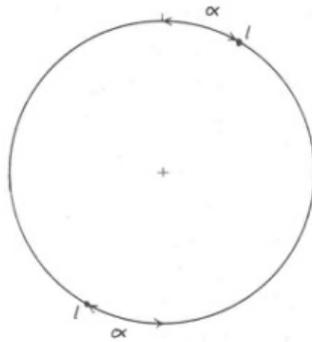
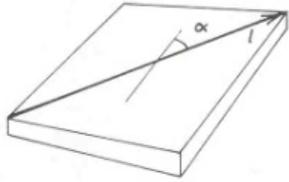
Lineação L1 deformada por redobramento anisopaco por *buckling* com deformação de charneira (sub-classes 1a e 1c)



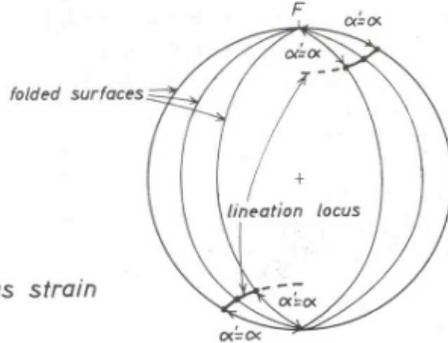
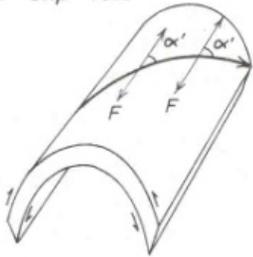
Lineação L1 deformada por redobramento similar (classe 2)

DEFORMAÇÃO DE LINEAÇÕES ANTERIORES

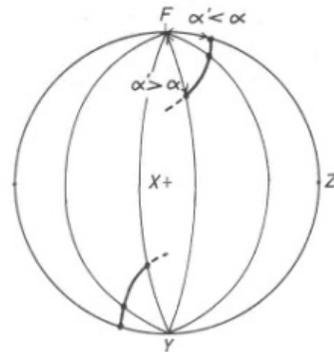
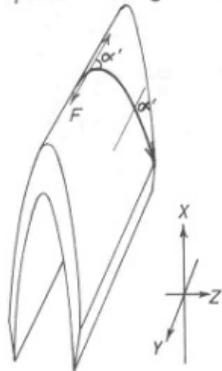
A. Undeformed original lineation



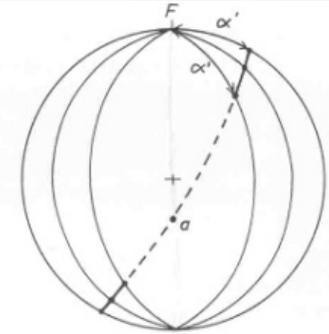
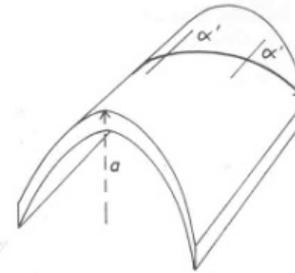
B. Flexural slip fold



C. Flexural slip plus homogeneous strain



D. Shear fold



E. Shear fold plus homogeneous strain

