

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.

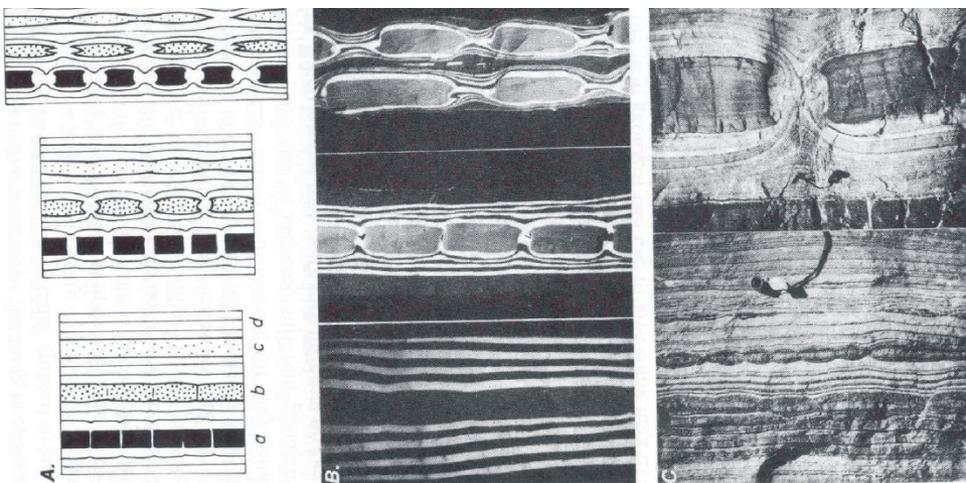
BOUDINS

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

As estruturas **pintch-and-swell** são sítios adelgaçados e regularmente espaçados de um estrato competente, onde os elementos de **boudins** encontram-se conectados, sem separação em fragmentos isolados.

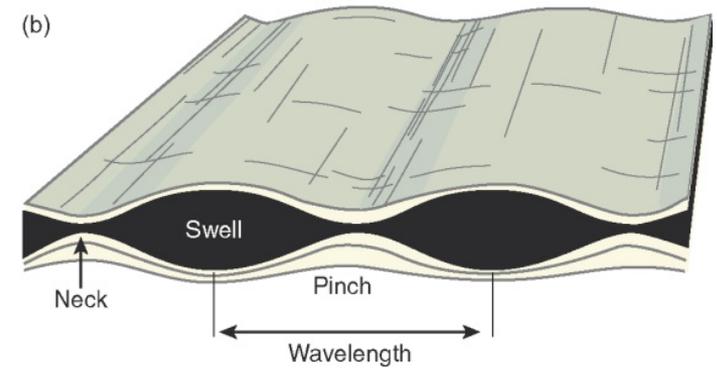
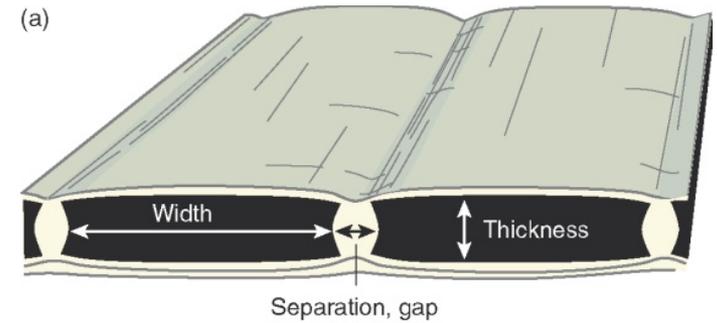
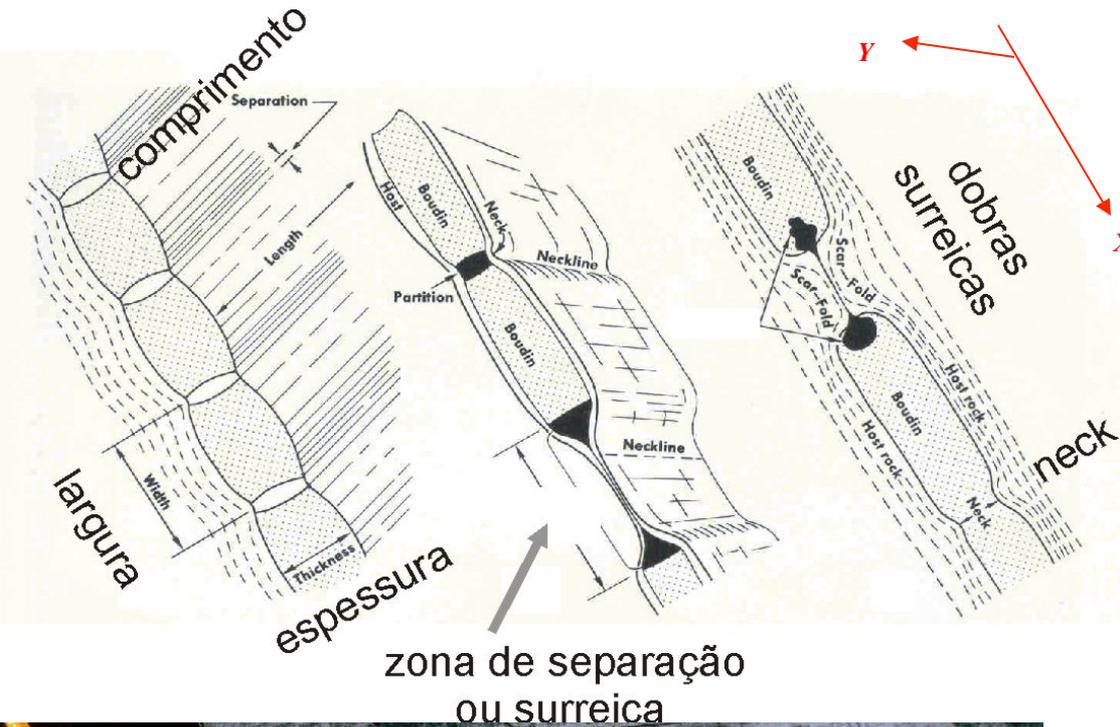
A forma dos **boudins** e estruturas **pintch-and-swell** são controladas pela temperatura, taxa de deformação (*strain*), contraste de viscosidade, ou pelo desenvolvimento da foliação.

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

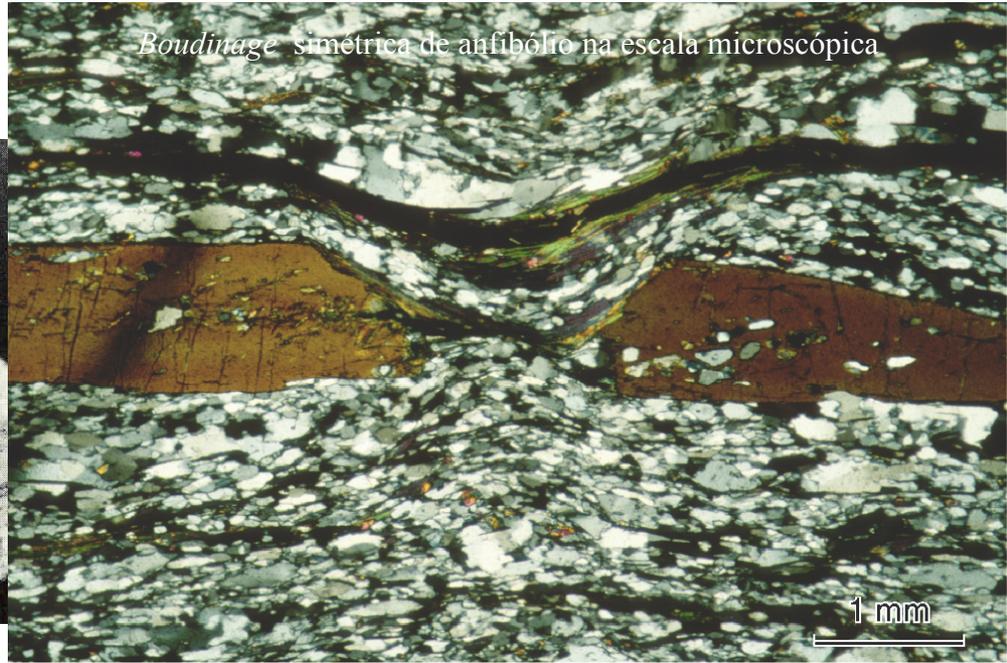
Neck de boudin – lineação paralela ao eixo Y do elipsóide de deformação.

BOUDINS

A migração de fluidos para as zonas de separação dos *boudins*, por fluxo dirigido de soluções e precipitação, pode indicar as condições do metamorfismo durante a extensão.



Boudin de anfibolito associado a fusão parcial da encaixante e injeção de líquido silicático a partir da zona de separação do *boudin*



Boudinage simétrica de anfibólio na escala microscópica



Boudin simétrico com fendas de tração nas zonas surreicas

BOUDINS

BOUDINS E METAMORFISMO DE BAIXA TEMPERATURA – FENDAS-T (FENDAS DE TRAÇÃO)

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



BOUDINS

BOUDINS E METAMORFISMO DE ALTA TEMPERATURA



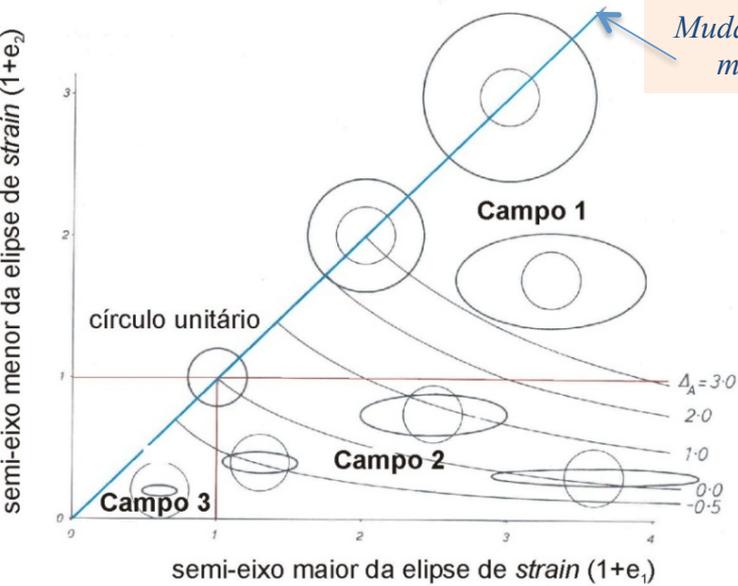
Granito hololeucocrático muito grosso na zona surreica de *boudin* de anfibolito em gnaissse (Armação de Búzios, Rio de Janeiro)

Fusão parcial sin-*boudin* com granito nas zonas de dilatação interconectados com leucossomas estirados na foliação (*Sierras de Cordoba, Argentina*)

BOUDINS

BOUDINAGE E ELIPSE DE STRAIN

Os *boudins*, normalmente são observados em planos perpendiculares ao eixo-Y do elipsóide finito de *strain* (seção X-Z). Dependendo do campos da deformação, podem também ocorrer na direção Y-Z, ou associarem-se a dobras nesta direção.

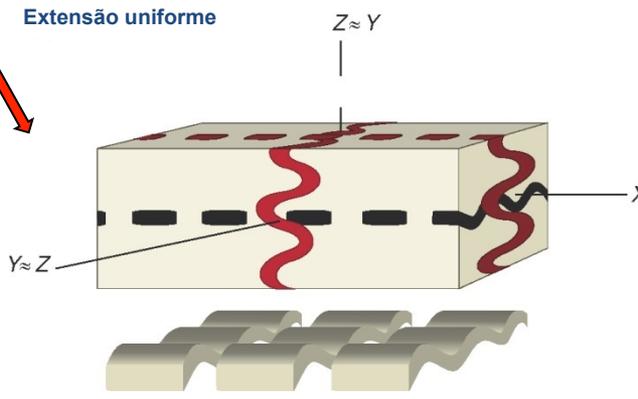
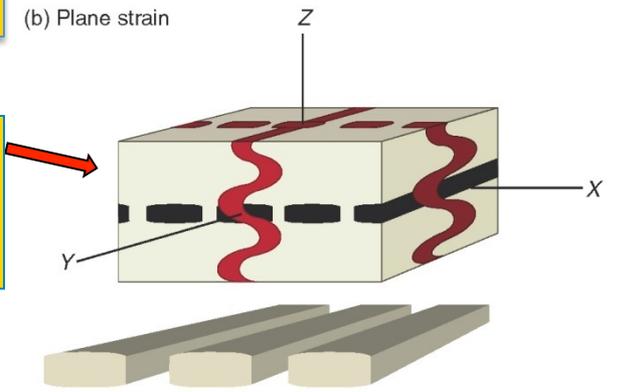
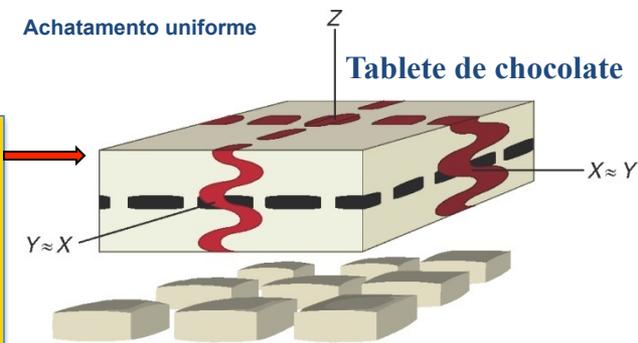


Classificação da forma das elipses de *strain*

Campo 1
Dobra de camadas paralelas 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.

Campo 3

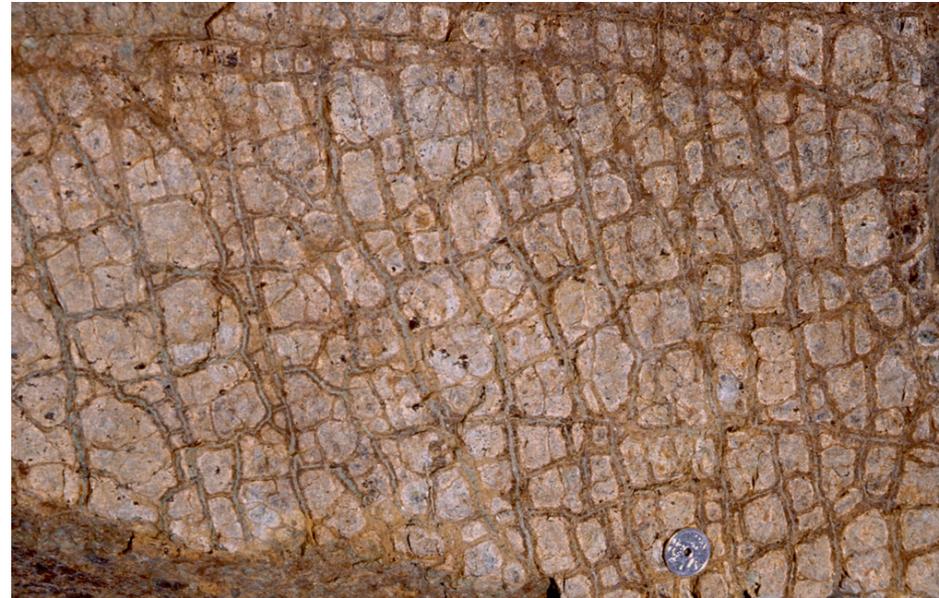


BOUDINS

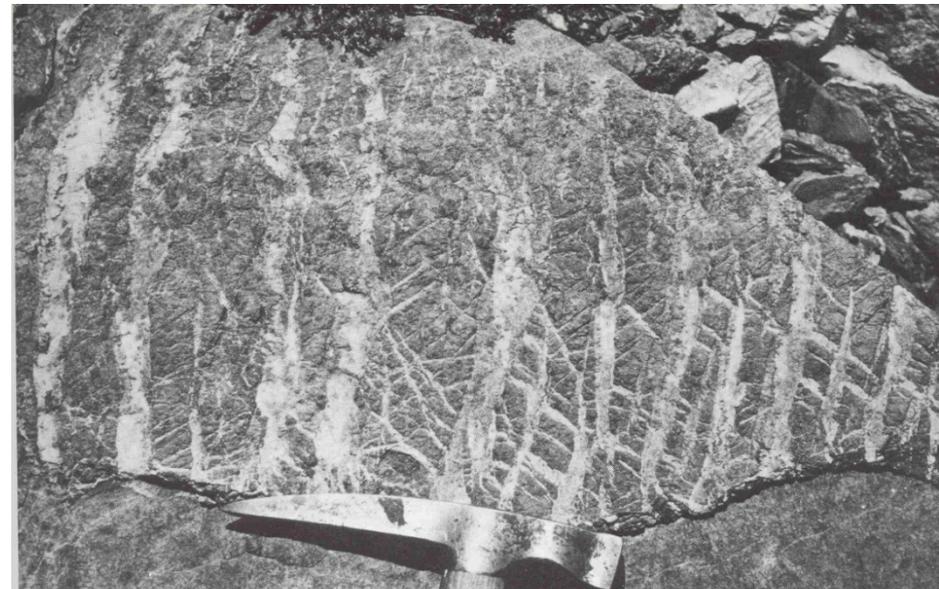
BOUDINAGE E ELIPSE DE STRAIN



Combinação de *boudin* e dobra – XZ



Boudins tipo tablete de chocolate – campo 1 de elipses de deformação – duas direções semi-ortogonais de extensão.



BOUDINS

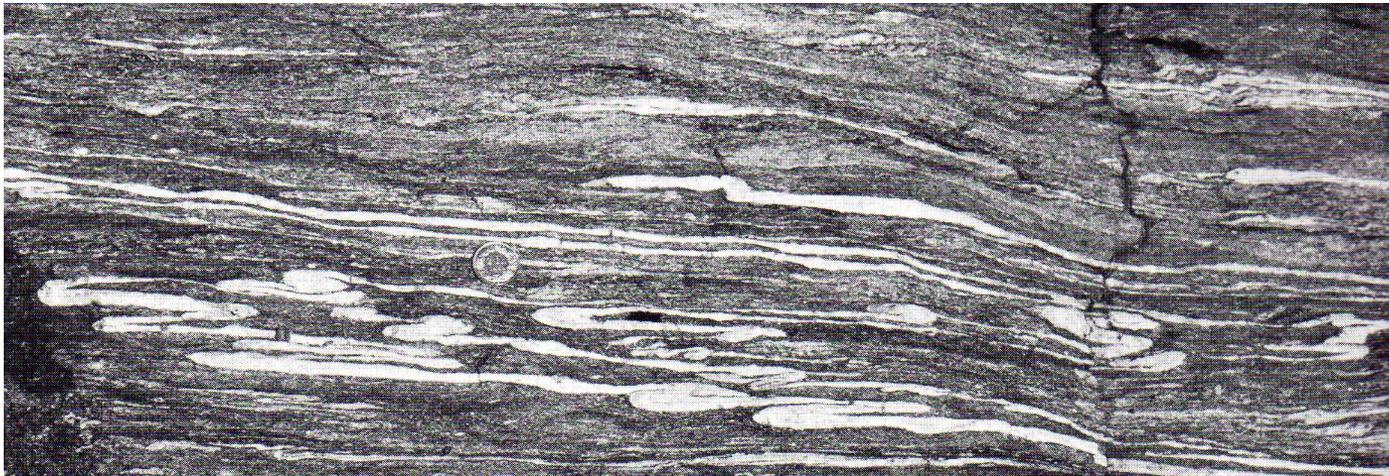
BOUDINS E DEFORMAÇÃO PROGRESSIVA

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**



BOUDINS

BOUDINS E SUPERPOSIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Boudins dobrados

Boudins dobrados e comprimidos – menor razão largura/espessura



Dobramento do *neck* e das zonas surreicas dos boudins.
A compressão ao longo das camadas (*buckling*) posterior à extensão ao longo das camadas (*boudinage*) é evidenciada pelo dobramento dos veios surreicos.



camadas competentes de anfibolito em biotita gnaisse bandado, relativamente incompetente

BOUDINS

BOUDINS DE FOLIAÇÃO – deformação coaxial e não coaxial

AUSÊNCIA DE CONTRASTES DE COMPETÊNCIA

Tração e abertura das zonas de dilatação, percolação de fluidos e preenchimento. Deflexão da foliação nas paredes da fratura durante este processo e dobramento flanqueado da foliação.

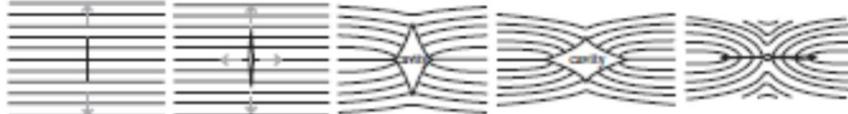
Boudins de foliação

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

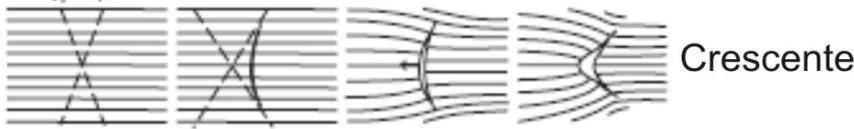
ESFORÇO PRINCIPAL ORTOGONAL A FOLIAÇÃO

Deformação progressiva **Abertura e preenchimento**

Boudins simétricos Losangular Boca de peixe

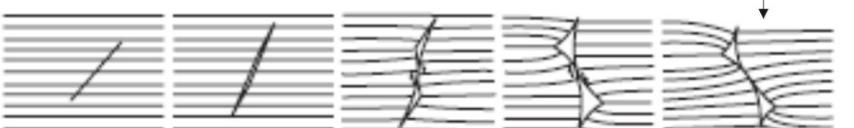
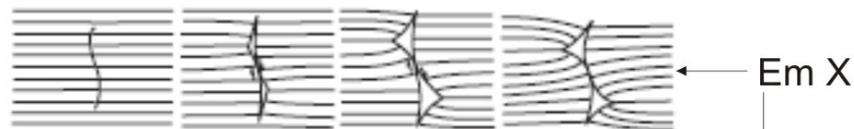
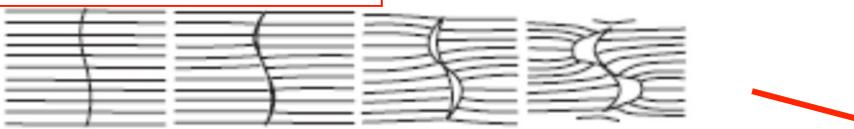


Boudins assimétricos



Boudins escalonados

Duplo crescente



ESFORÇO PRINCIPAL OBLÍQUO A FOLIAÇÃO

Losangular assimétrico

Boca de peixe assimétrico



Abertura, preenchimento e rotação



Dobras flanqueadas assimétricas

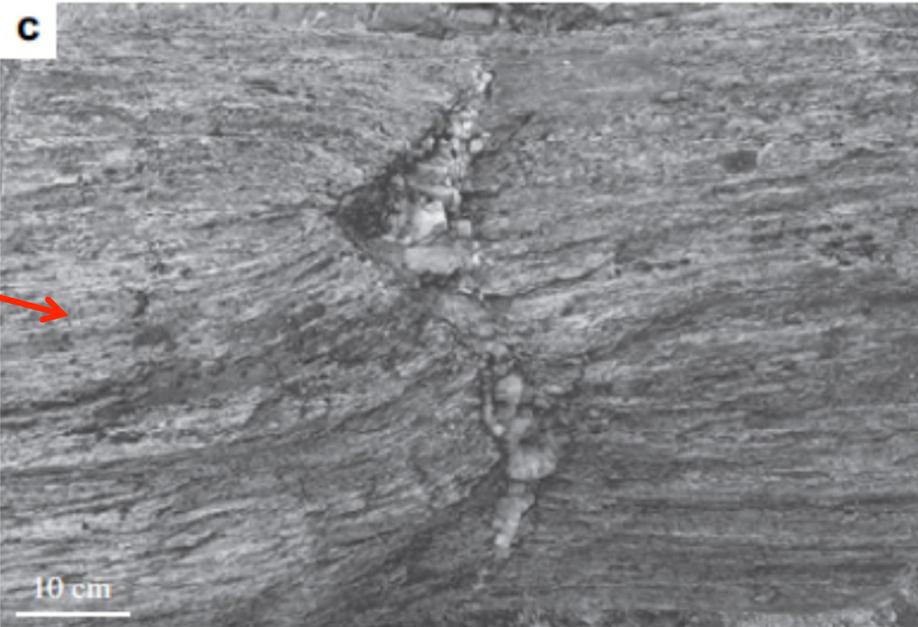


Formas triangulares

Deflexão da foliação e sentido de movimento

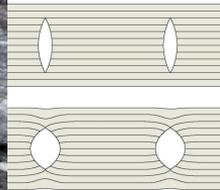


Triangular simétrico



BOUDINS

BOUDINS DE FOLIAÇÃO



Boudins de foliação simétricos – deformação coaxial

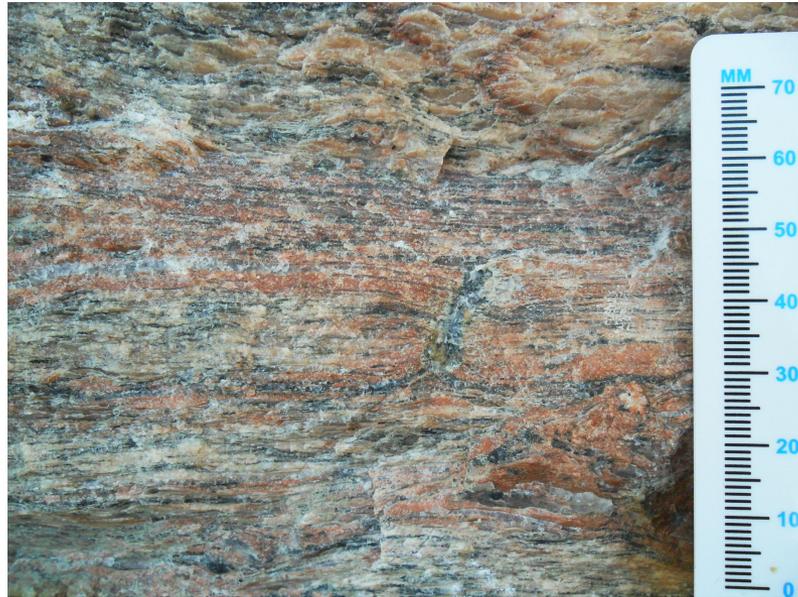


***Boudins* de foliação assimétricos – deformação não-coaxial**
Abertura e rotação anti-horária da fenda preenchida

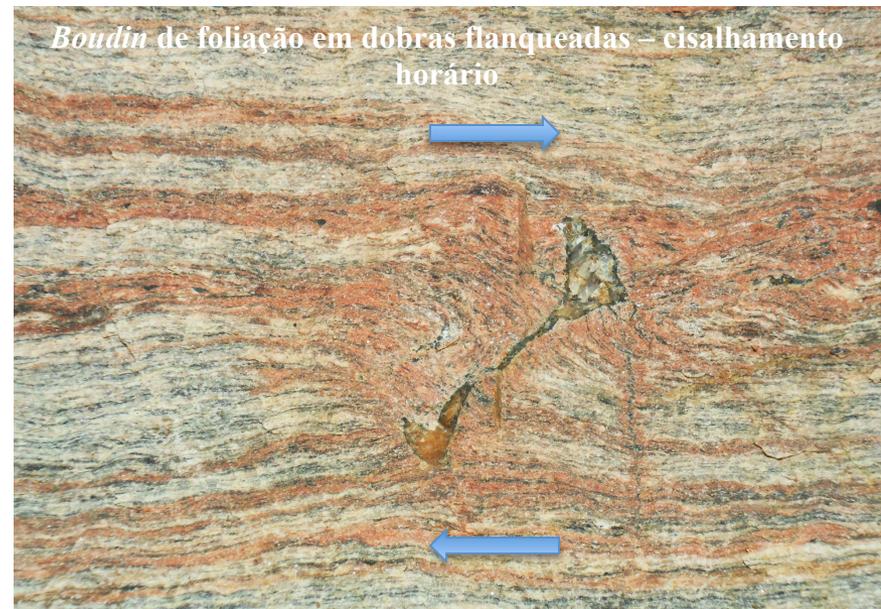
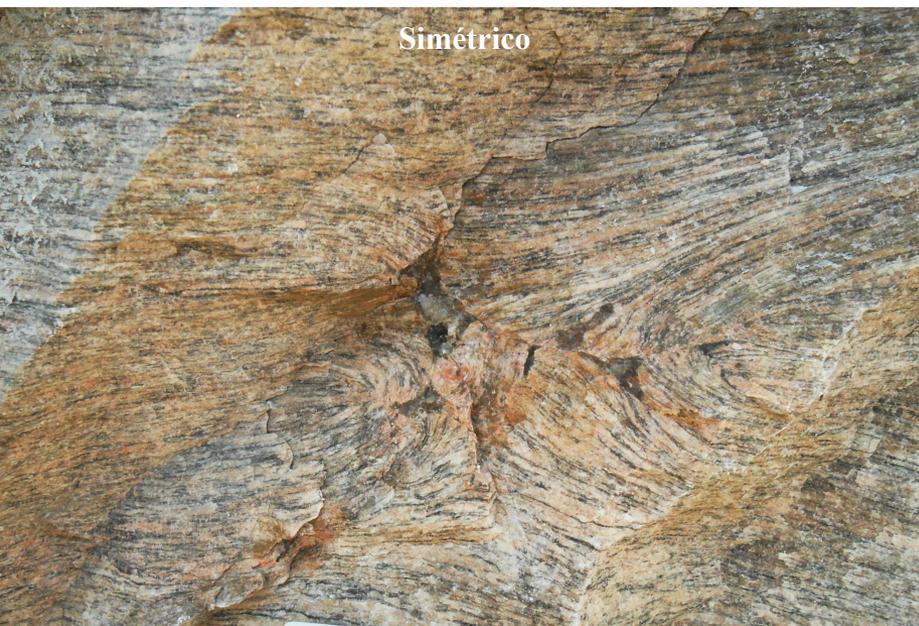


BOUDINS

BOUDINS DE FOLIAÇÃO



Granito blastomilonítico da Zona de Cisalhamento de Além-Paraíba – Santo Antônio de Pádua (RJ)



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

ESTRUTURAS LINEARES TECTÔNICAS

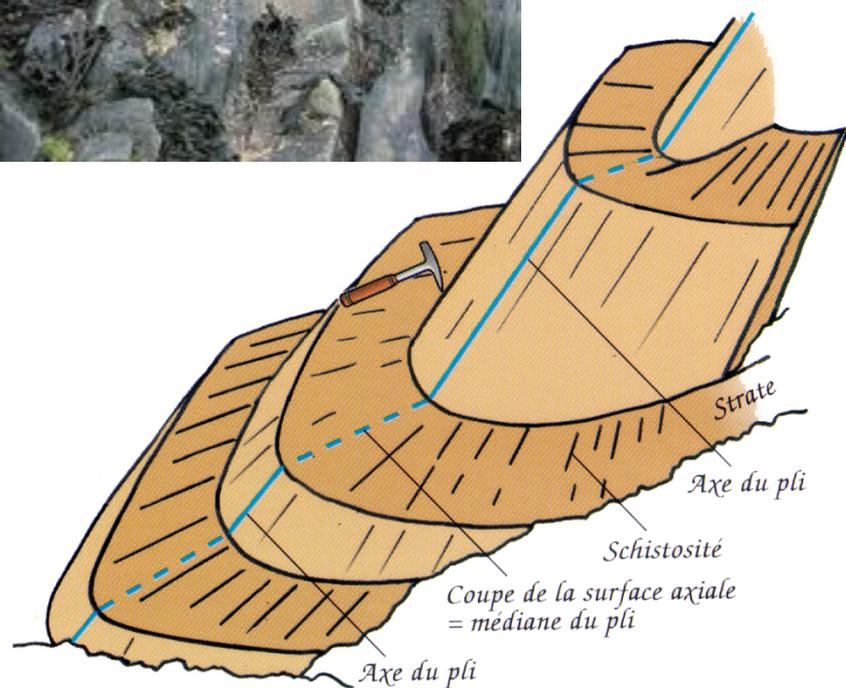
1- **lineações penetrativas** ou **relacionadas ao eixo de alongação principal do elipsóide de deformação** - fábrica-L

(estiramento e recristalização orientada de minerais, agregados minerais, seixos, ...)

2- **lineações geométricas** - eixos de dobra ou as linhas de intersecção entre dois conjuntos de estruturas planares, linhas de charneira, lineações de crenulação).

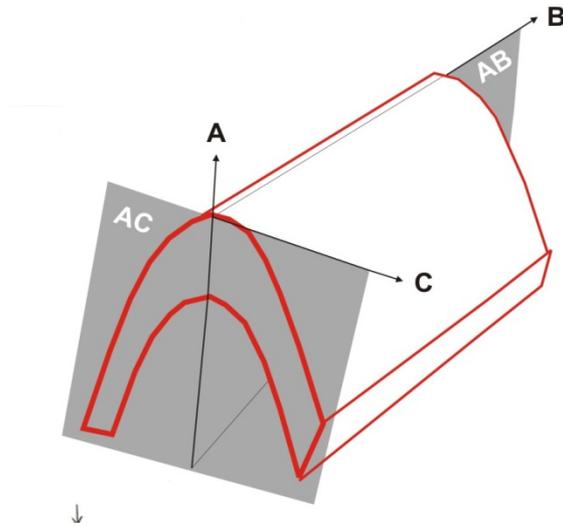


ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

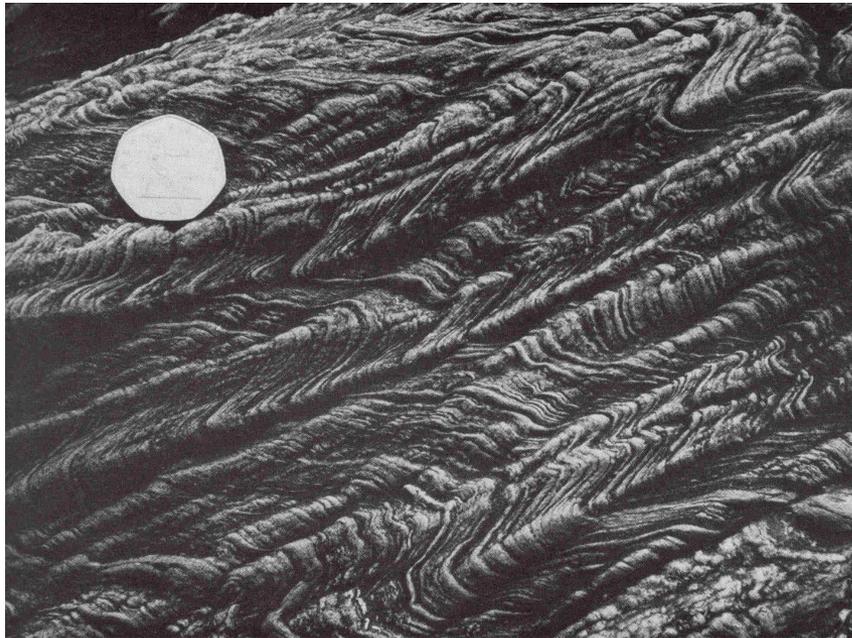


Linha de charneira do dobramento cilíndrico corresponde ao eixo-B geométrico

ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

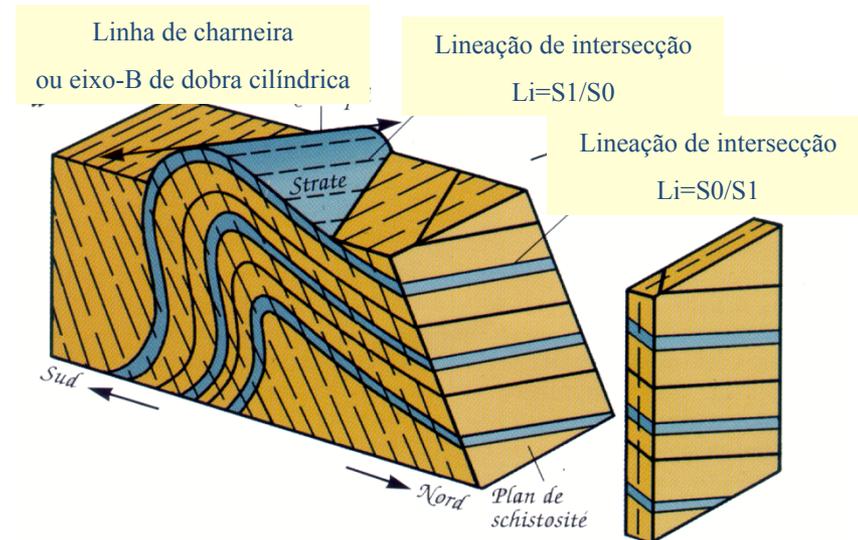


Lineação de crenulação (Lcr) zonal



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

Lineações de intersecção ($L_i =$ eixo-B de dobras cilíndricas)

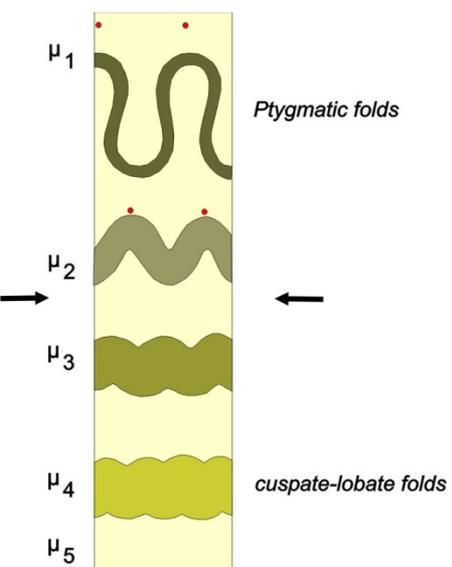


Intersecção entre S_1 e uma superfície qualquer produz uma lineação qualquer.

As lineações produzidas pela intersecção entre os elementos estruturais relacionados a geometria cilíndrica de um dobramento serão paralelas a geratriz deste dobramento cilíndrico – eixo.



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO



ESTRUTURAS EM *MULLION*

Baixo contraste de competência e
dobras concêntricas.

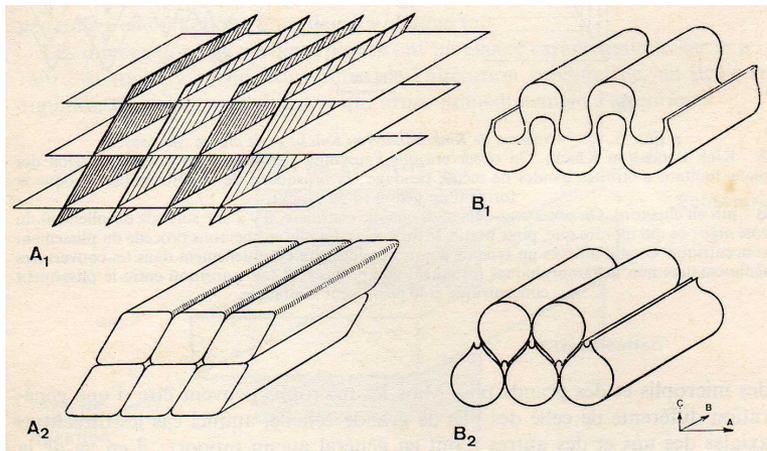
Estruturas colunares e cilíndricas,
paralelas ao eixo-B do
dobramento



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

Lineações de intersecção (L_i = eixo-B de dobras cilíndricas)

COLUNAS OU *MULLIONS* DE INTERSECÇÃO E DOBRAMENTO

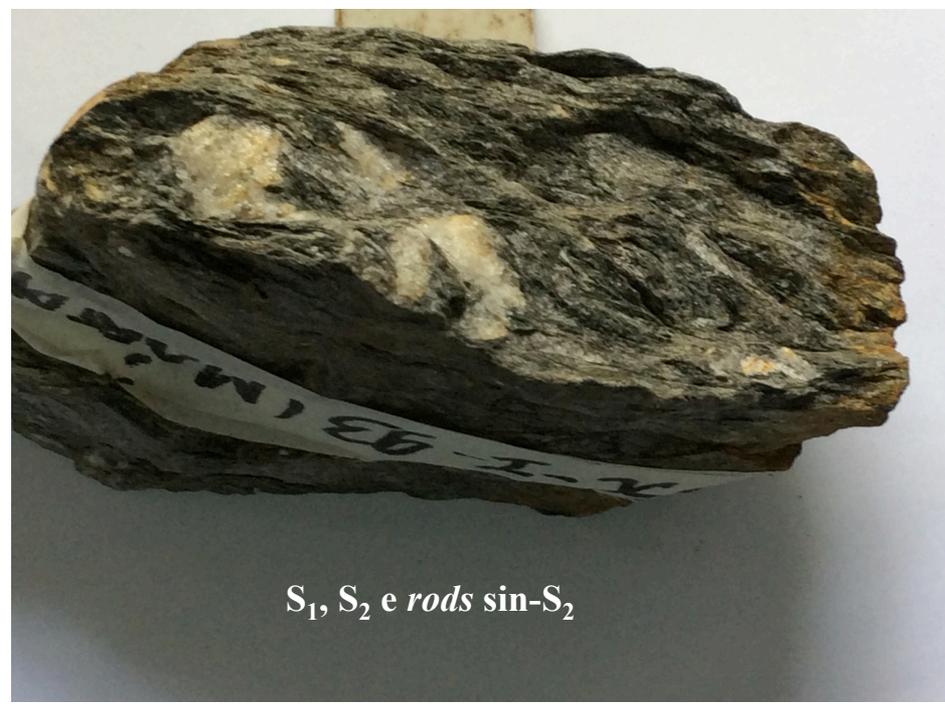
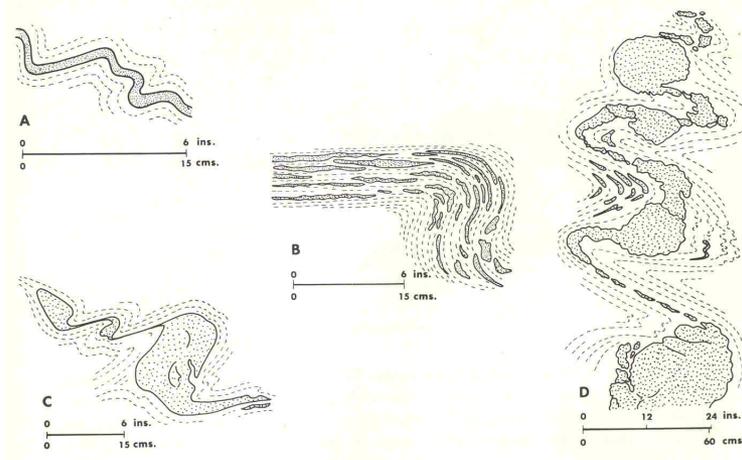


ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

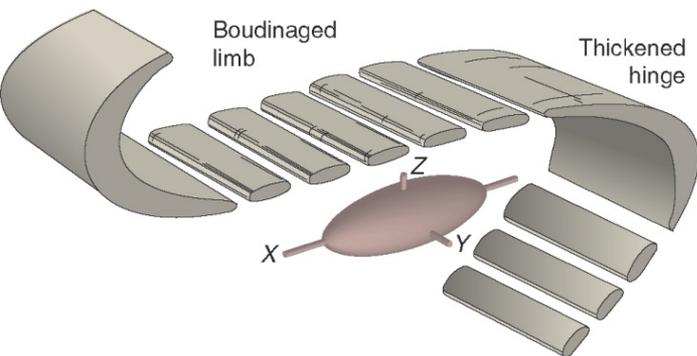
RODDING OU RODS

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.



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

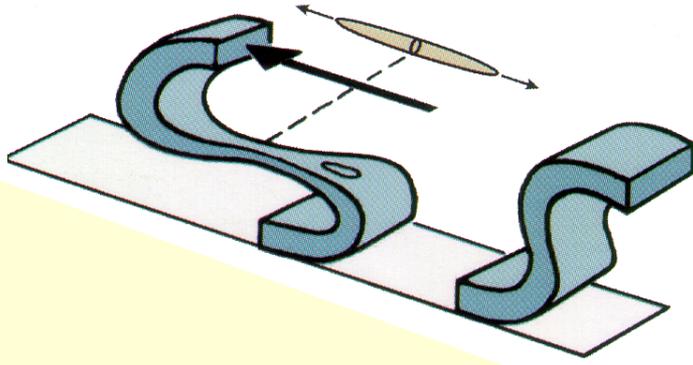


Boudins desenvolvidos durante o dobramento com extensão paralela ao plano axial (ao longo do eixo-a) e perpendicular ao eixo-B. Neste caso a linha de *boudin* ou *neck* de boudin (eixo-Y) é paralelo eixo-B da dobra



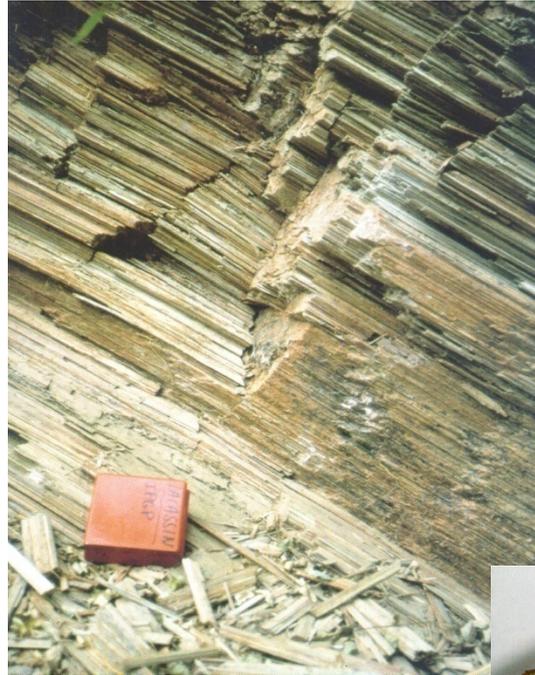
ESTRUTURAS LINEARES SENSÍVEIS A FORMA DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO

LINEAÇÕES DE ESTIRAMENTO – EIXO-X DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO



Dobra passiva com estiramento, por deformação não-coaxial, paralela ao eixo-a cinemático = eixo-X do elipsóide de deformação

Lápis de rocha – tectonito-L (por estiramento)



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



Os lâpis de rocha, quando produzidos pela intersecção entre clivagens, relacionam-se a linha de charneira das dobras da ultima fase.

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 DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO SOBRE SUPERFÍCIES DOBRADAS ANTERIORMENTE E PADRÃO DE DISPERSÃO DAS LINEAÇÕES-B DE INTERSECÇÃO

CRITÉRIOS

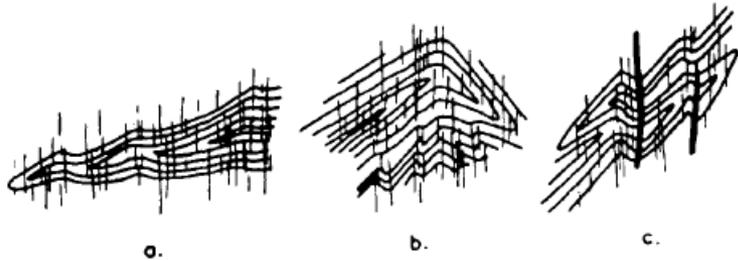
1-xistosidade corta a dobra

2-plano axial dobrado

3-dispersão de lineações da ultima fase

4-figuras de interferência

Relação entre a xistosidade e a dobra anterior



Os tipos básicos da dispersão de lineação de intersecção ($L_i = L_2$) entre a xistosidade (S_2) e uma superfície dobradas anteriormente.

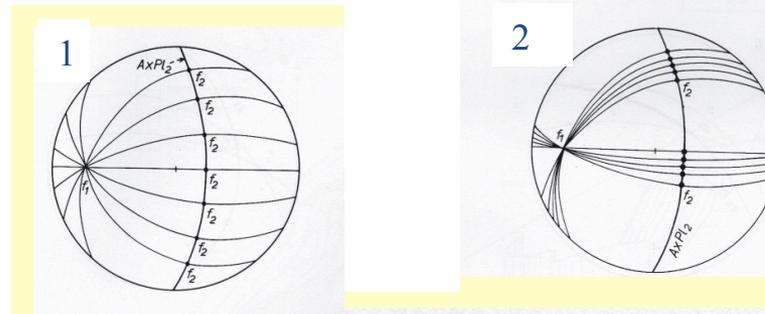
$L_i = L_2$ dispersa mas contida na foliação- S_2 . Define, no estereograma, um grande-círculo que representa a foliação- S_2 .

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

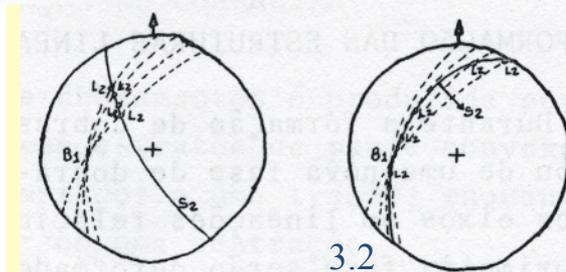
Xistosidade corta a dobra

As lineações de intersecção entre a xistosidade-2 e as superfícies-1, previamente dobradas, são dispersas mas contidas o plano da xistosidade posterior

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 prévias 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



3.1

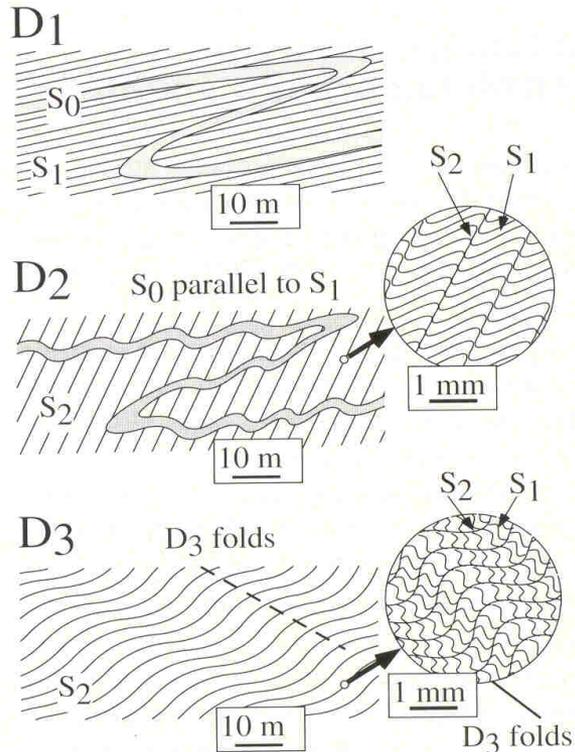
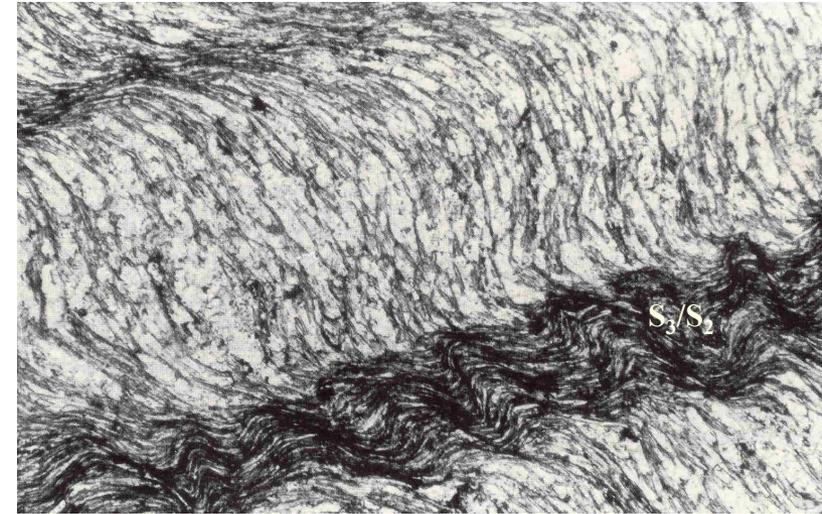
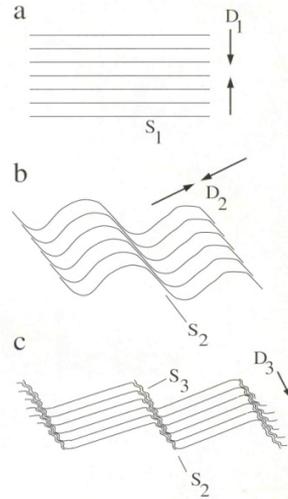
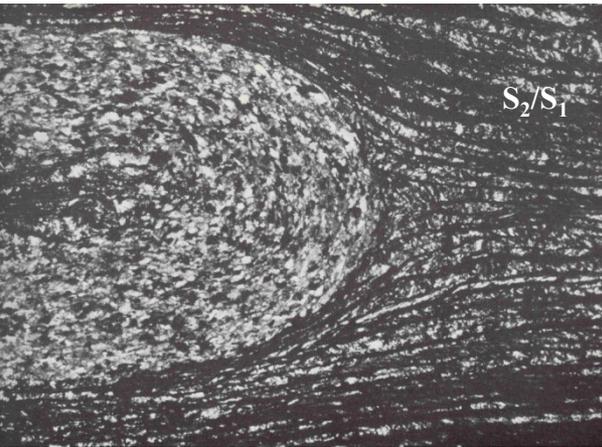


3.2

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

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE XISTOSIDADES



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE LINEAÇÕES E LINEAÇÕES DOBRADAS



Lineação L_2 ($S_0=S_1$), na superfície S_2 , dobrada e cortada pela lineação de intersecção,
 $L_1=L_3=S_3/S_2$

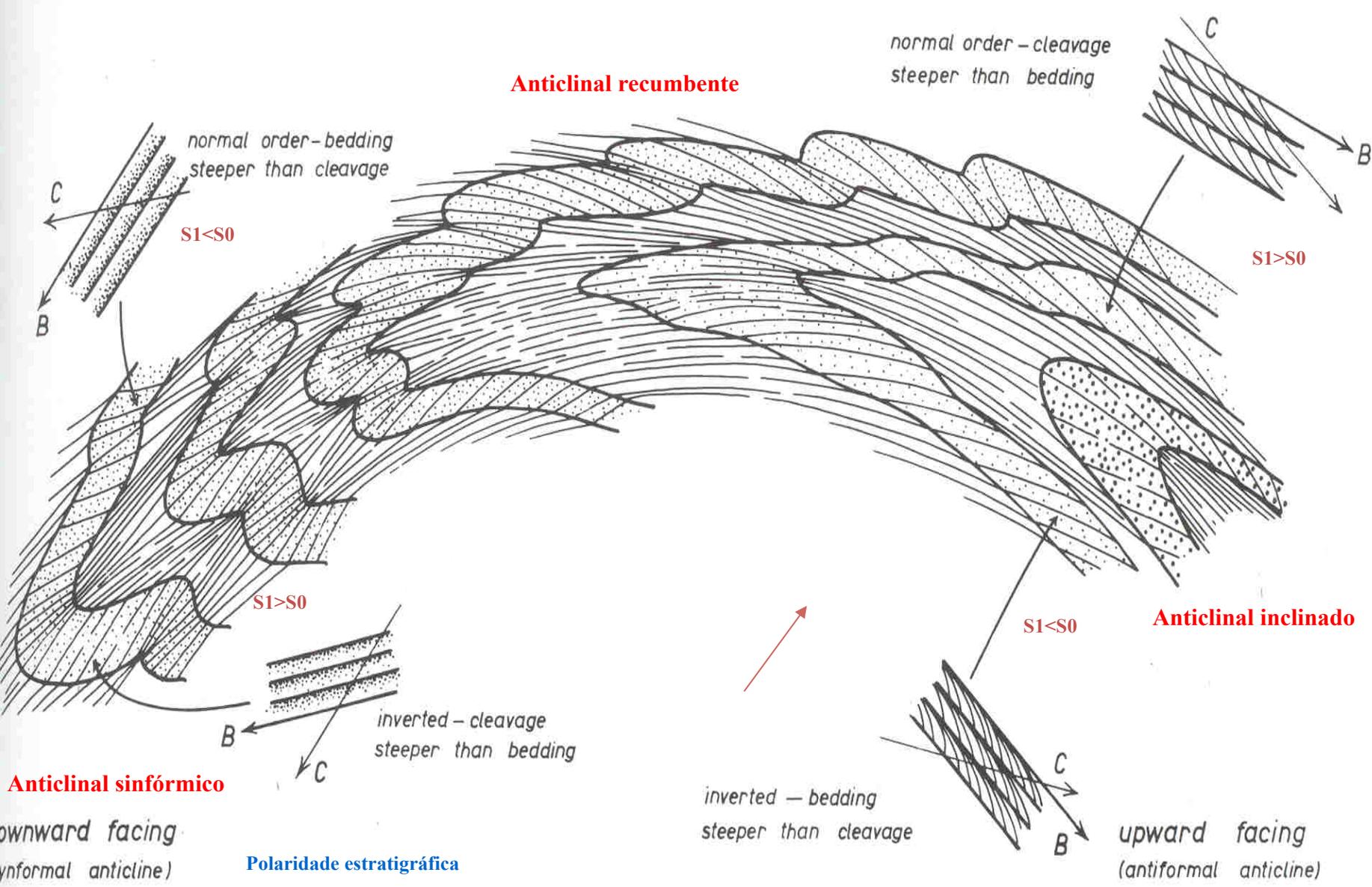


Foliação S_1 com pequenas dobras lobadas D_2 . As lâminas micáceas de charneiras sinformais indicam a L_2 e encontram-se crenuladas em uma direção ortogonal L_3

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 lineação L_2 (charneiras de pequenas dobras com λ subcentimétricos a milimétricos)

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

DOBRAMENTO DO PLANO AXIAL

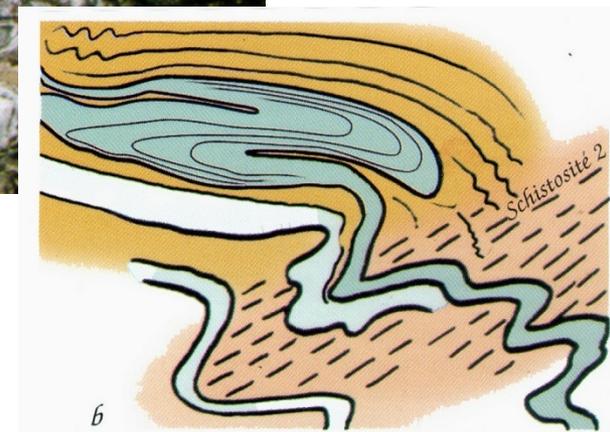
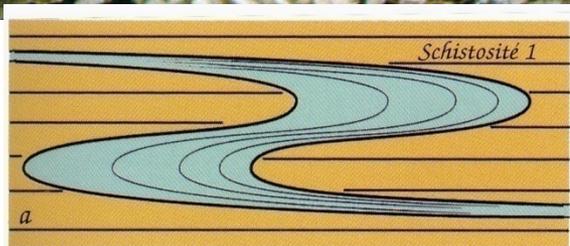


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS

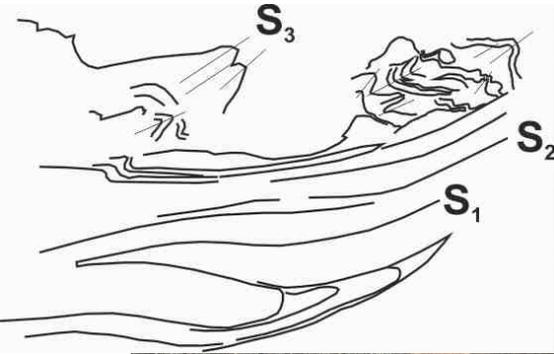


Dobramento passivo, isoclinal, D_1 e redobramento anisopaco (sub-classe 1C) D_2



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS

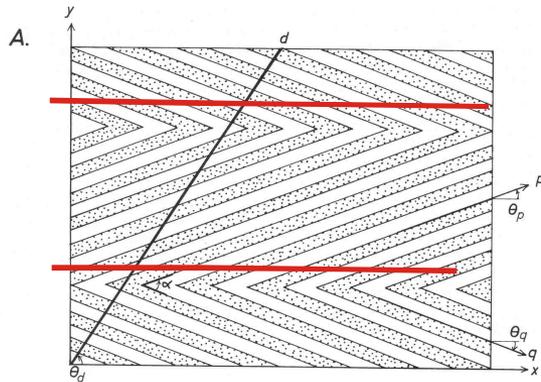


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

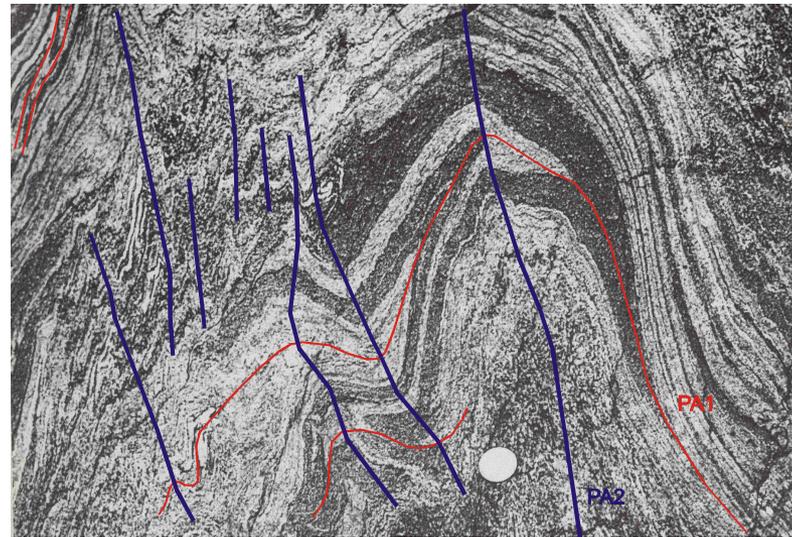
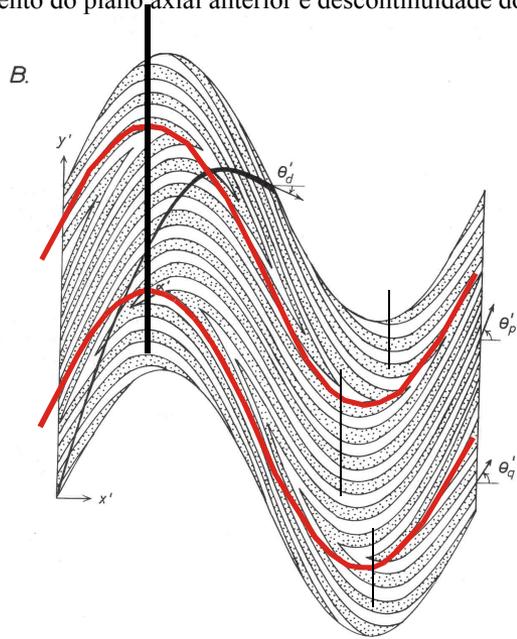
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS

DOBRAMENTO E DESCONTINUIDADE DOS PLANOS AXIAIS

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



Dobramento do plano axial anterior e descontinuidade do plano axial posterior

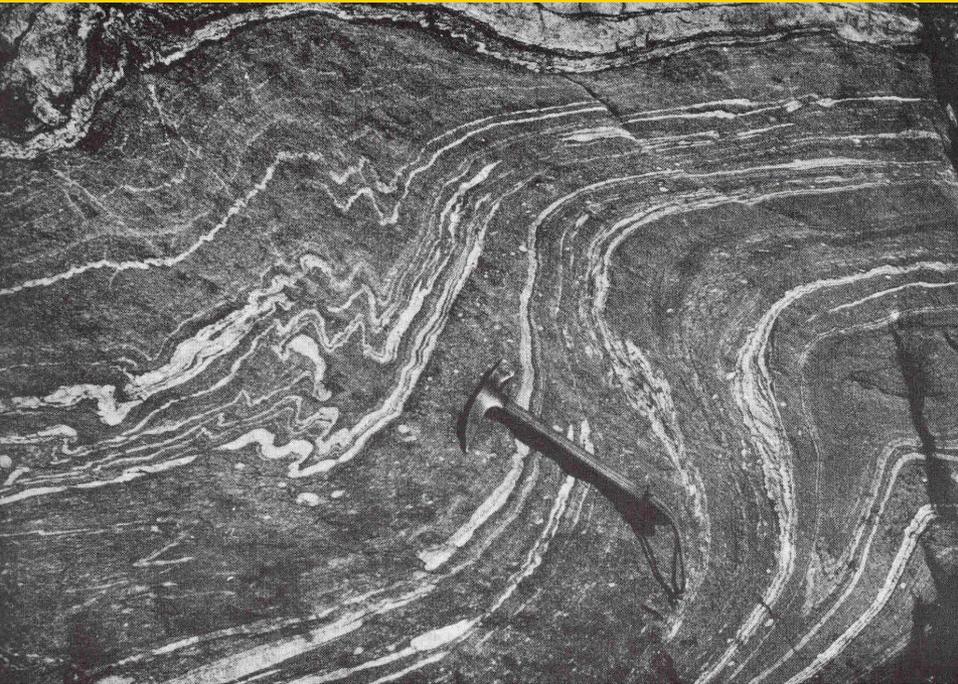


A disposição curviplanar (dobrada) de um plano axial (ou de elementos estruturais a ele relacionados – foliações) é um princípio básico de hierarquia entre as fases superpostas.

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

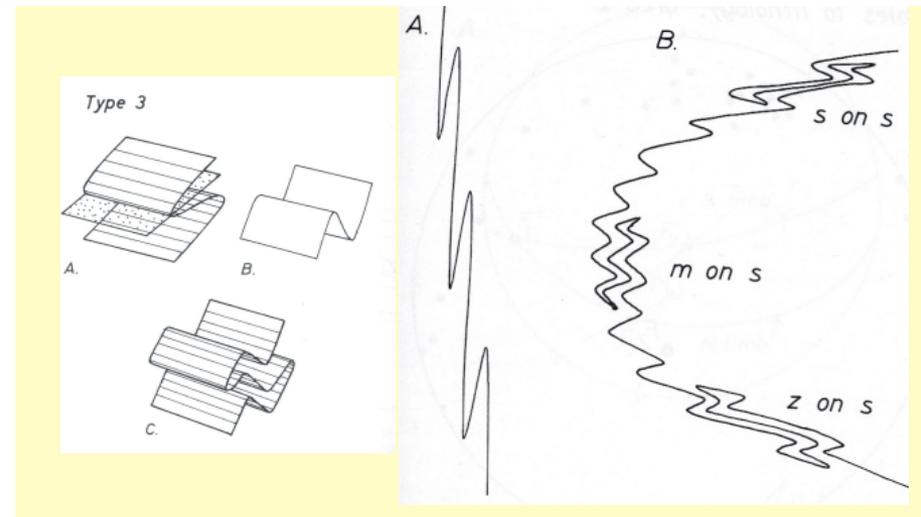
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

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



A forma da figura de interferência depende das relações angulares : 1- entre os eixos das fases superpostas (B1 e B2), 2- entre a orientação e mergulhos dos planos axiais.

FIGURA DE INTERFERÊNCIA TIPO-3 (EM LAÇO)



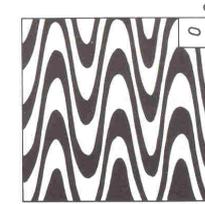
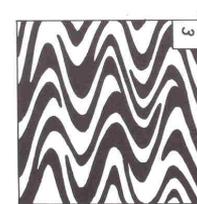
Eixos das dobras superpostas são paralelos (dobras homoaxiais) e os planos axiais possuem mergulhos quase-ortogonais.

ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a_2 , NO PA2

90°

Entre 0° e 90°

0°



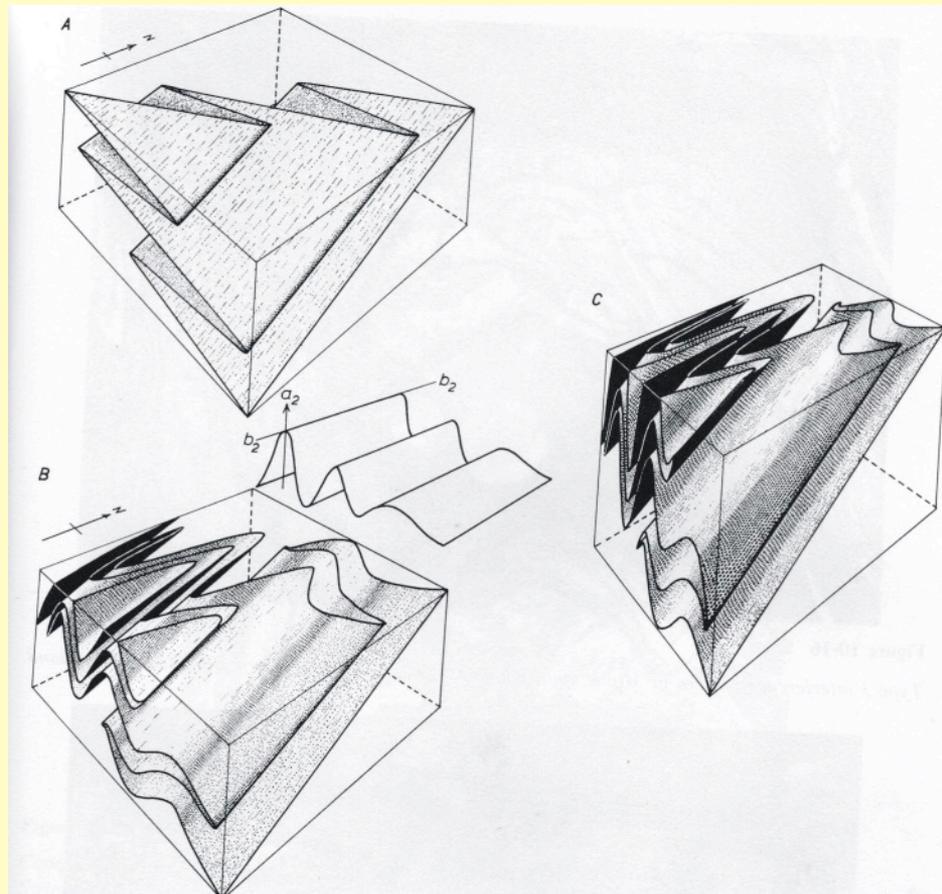
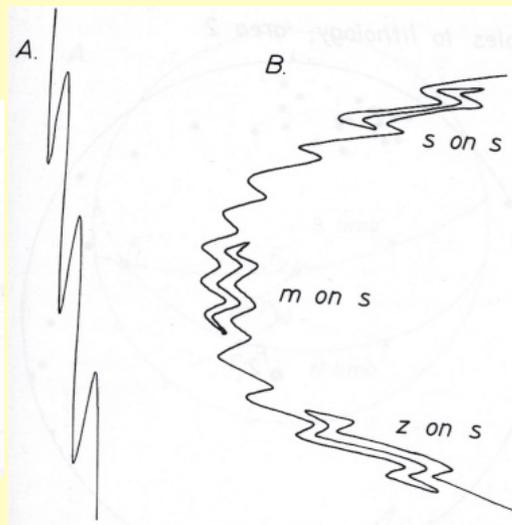
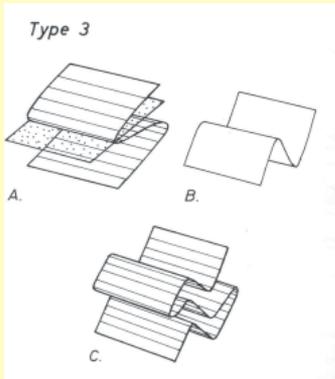
ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

0°

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

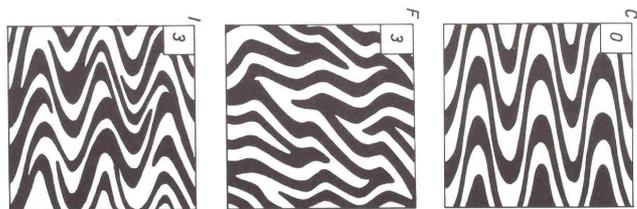
FIGURA DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-3 (EM LAÇO)



Eixos das dobras superpostas são paralelos (dobras homoaxiais), mas 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°



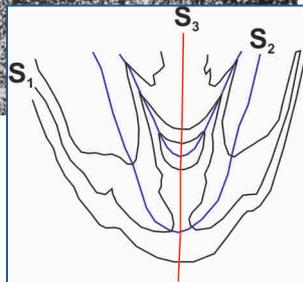
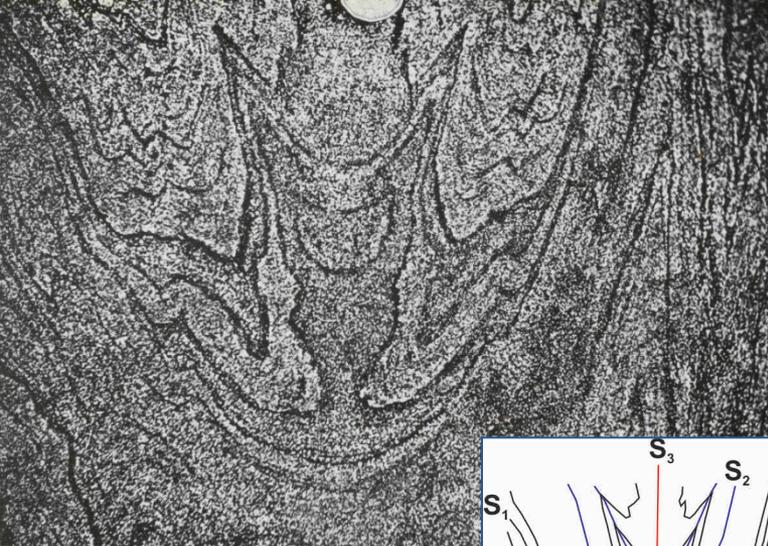
ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

0°

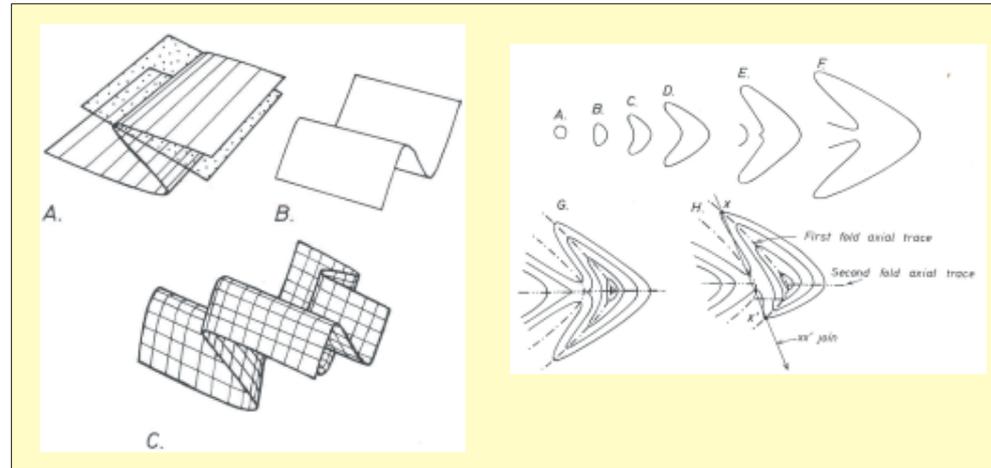
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)

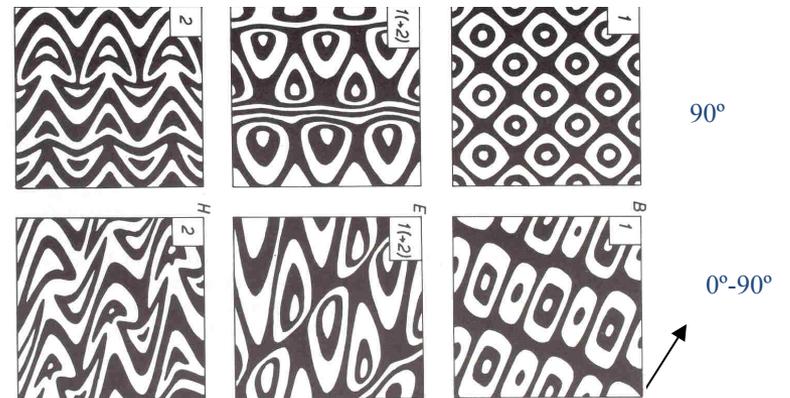


Grande obliquidade entre os eixos e os plano axiais das dobras superpostas.



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

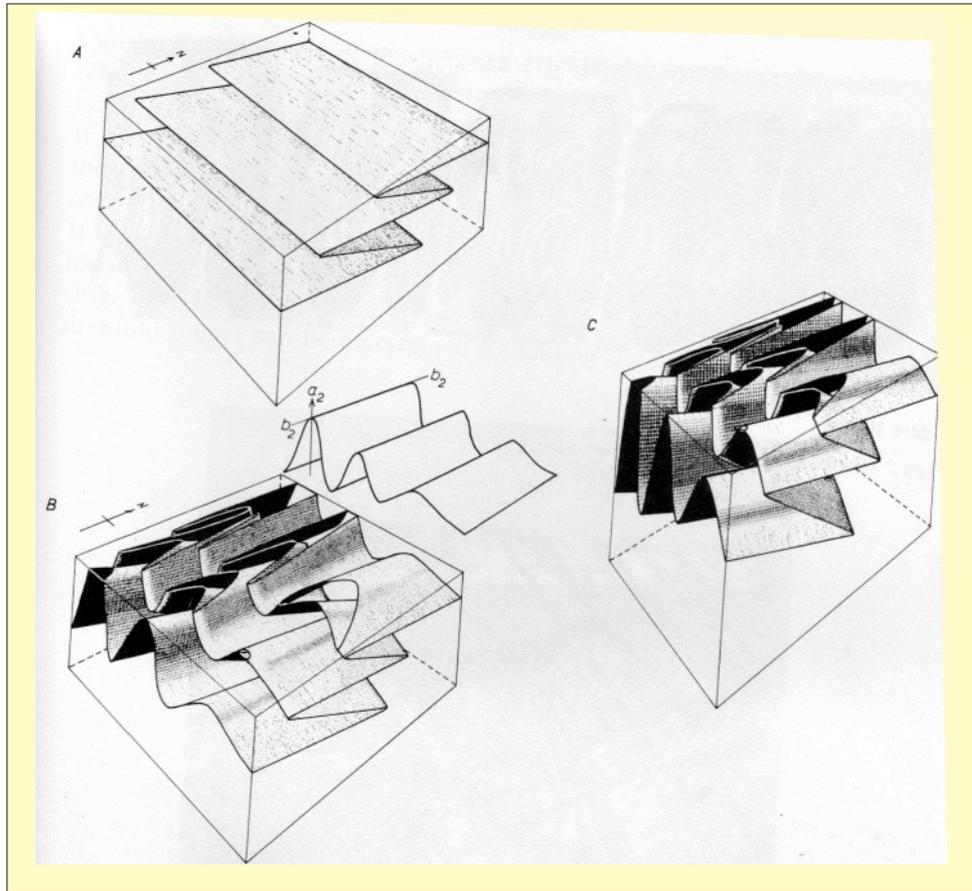
90° Entre 0° e 90° 0°



ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - Figuras de Interferência

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)

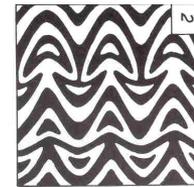


ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a₂, NO PA2

90°

Entre 0° e 90°

0°



90°



0°-90°

ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

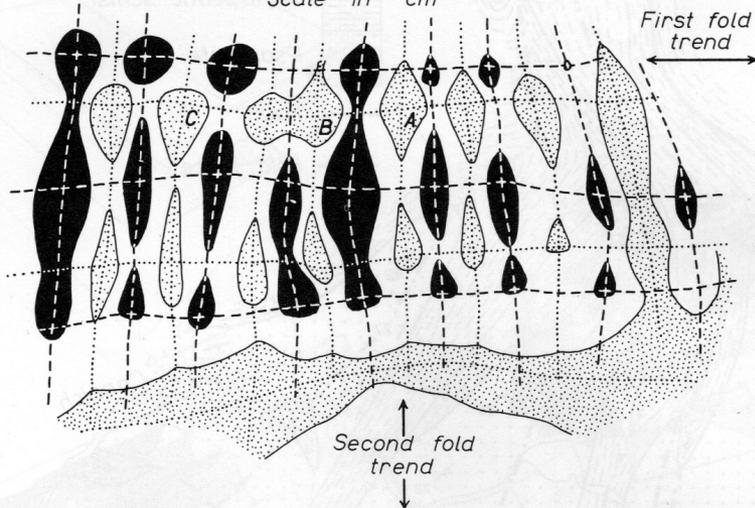
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS - FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

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

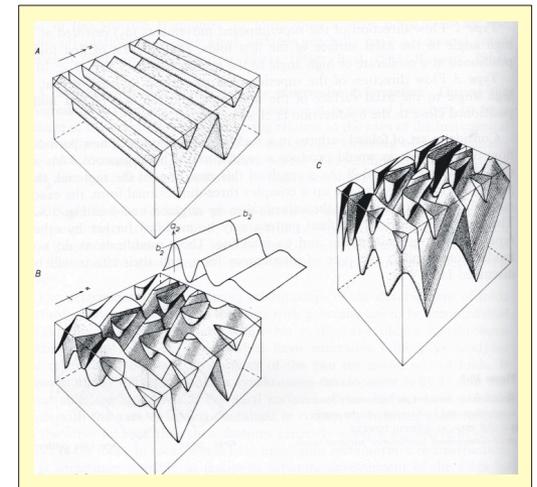
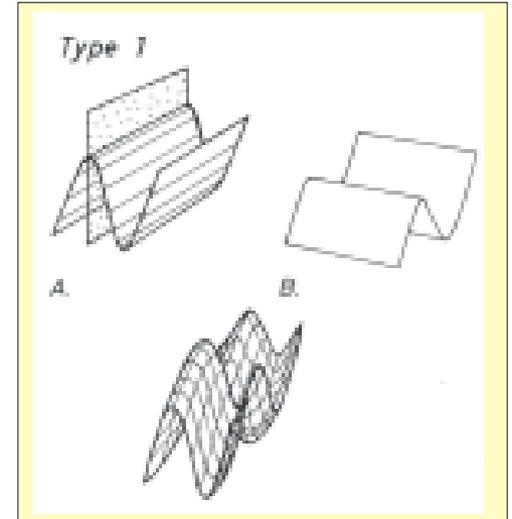
Padrão ortogonal do dobramento superposto



0 5 10 15 20
Scale in cm



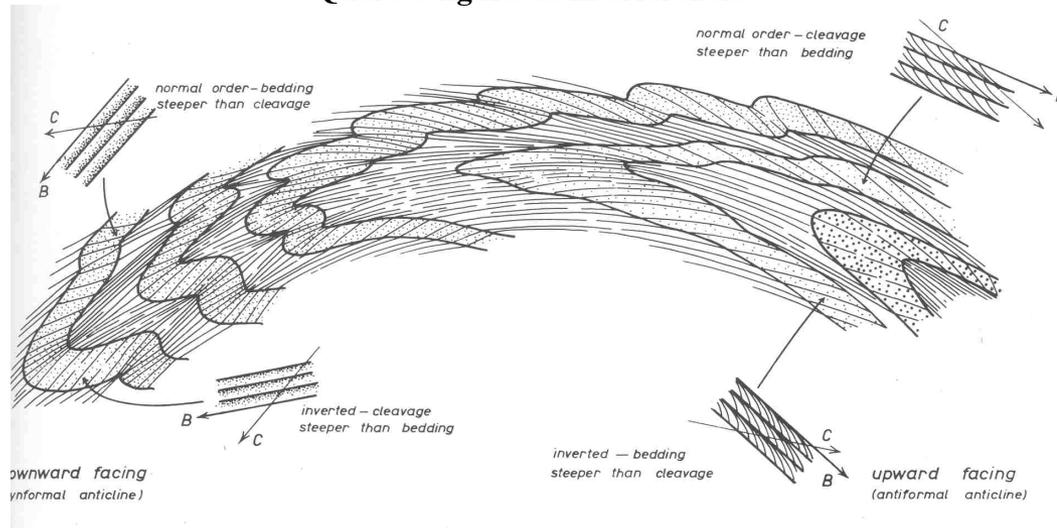
- Antiform
- Synform
- Areas of mutual antiformal culmination
- ▨ Areas of mutual synformal depression



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

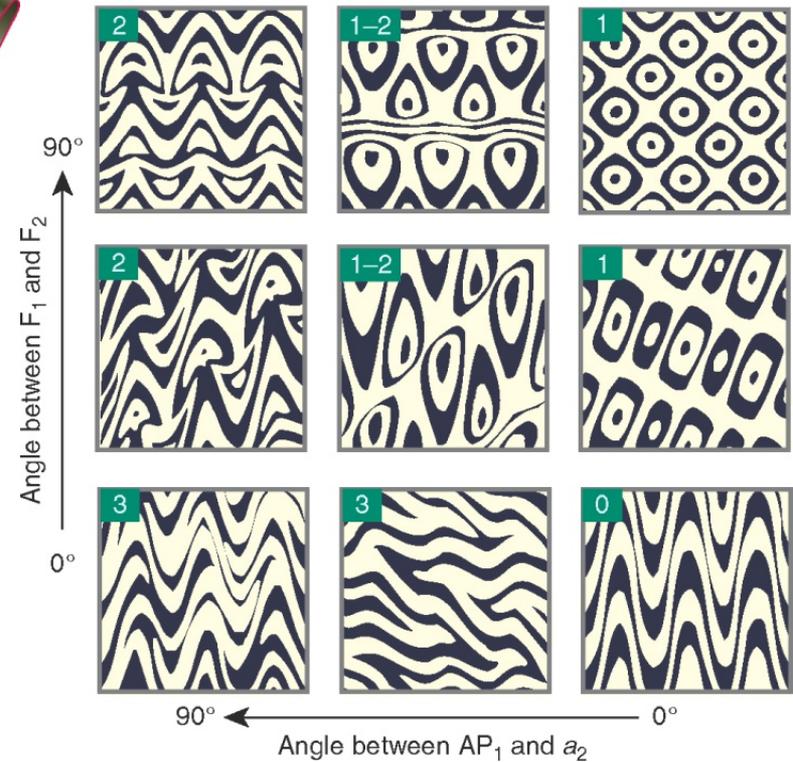
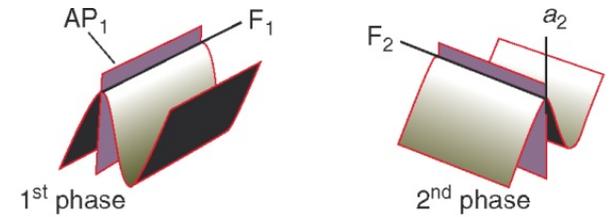
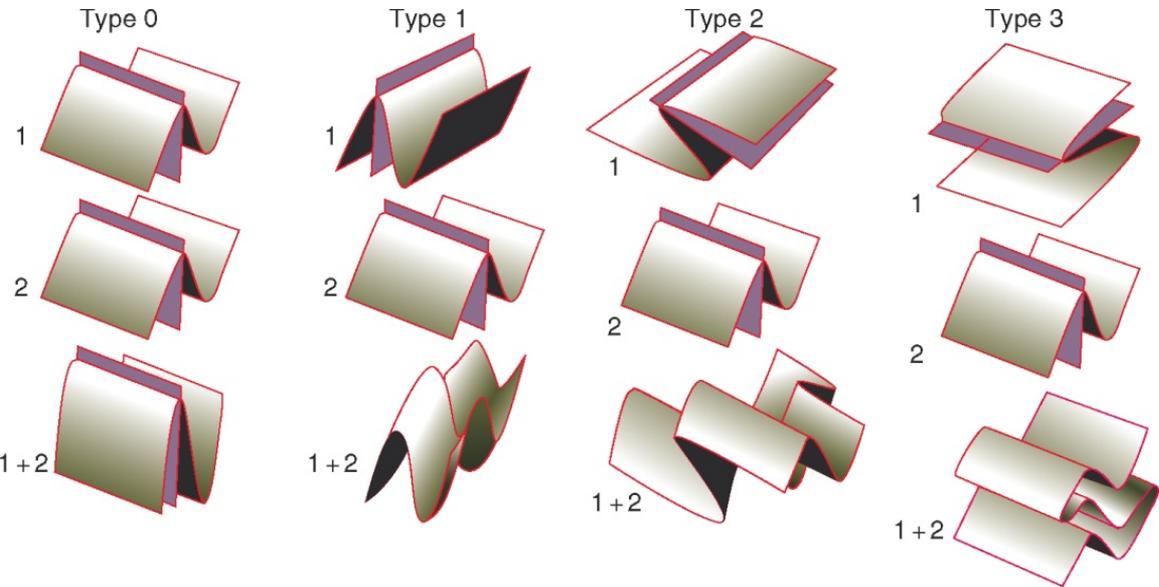
FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

Qual é a figura de interferência ?



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

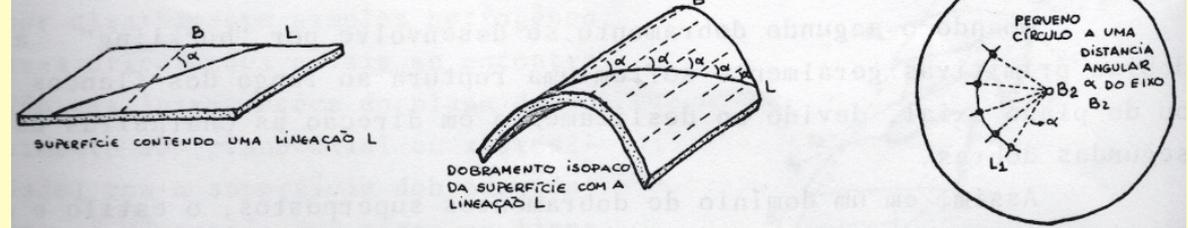
FIGURAS DE INTERFERÊNCIA



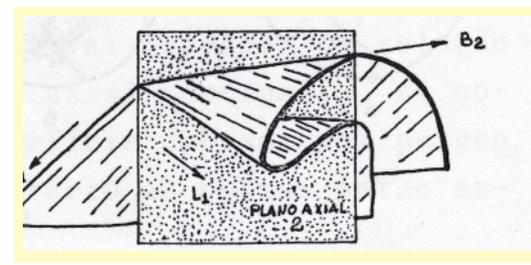
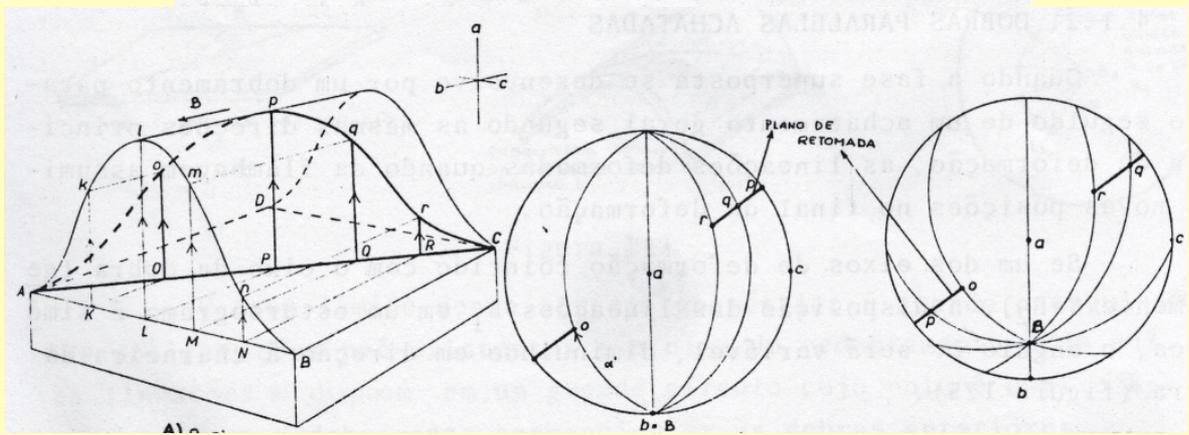
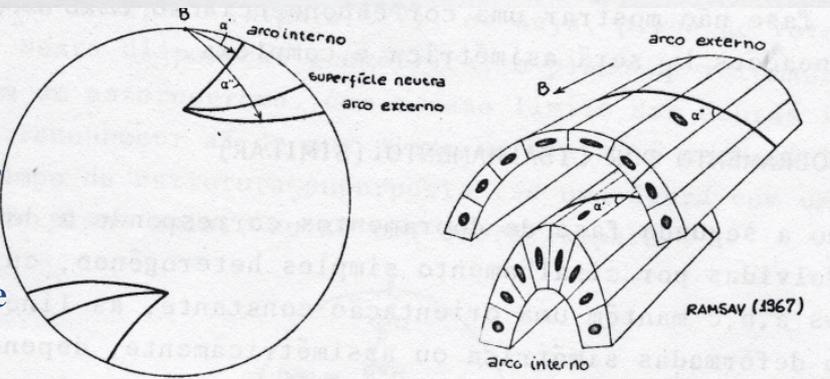
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

DEFORMAÇÃO DE LINEAÇÕES ANTERIORES

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



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



Lineação L_1 deformada por redobramento isopaco (sub-classe 1b) D_2

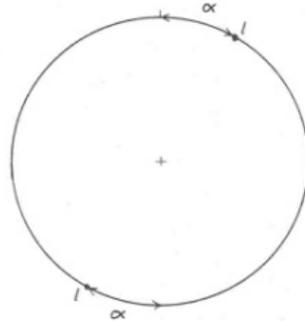
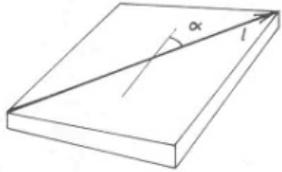
Lineação L_1 deformada por redobramento- D_2 , anisopaco e por buckling com deformação de charneira (sub-classes 1a e 1c)

Lineação L_1 deformada por redobramento similar (classe 2) por fluxo passivo ao longo do plano axial.

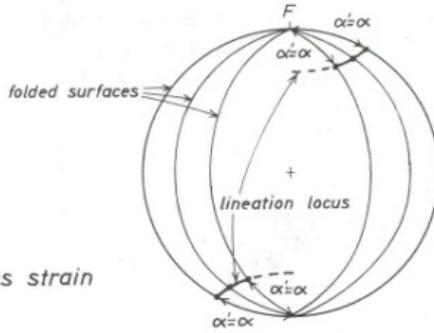
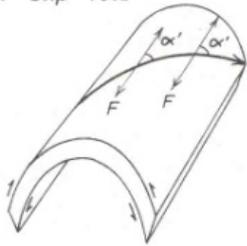
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

DEFORMAÇÃO DE LINEAÇÕES ANTERIORES

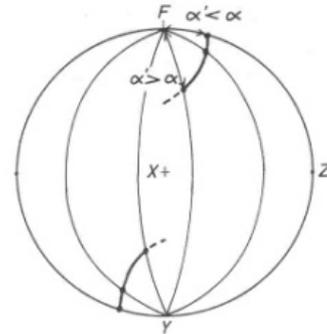
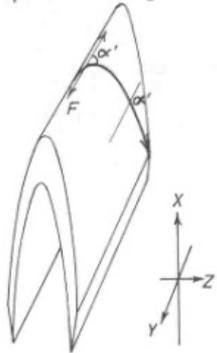
A. Undeformed original lineation



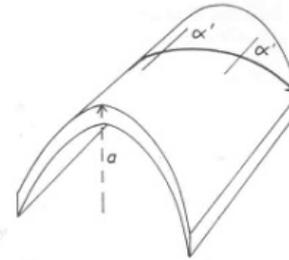
B. Flexural slip fold



C. Flexural slip plus homogeneous strain



D. Shear fold



E. Shear fold plus homogeneous strain

