

GMG 0338 GEOLOGIA ESTRUTURAL II

Regimes Dúcteis e Ambientes Tectônicos

Recapitulando

Aula - 20/08/2020

Elementos Estruturais das dobras: Charneira, Crista, Calha, Traço e Superfície Axial,

Antiformas e sinformas,; Anticlinal e sinclinal

Classificação das Dobras:

ângulo inter-flancos,

relação entre mergulho do PA e do Eixo B (Fleuty),

nas superfícies dobradas adjacentes (Isógonas de Mergulho)

Nappes e Vergência

Dobramentos Harmônico, desarmônico e poliarmônico

Aula - 28/08/2020

*Mecanismos de Dobramento: **Crosta rasa:** (contraste de competência é importante)*

dobramento ativo (buckling)

deformação de flanco (deslizamento)

deformação de charneira ou longitudinal

dobramento por flexura (bending)

***Crosta profunda** (baixo contraste de competência)*

dobramento Passivo (shear folds)

Estruturas planares associadas ao dobramento

Foliação Secundária (devido a deformação e metamorfismo)

Clivagem disjuntiva ou espaçada

Cliv. Espaçada paralela

Cliv. espaçada por domínios

Clivagem de crenulação (S anterior dobrada)

Cliv. de crenulação discreta (S dobrada descont.)

Cliv. de crenulação Zonal (S dobrada contínua)

Xistosidade: foliações metamórficas com recristalização visível a olho nu

Bandamento Diferenciado: Alternância secundária, metamórfica, de bandas granoblásticas e bandas lepidoblásticas ou nematoblásticas

**Estruturas lineares e superposição de dobramentos
(10/09/20)**



BOUDINS

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



Com a deformação no estado plástico as camadas são encurtadas e, as diferenças de competência entre os estratos, controlam o dobramento por *buckling*.

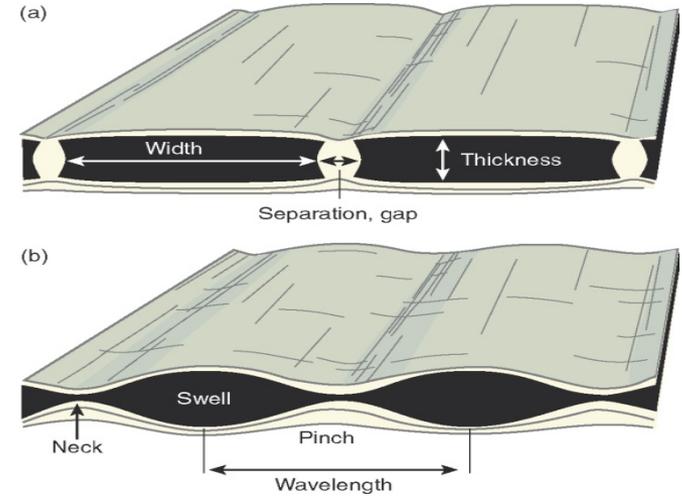
O processo de *boudinage* é o contrário do *buckling*, isto é, **EXTENSÃO PARALELA ÀS CAMADAS.**

Similarmente as camadas podem ser estiradas e divididas em pedaços individuais conhecidos como *boudins*.

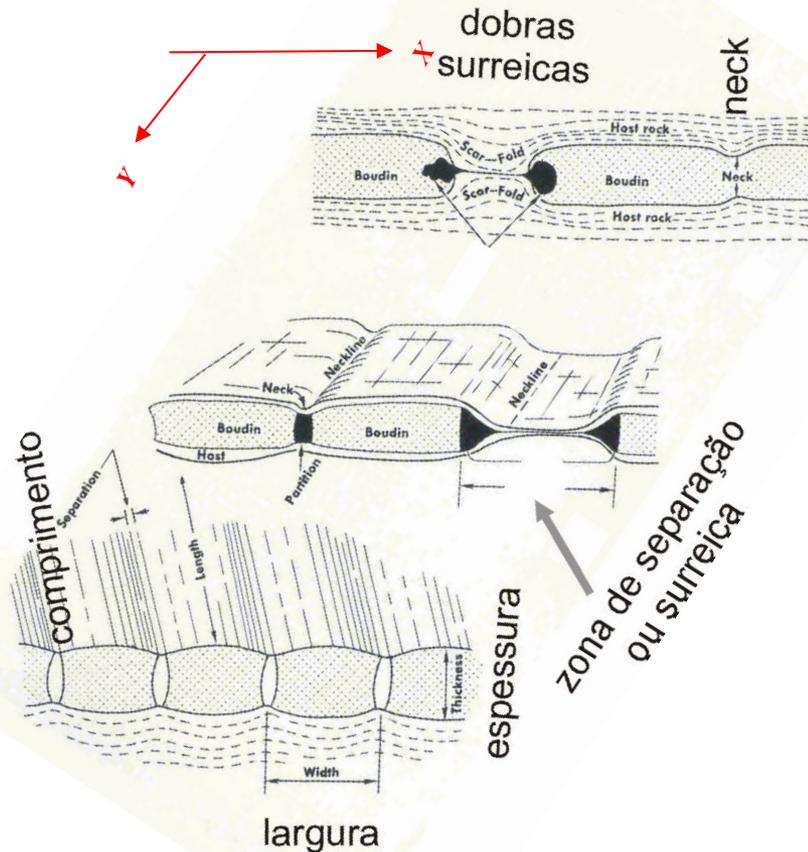
BOUDINS

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

ESTRUTURA LINEAR
CONTROLADA PELOS EIXOS DE
DEFORMAÇÃO FINITA



Neck de boudin: define uma lineação paralela ao eixo Y do elipsóide de deformação.



BOUDINS

As estruturas *pintch-and-swell* são sítios adelgaçados e regularmente espaçados de um estrato competente, onde os elementos de *boudins* encontram-se conectados, **ainda não separados**. Desenvolve-se sob condições de temperaturas mais elevadas.

A forma dos *boudins* e das estruturas *pintch-and-swell* são controladas pela temperatura, taxa de deformação (*strain*), contraste de viscosidade. *Boudins* com formas de barril ou boca de peixe são mais frequentes com o aumento da plasticidade do nível mais competente.

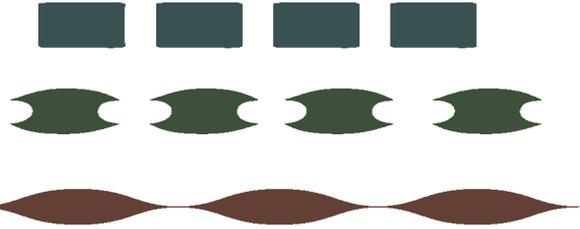
CISALHAMENTO PURO

Fraturas de extensão

rúptil



dúctil

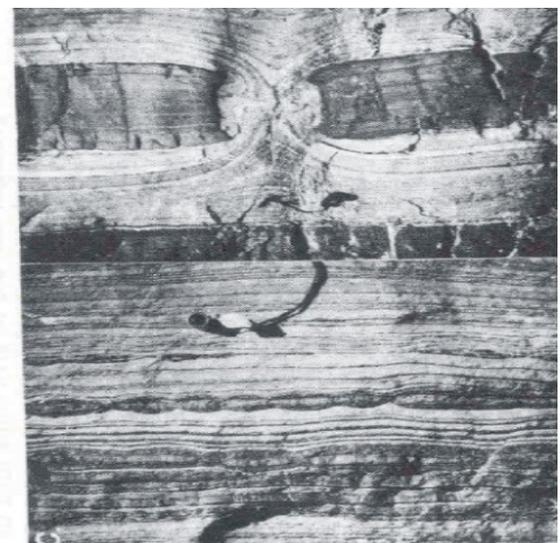
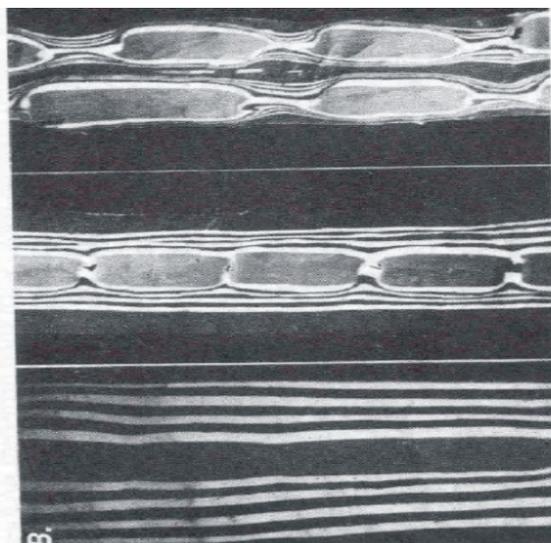
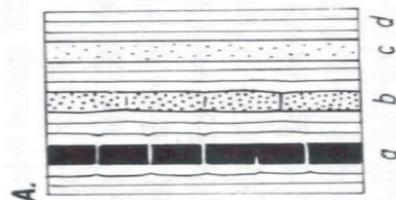
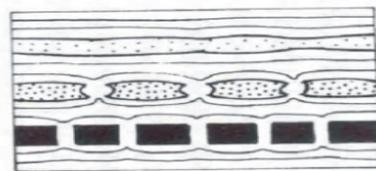
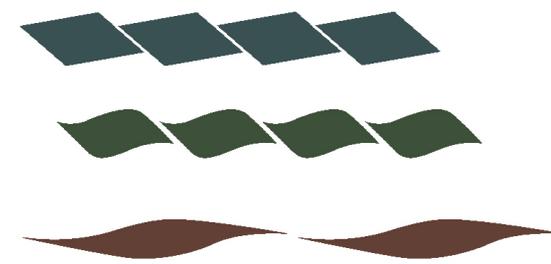


CISALHAMENTO SIMPLES

Symmetric shear fractures



Asymmetric shear fractures



Notar as diferenças de competência das camadas em *boudin*

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.

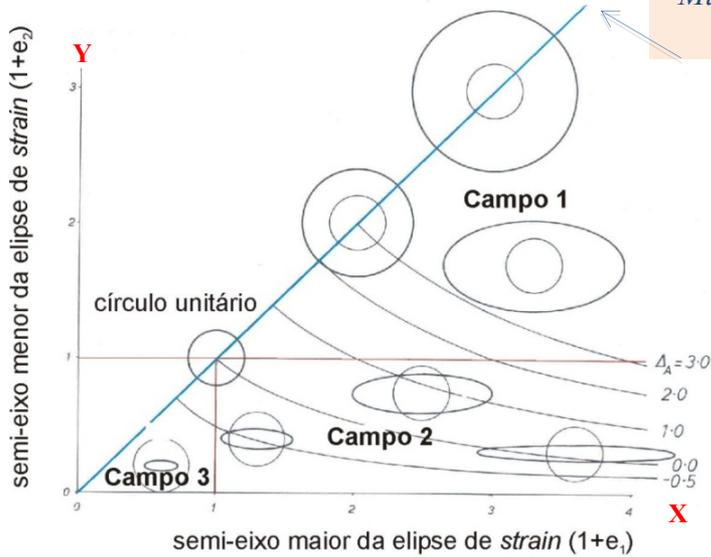


BOUDINS

BOUDINAGE E ELIPSE DE DEFORMAÇÃO (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.

STRAIN EM DUAS DIMENSÕES



Mudança de volume, sem mudança de forma

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

Campo 2
 $e_1 > 1 - e_2 < 1$ tem-se a intersecção do círculo unitário por duas linhas de não deformação longitudinal finita que definem os campos alongados e encurtados.

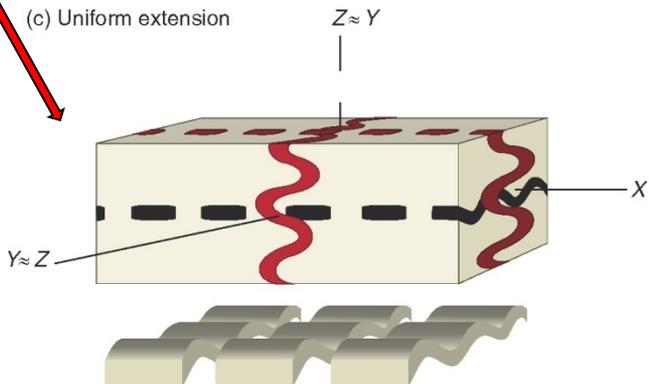
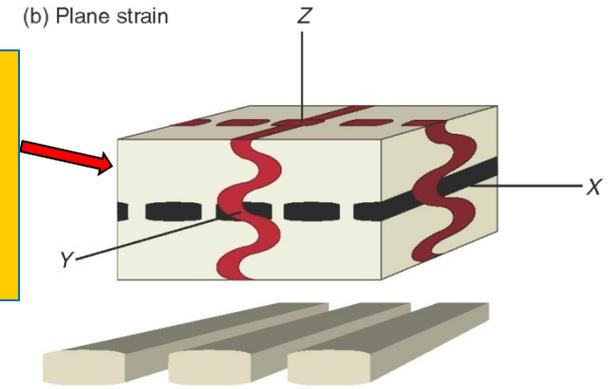
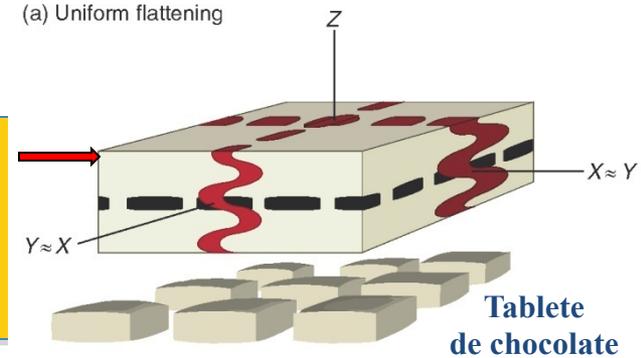
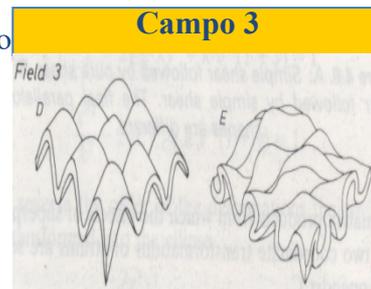
Classificação da forma das elipses de *strain*

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).

A linha unitária entre os campos 1 e 2 é o domínio da **deformação plana** – sem variação ao longo do eixo Y (ou $1+e_2=1$)



BOUDINS – BOUDINAGE E ELIPSE DE STRAIN

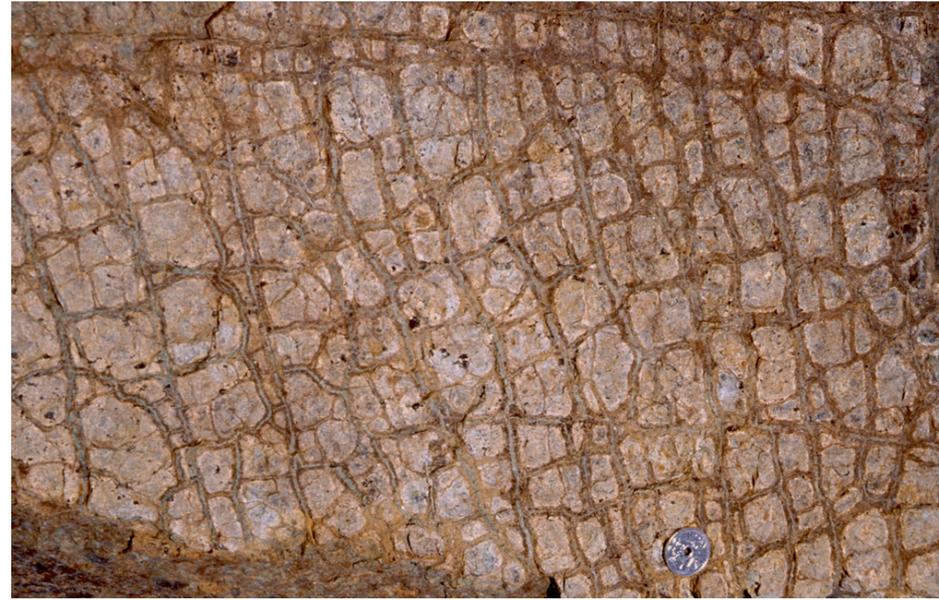
Extensão (eixo-X, ou $1+e_1 > 1$) paralela a direção de movimento ao longo do plano-axial da dobra (eixo-a cinemático)



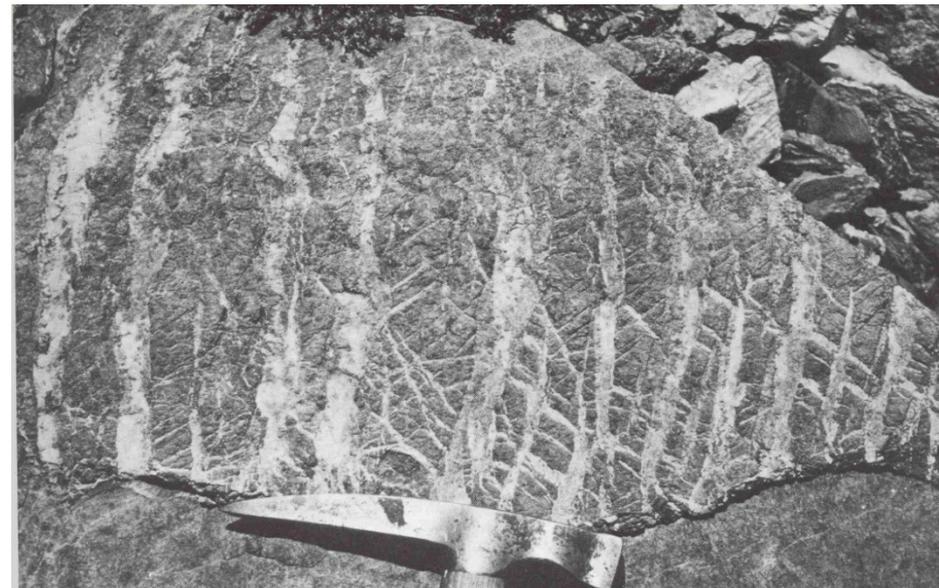
Seção XZ - Combinação de *boudin* e dobra – campo 2 das elipses de deformação



Extensão (eixo-X, ou $1+e_1 > 1$) paralela a direção de movimento ao longo do eixo-B da dobra (eixo-b cinemático)



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



BOUDINS

DOBRAS BOUDINADAS – DEFORMAÇÃO PROGRESSIVA

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



Dobras passivas são estiradas e apresentam flancos adelgaçados, em *pintch-and-swell* ou *boudins* e charneiras espessadas, isoladas ou de dobras em anzol (*fish hook folds*)

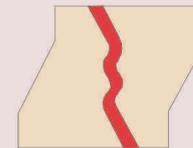


$$\alpha > 90^\circ < 110^\circ$$

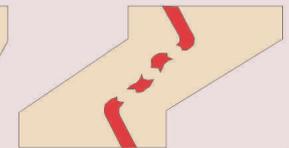


A deformação por **cisalhamento simples** de veios, diques, filões, ou mesmo camadas, com obliquidade entre 90° e 110° em relação ao plano de deslizamento, pode gerar dobras que, com o incremento da deformação, serão rotacionadas para o campo da extensão.

dobras por
buckling



dobras budinadas



Extensão (boudinage) seguida de compressão (dobramento)

BOUDINS

BOUDINS DE FOLIAÇÃO

AUSÊNCIA DE CONTRASTES DE COMPETÊNCIA

Tração e abertura de zonas de dilatação, pressão de fluidos e preenchimento (*crack-seal veins*). Deflexão da foliação nas paredes das fendas de tração que, durante o processo segue continuamente modificando sua forma.

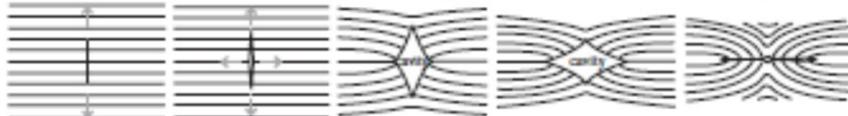
Boudins de foliação

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

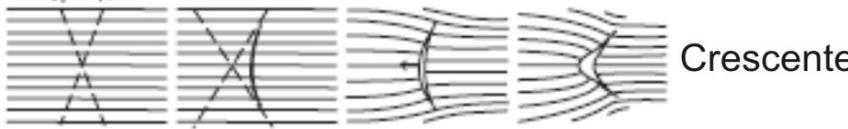
Esforço principal ortogonal a foliação

Deformação progressiva **Abertura e preenchimento**

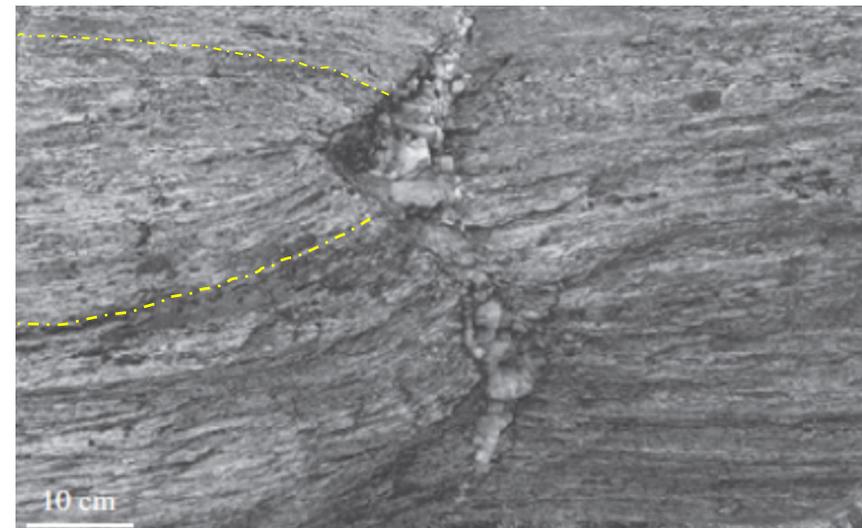
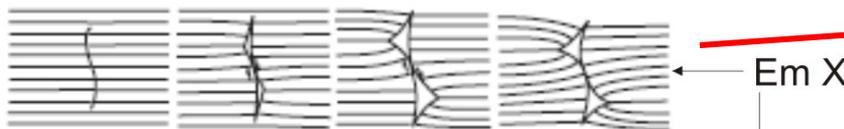
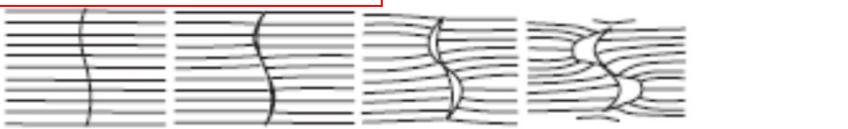
Boudins simétricos Losangular Boca de peixe



Boudins assimétricos Crescente

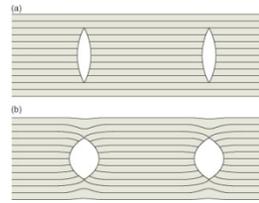


Boudins escalonados Duplo crescente



BOUDINS

BOUDINS DE FOLIAÇÃO



Boudins de foliação simétricos – deformação coaxial



Quartzito Carrancas – Serra da Chapada das Perdizes

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 ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

ESTRUTURAS LINEARES TECTÔNICAS

1- **lineações geométricas** - linhas de charneira, eixos de dobras cilíndricas, **lineações de intersecção entre duas estruturas planares**, lineações de crenulação

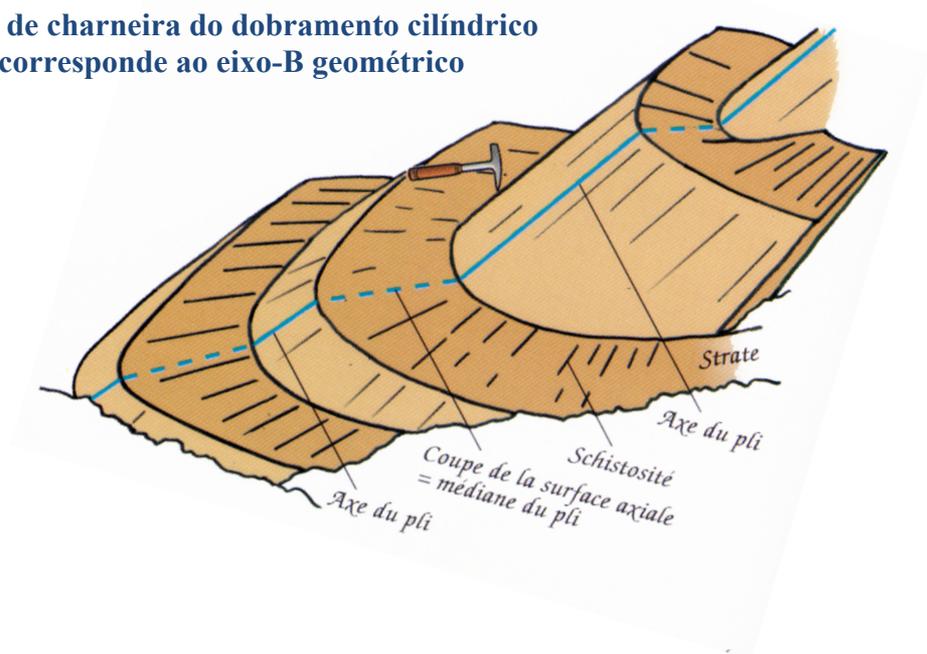
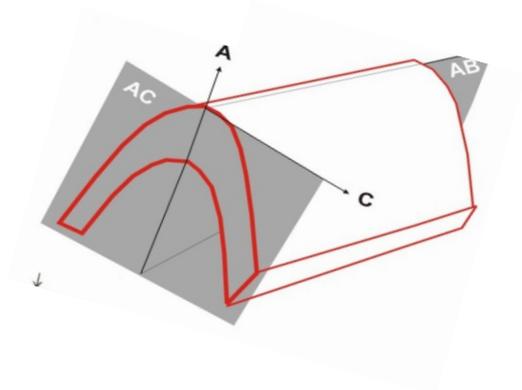
2- **lineações penetrativas** ou **relacionadas ao eixo de alongação principal do elipsóide de deformação** - fábrica-L lineações de estiramento mineral, de agregados minerais e de seixos; lineações de recristalização orientada de minerais



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

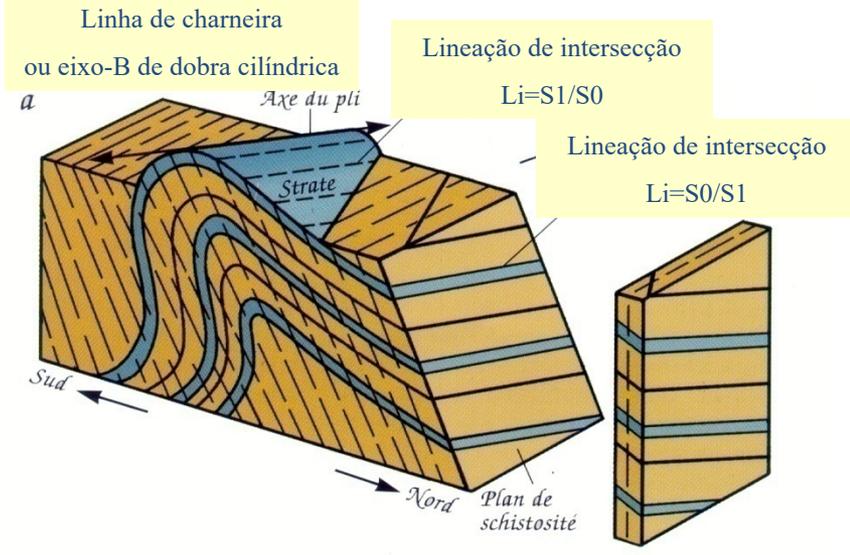


Linha de charneira do dobramento cilíndrico corresponde ao eixo-B geométrico



ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS AO DOBRAMENTO

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



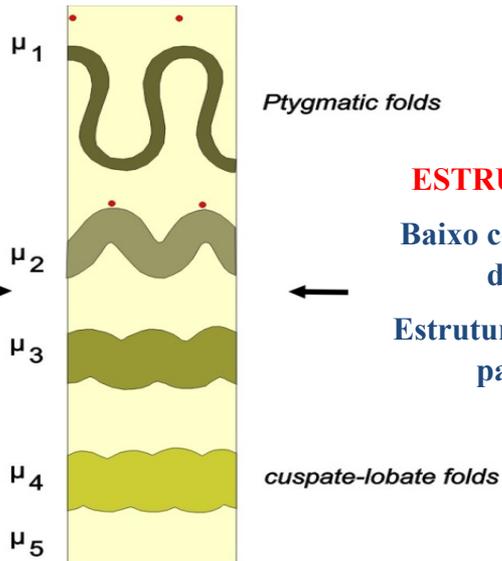
Obs: Intersecção entre S_1 e uma superfície qualquer produz uma lineação qualquer.



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

ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

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



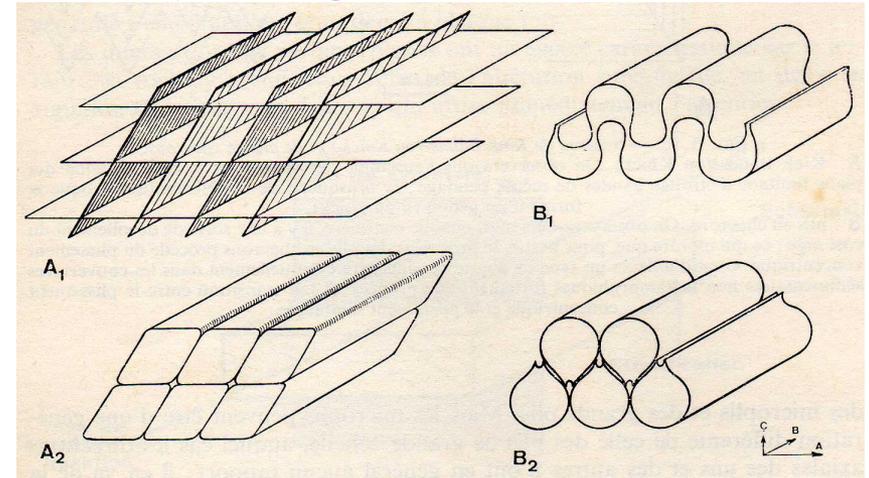
ESTRUTURAS EM MULLION

Baixo contraste de competência e dobras concêntricas.

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

Estruturas colunares (mullions)

geradas por Intersecção de clivagens ou dobras concêntricas

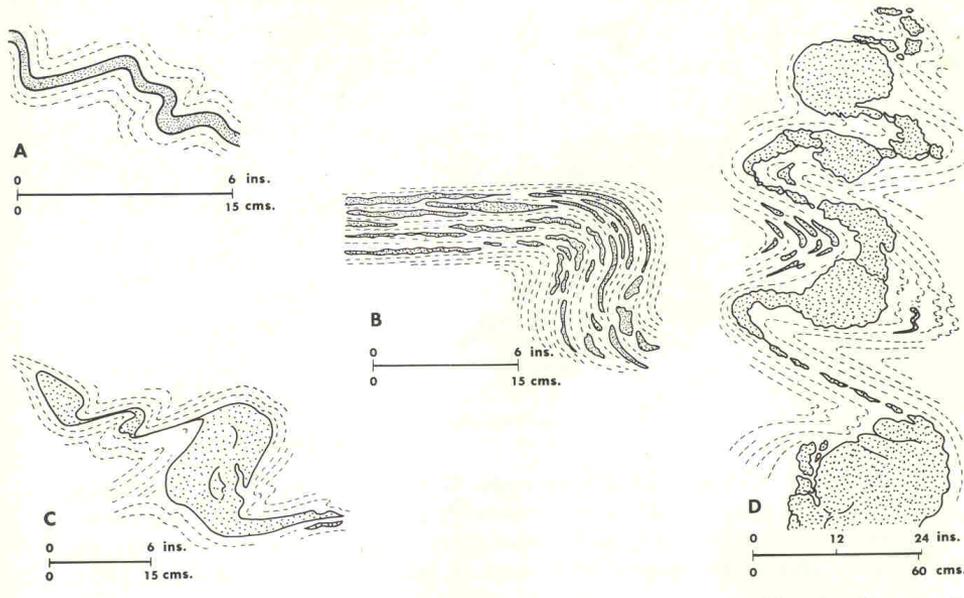


ESTRUTURAS LINEARES ASSOCIADAS A LINHA DE CHARNEIRA DO DOBRAMENTO

RODDING OU RODS

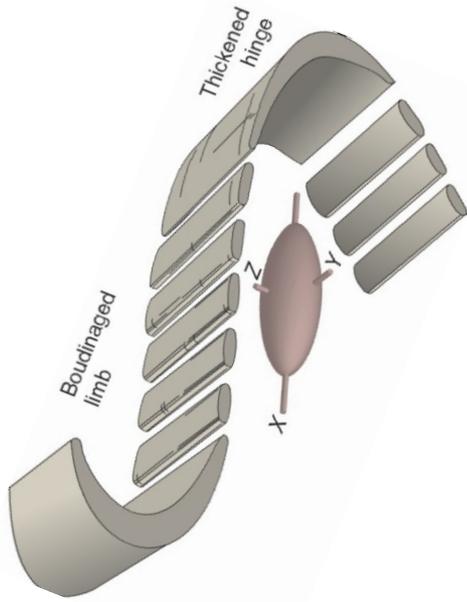
Corpos cilíndricos, **monominerálicos** e de composição distinta da rocha encaixante. Sua origem está ligada a segregação mineral, por fluidos e a partir da rocha encaixante, durante o metamorfismo e o dobramento, seguido de extensão.

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.



S_1 , S_2 e *rods* sin- S_2

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

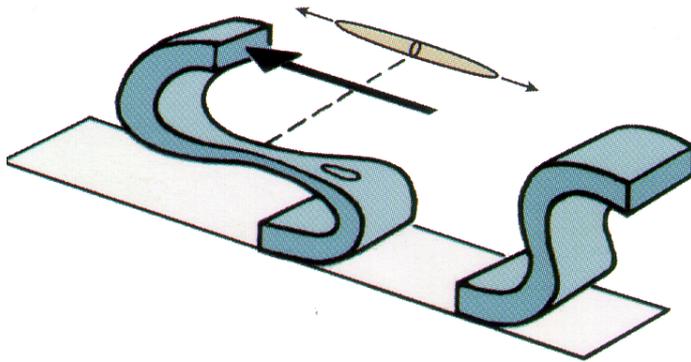


Eixo-X paralelo ao eixo-B

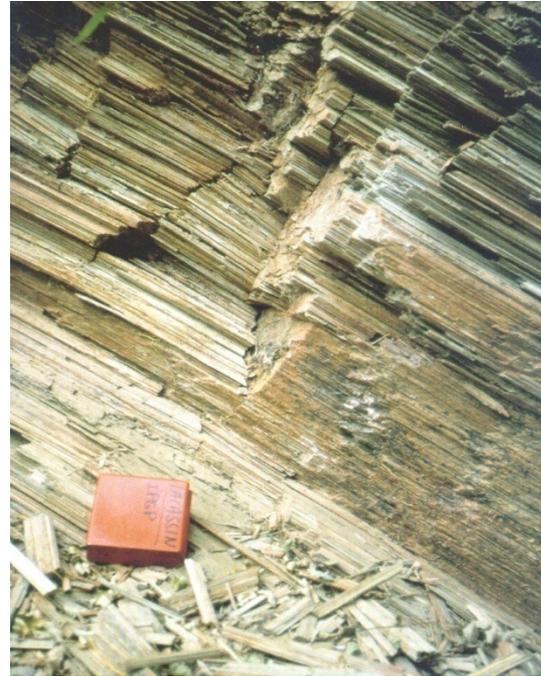


ESTRUTURAS LINEARES

LINEAÇÕES DE ESTIRAMENTO – EIXO-X DO ELIPSÓIDE DE DEFORMAÇÃO



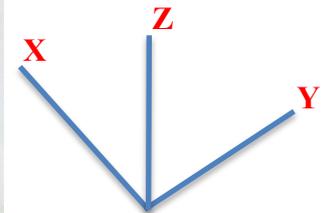
Dobra passiva com estiramento, por deformação não-coaxial, paralela ao eixo-a cinemático = eixo-X do elipsóide de deformação



**Lápis de rocha – tectonito-L
(por estiramento)**



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

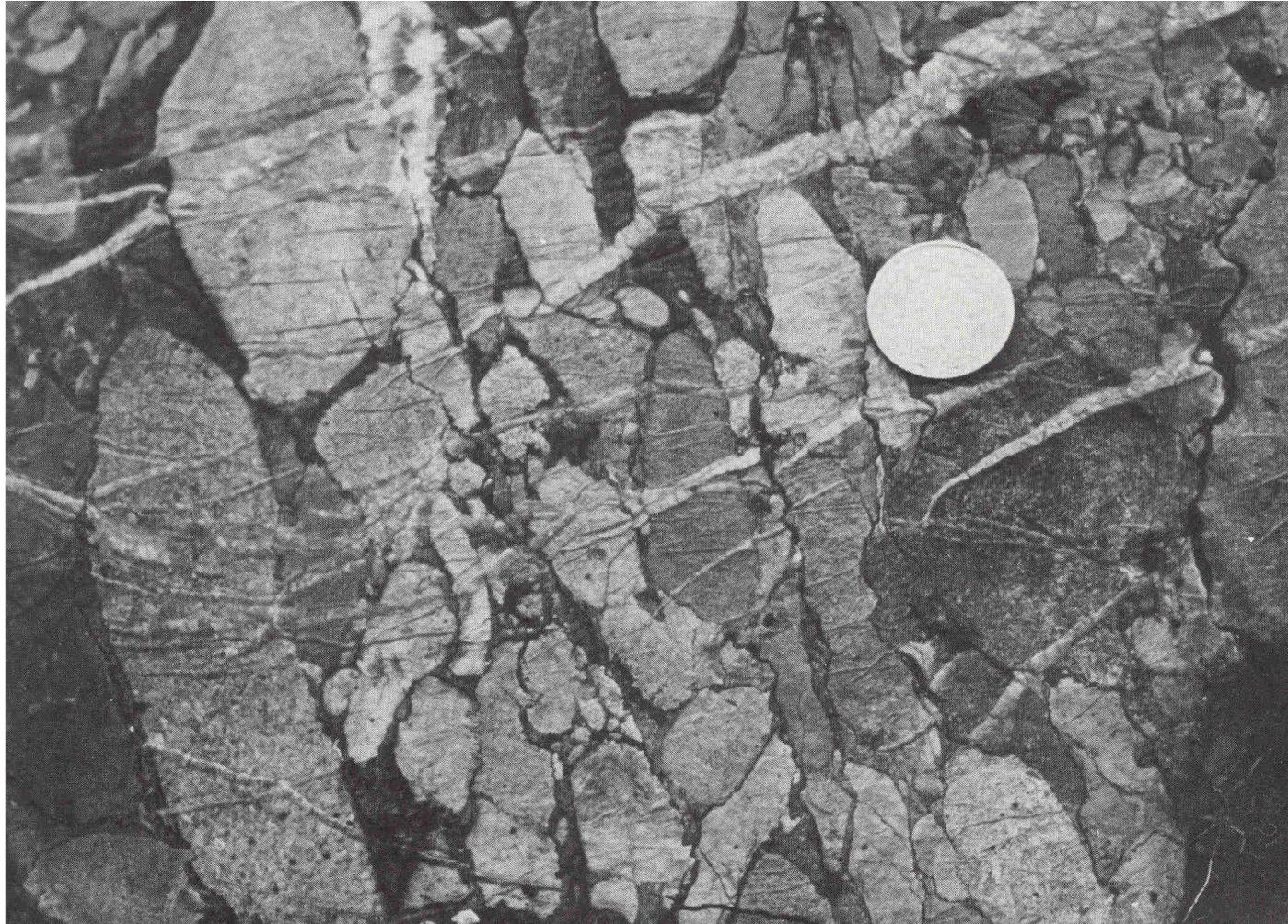


Obs: Os lâpis de rocha, quando produzidos pela intersecção entre clivagens, relacionam-se a linha de charneira das dobras da ultima fase.

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 DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – PADRÃO DE DISPERSÃO DAS LINEAÇÕES-B DE INTERSECÇÃO

CRITÉRIOS

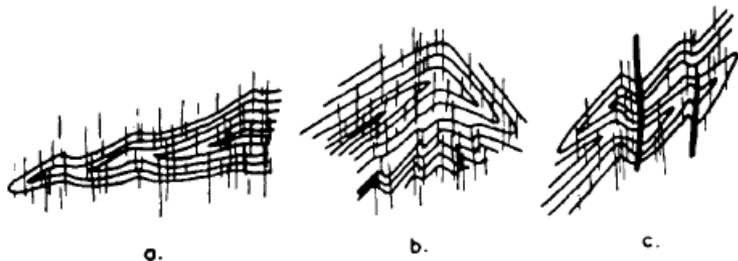
1-xistosidade corta a dobra

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_2) entre a xistosidade (S_2) e uma superfície dobrada anteriormente.

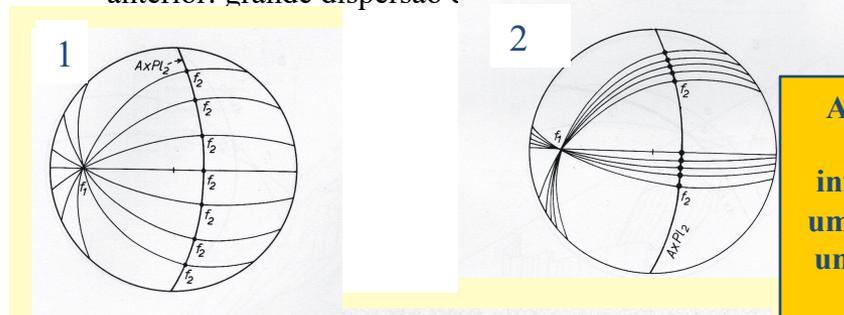
$L_i=L_2$ dispersa mas contida na foliação- S_2 . Define, no estereograma, um grande-círculo que representa a foliação- S_2 .

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

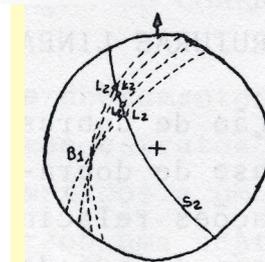
Xistosidade corta a dobra

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

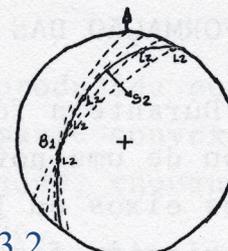
1. Dobras prévias com baixa razão A/λ : a clivagem ou xistosidade superposta pode ser definida pelo plano que contém as lineações de intersecção dispersas.
2. Dobras prévias com charneiras agudas, tipo sanfonadas: L_i concentradas, no plano da xistosidade superposta, em duas orientações controladas pelos 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



3.1



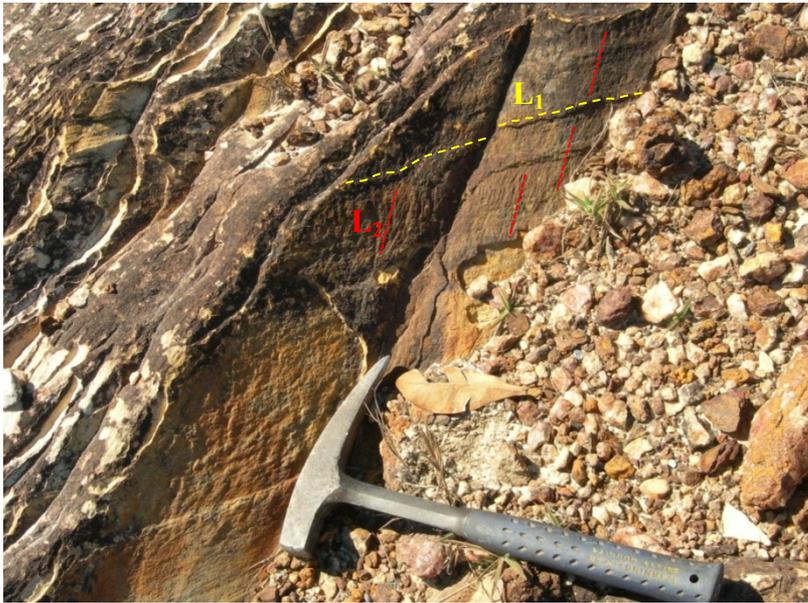
3.2



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 LINEAÇÕES E LINEAÇÕES DOBRADAS



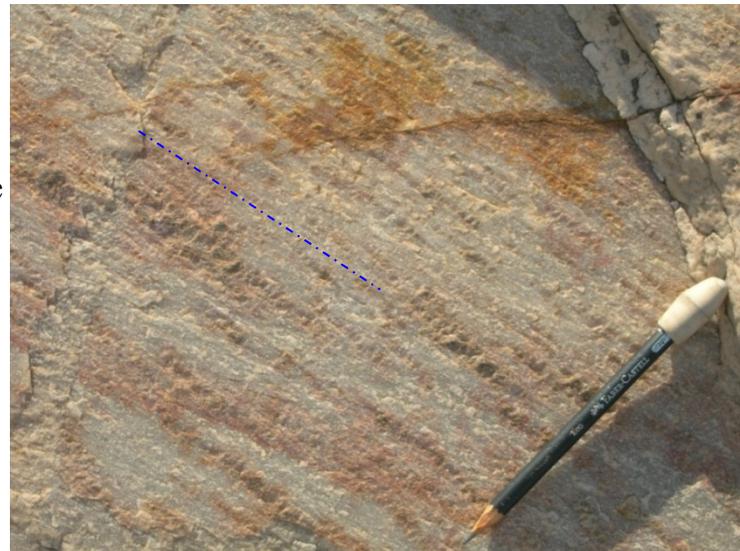
Lineações de intersecção L_1 entre as superfícies- S_0 e a foliação S_1 .

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)



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

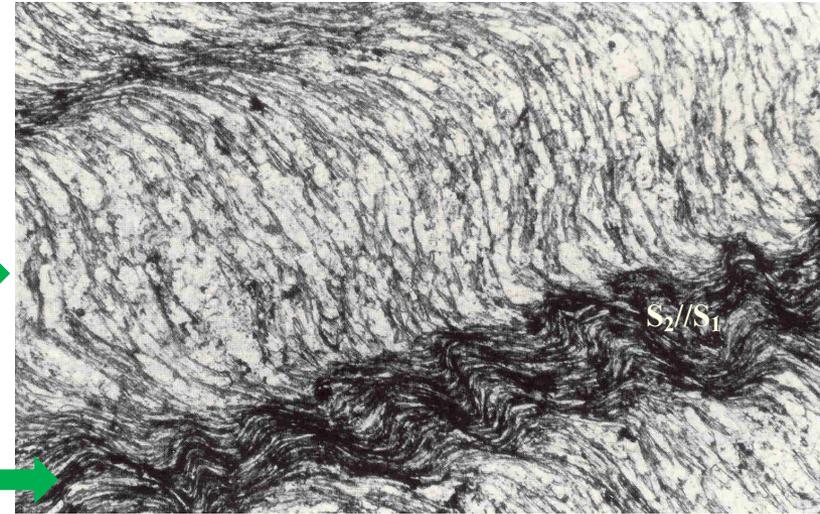
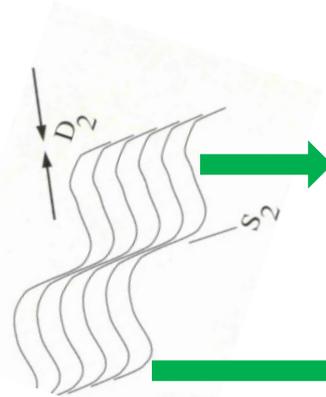
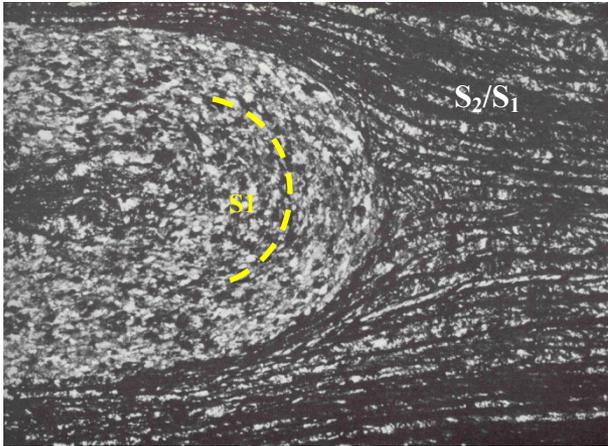
$$L_1 = L_3 = S_3/S_2$$



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

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

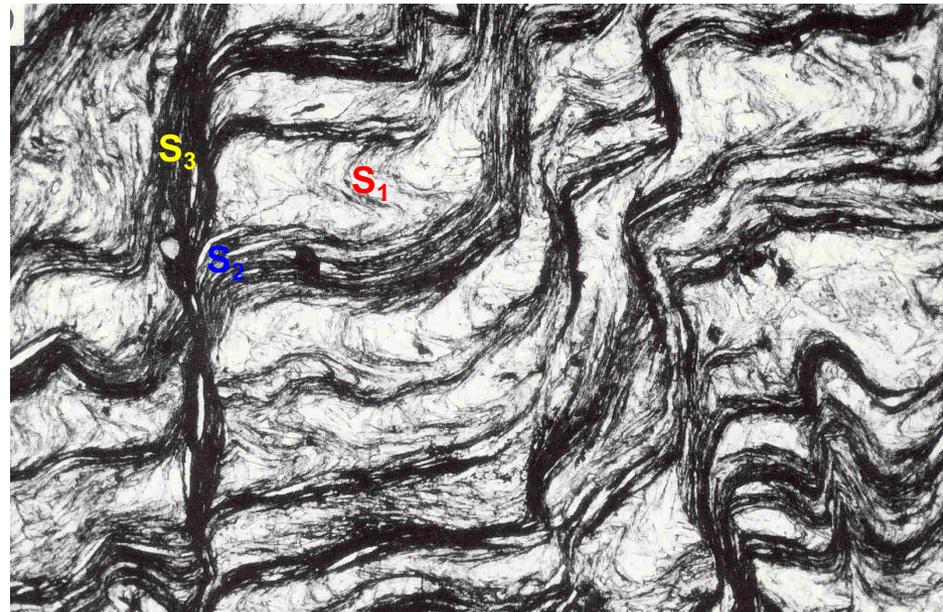
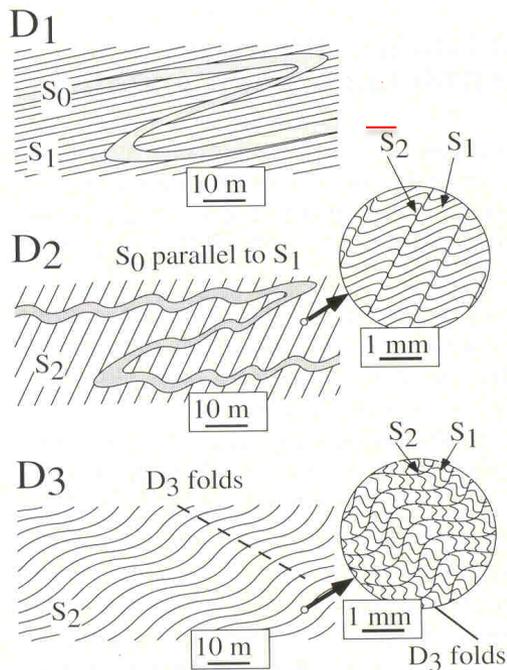
SUPERPOSIÇÃO DE XISTOSIDADES



S_1 = xistosidade contínua dobrada

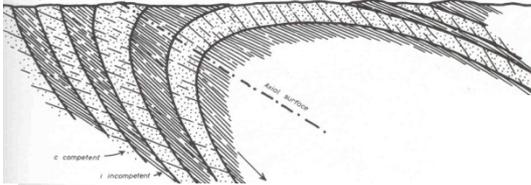
Clivagem S_2 espaçada ou disjuntiva no nível competente (dobrado na sub-classe 1b);

Clivagem S_2 de crenulação discreta divergente no nível incompetente (dobrado na classe 3).



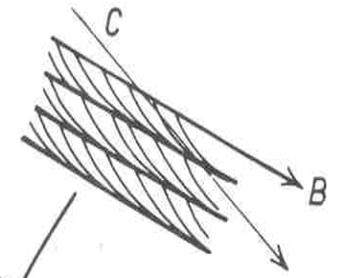
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

DOBRAMENTO DO PLANO AXIAL



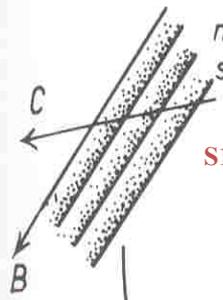
Anticlinal recumbente

normal order - cleavage
steeper than bedding

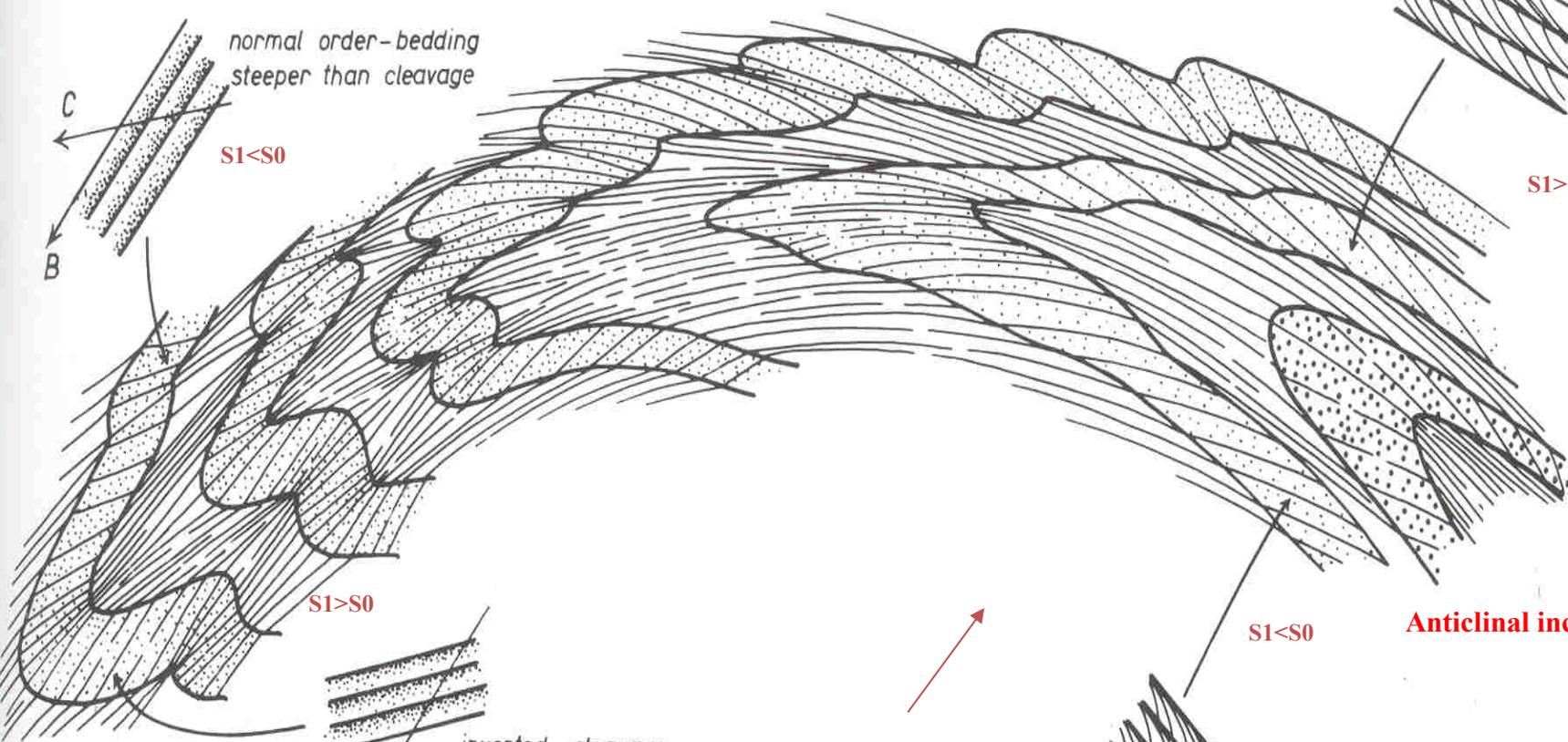


$S1 > S0$

normal order - bedding
steeper than cleavage

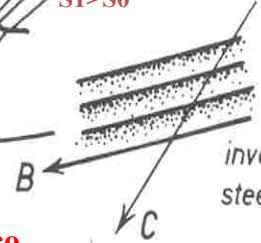


$S1 < S0$



$S1 > S0$

inverted - cleavage
steeper than bedding



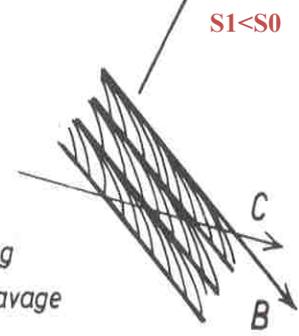
Anticlinal sinfórmico

downward facing
(synformal anticline)

Polaridade estratigráfica

Anticlinal inclinado

inverted - bedding
steeper than cleavage



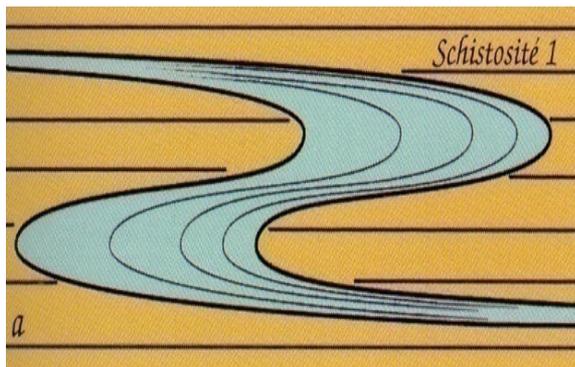
upward facing
(antiformal anticline)

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS



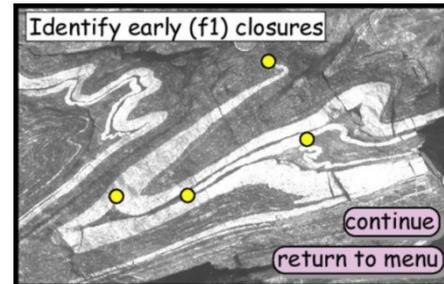
Dobramento passivo, isoclinal, D_1 e redobramento D_2 anisópaco (sub-classe 1C)



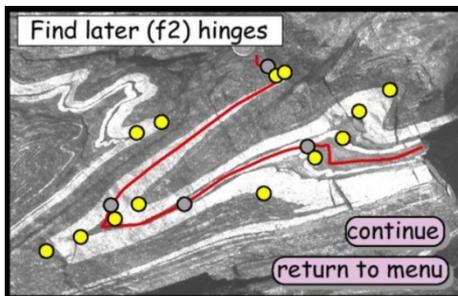
Dobramentos polifásicos (superpostos)



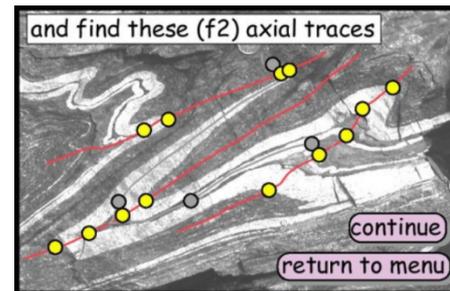
Visão do afloramento



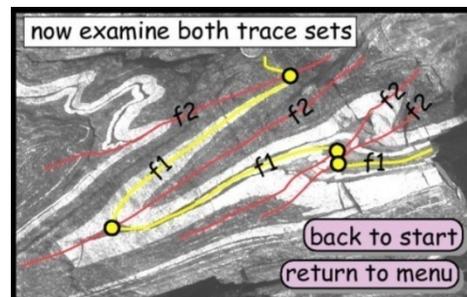
Charneiras das dobras 1



Traço axial dobrado da fase 1 e charneiras da fase 2



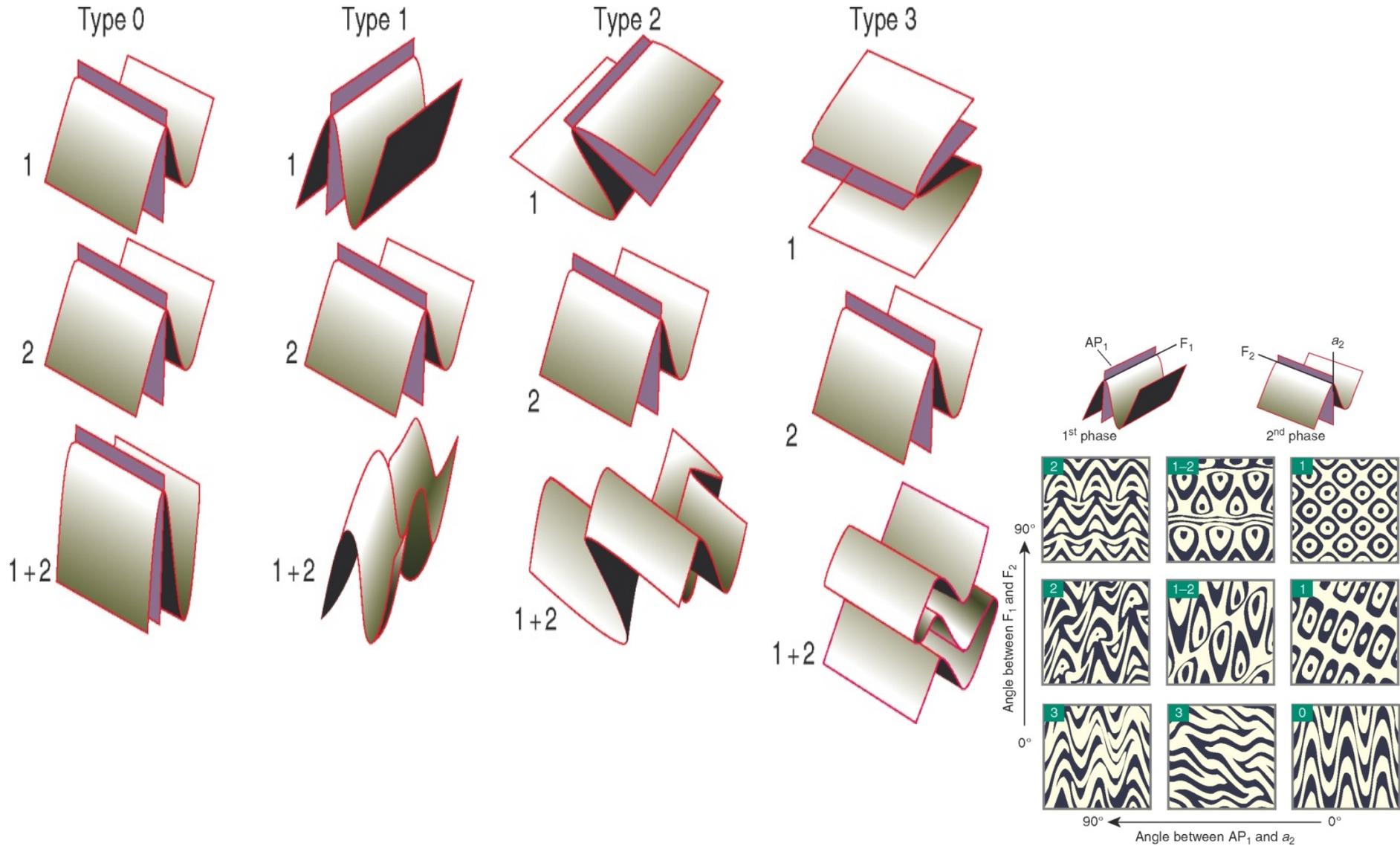
Traços axiais da fase 2



Superposição da fase 2 sobre fase 1

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

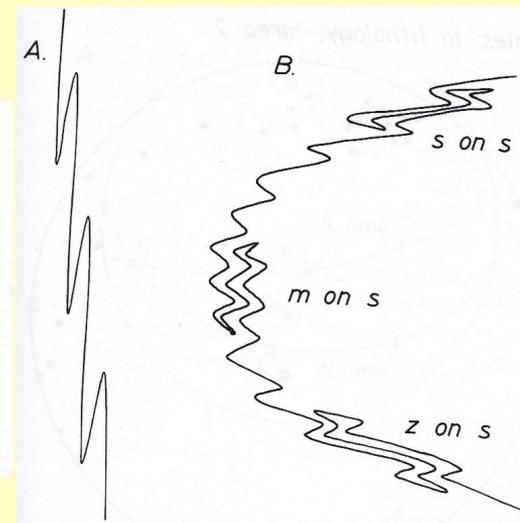
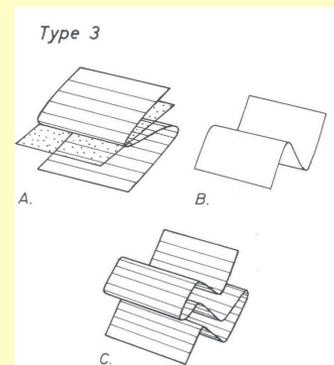
A superposição de dobras de dimensões semelhantes, **em um mesmo espaço**, gera uma **FIGURA DE INTERFERÊNCIA**



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)

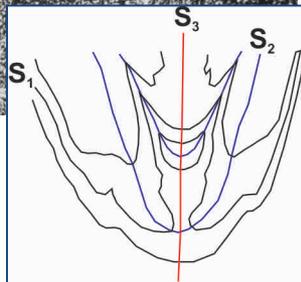
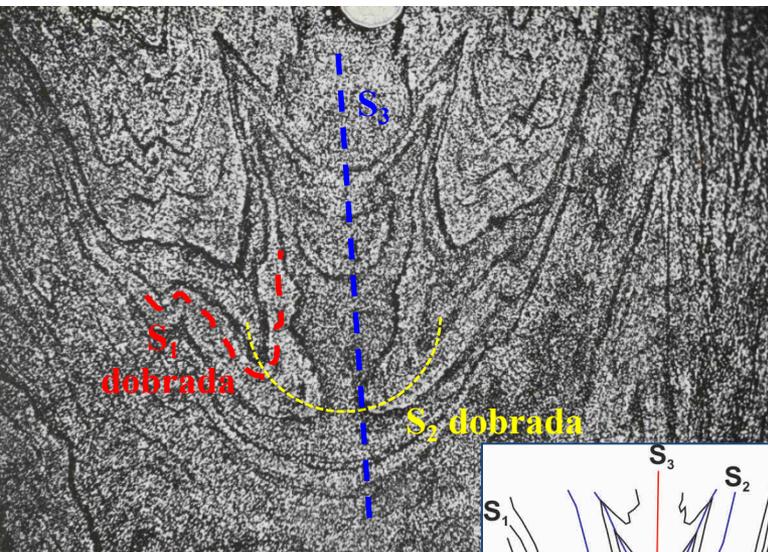


Eixos das dobras superpostas são paralelos (dobras homoaxiais) e os planos axiais possuem mergulhos quase-ortogonais.

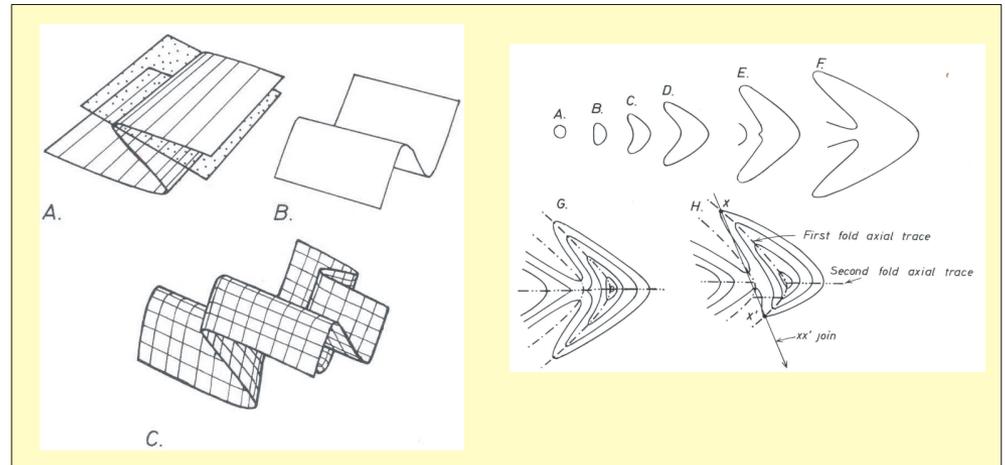
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)



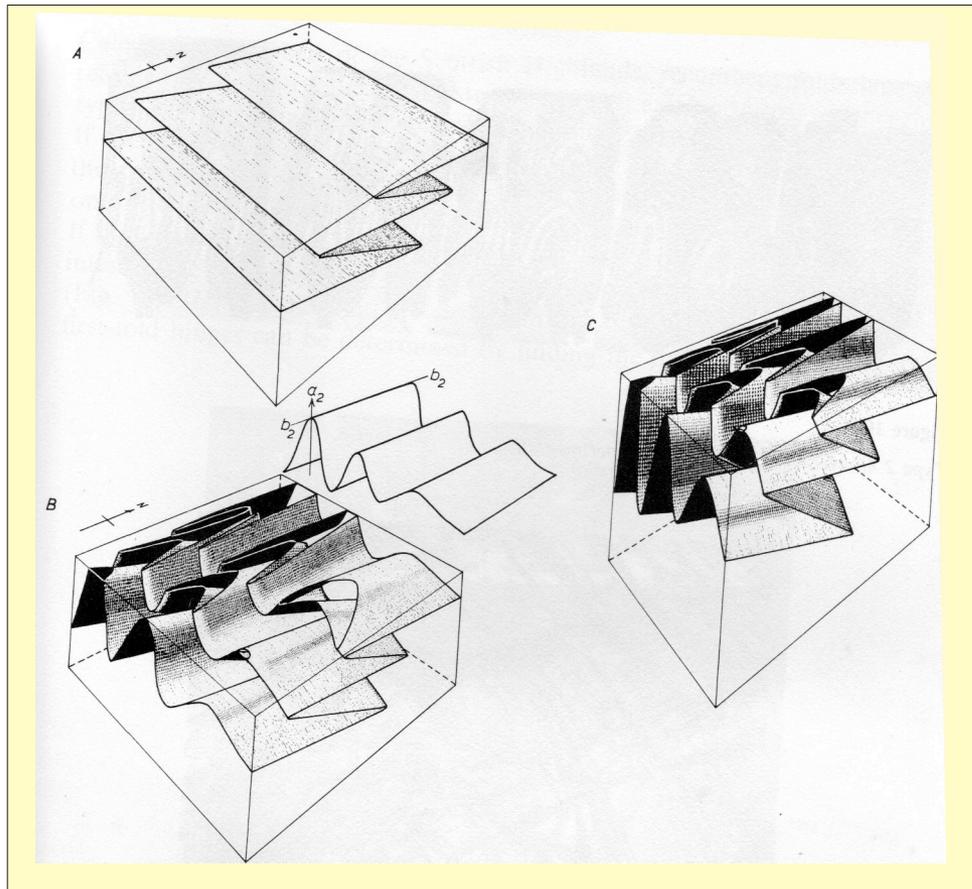
Grande obliquidade entre os eixos e os plano axiais das dobras superpostas.



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

FIGURAS DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-2 (MEIA LUA)

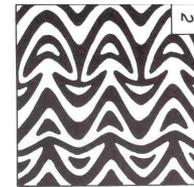


ÂNGULO ENTRE O PA1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a_2 , NO PA2

90°

Entre 0° e 90°

0°



90°



0°-90°

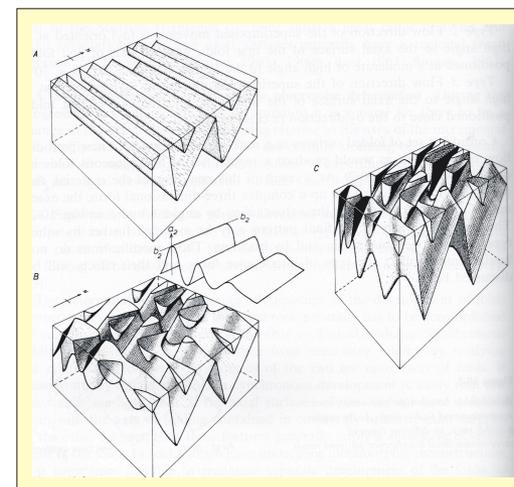
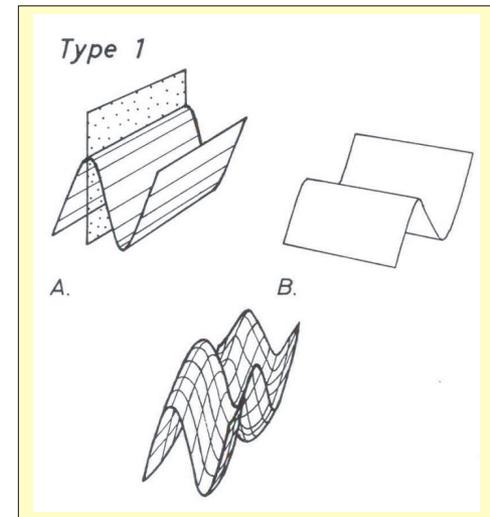
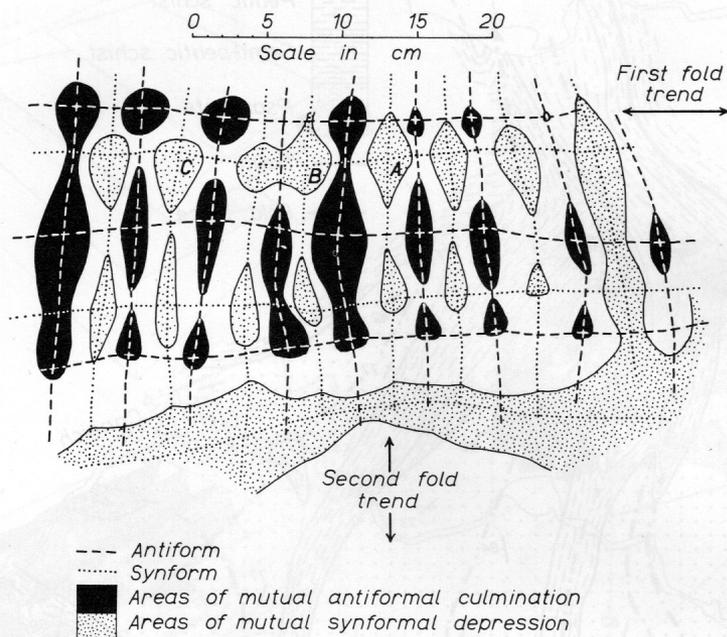
ÂNGULO ENTRE O EIXO B1 E O EIXO B2

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

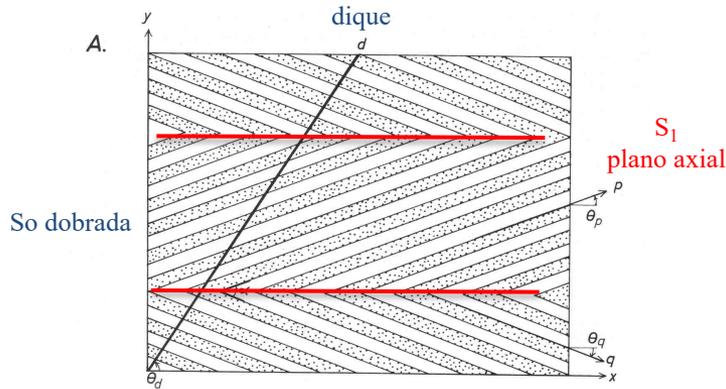


SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

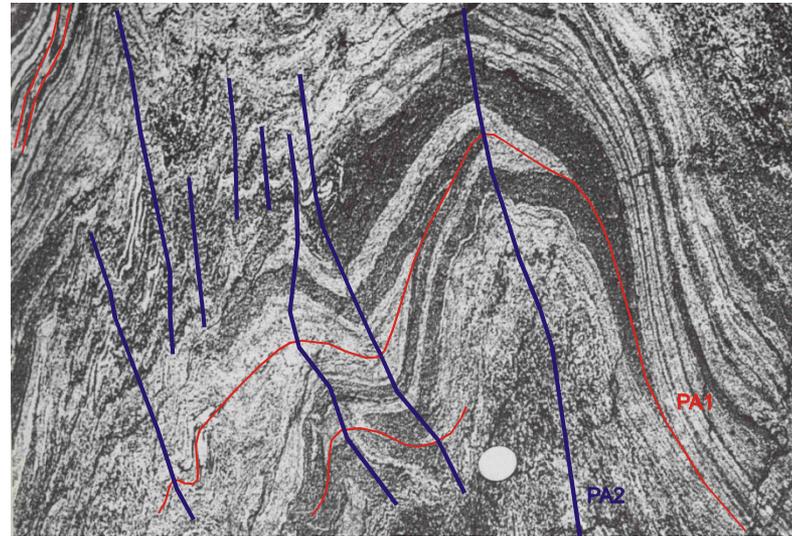
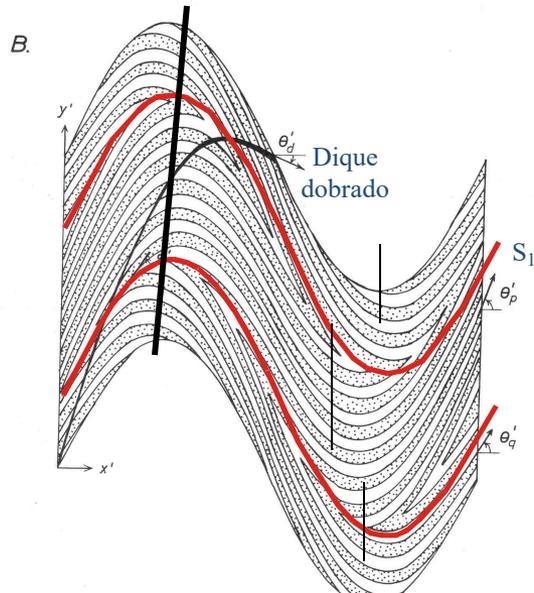
SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS

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



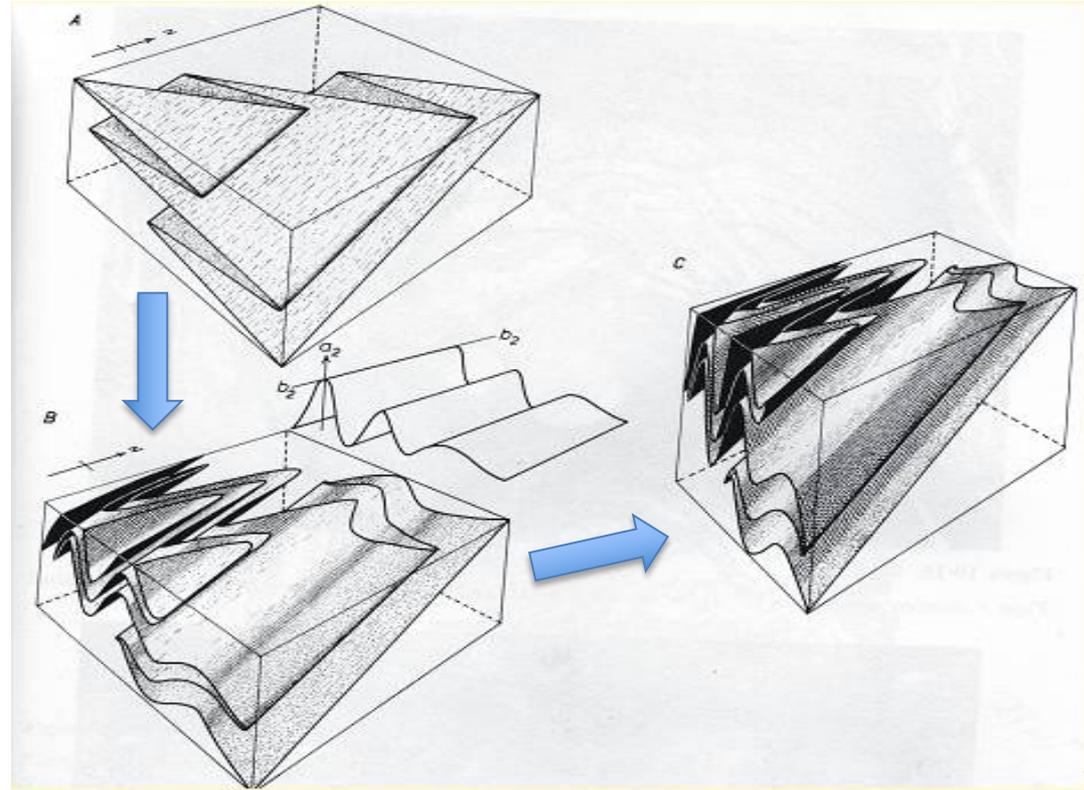
A disposição curviplanar (dobrada) de um plano axial (ou de elementos estruturais a ele relacionados – foliações) é um princípio básico de hierarquia entre as fases superpostas.

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

FIGURA DE INTERFERÊNCIA DO TIPO-3 (EM LAÇO)

Eixos das dobras superpostas são paralelos, as dobras são homoaxiais, mas os planos axiais possuem mergulhos quase-ortogonais.

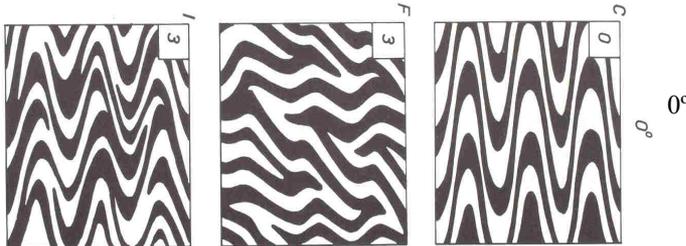


ÂNGULO ENTRE O PA_1 E A DIREÇÃO DE MOVIMENTO a_2

90°

Entre 0° e 90°

0°



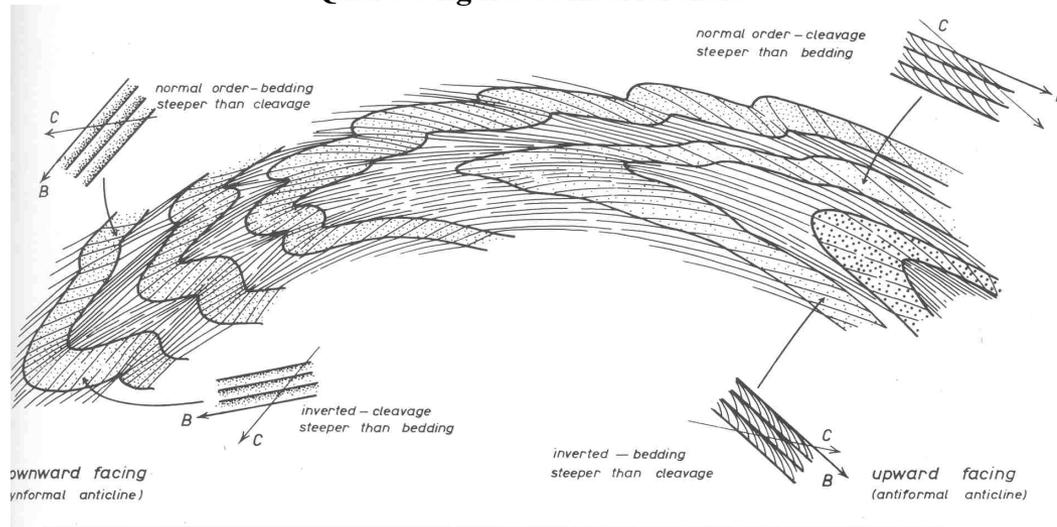
ÂNGULO ENTRE OS EIXOS B_1 e B_2

0°

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

Qual é a figura de interferência ?



SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAMENTO

SUPERPOSIÇÃO DE DOBRAS – FIGURAS DE INTERFERÊNCIA

Qual é a figura de interferência ?

