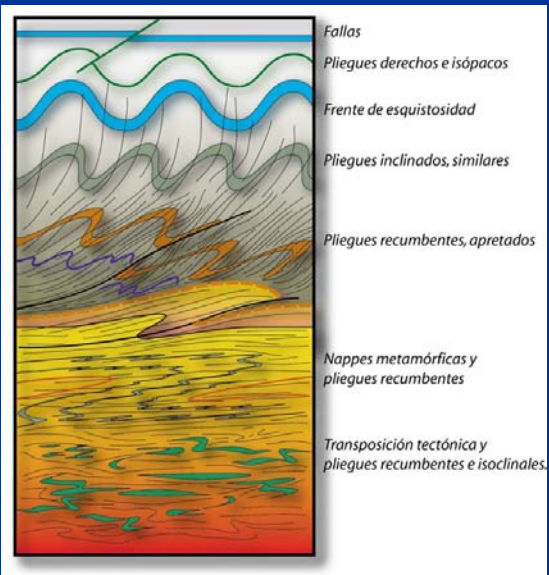
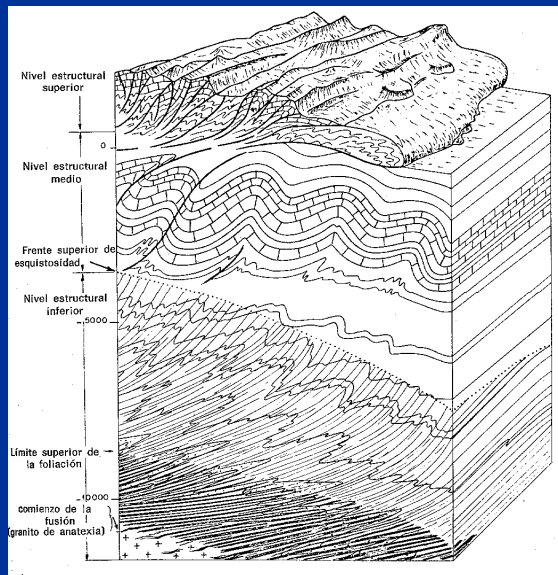


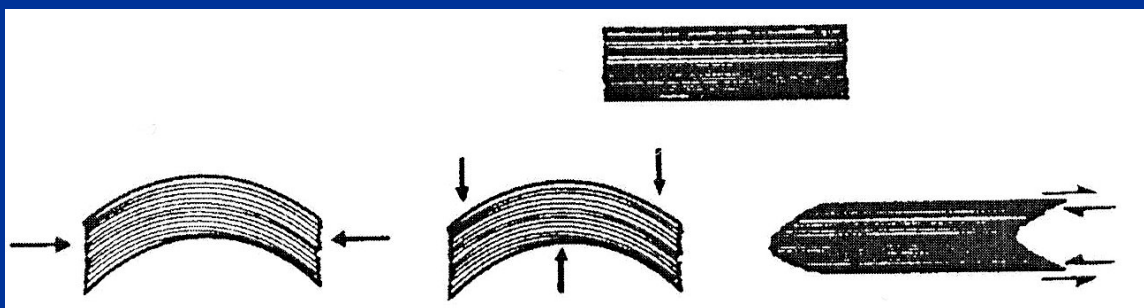
Noción de nivel estructural



Mecanismos de plegamiento

- Tres tipos:
 - **PANDEO u ONDULAMIENTO (Buckling)**
 - Esfuerzos normales actuando paralelos a las capas
 - **COMBADURA (Bending)**
 - Esfuerzos normales actuando muy oblicuos o perpendiculares a las capas
 - **CIZALLAMIENTO SIMPLE HETEROGÉNEO**
 - Esfuerzos de cizalla oblicuos a las capas

Los 3 mecanismos ideales:



PANDEO

COMBADURA

CIZALLAMIENTO
SIMPLE
HETEROGÉNEO

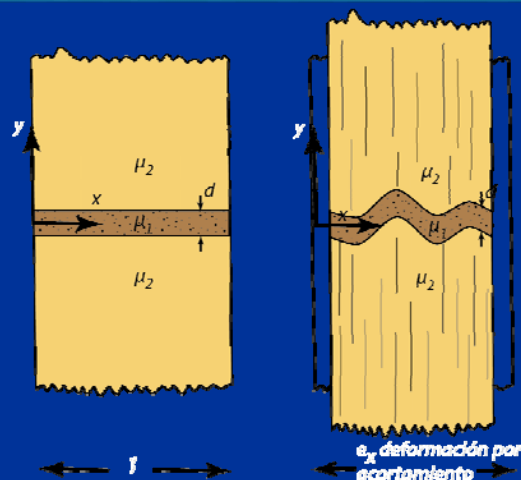
Mecanismos naturales

- Los pliegues se forman por una combinación de mecanismos.
- Diferentes capas y rocas se pliegan respectivamente por diferentes mecanismos, de acuerdo con su **reología**.
- Resistencia plástica y viscosidad varían con:
 - Tipo de roca
 - Espesor de cada capa.

Pandeo de una sola capa competente

$$y = A \cdot \sin(2\pi \cdot x / \lambda)$$

$$\lambda_d = 2\pi d (\mu_1 / 6\mu_2)^{1/3}$$



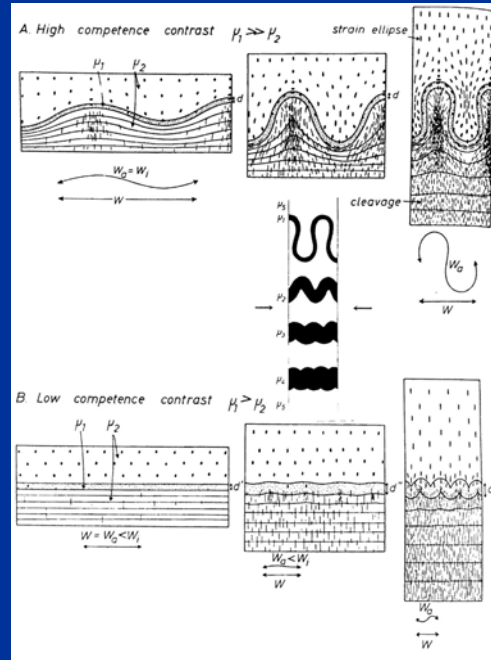
Experimento de pandeo de una sola capa competente fina entre capas de viscosidad menor muy gruesas.

A. Pandeo con fuerte contraste de competencia



B. Pandeo con débil contraste de competencia

Lechos negros: viscosidades decrecientes hacia abajo.

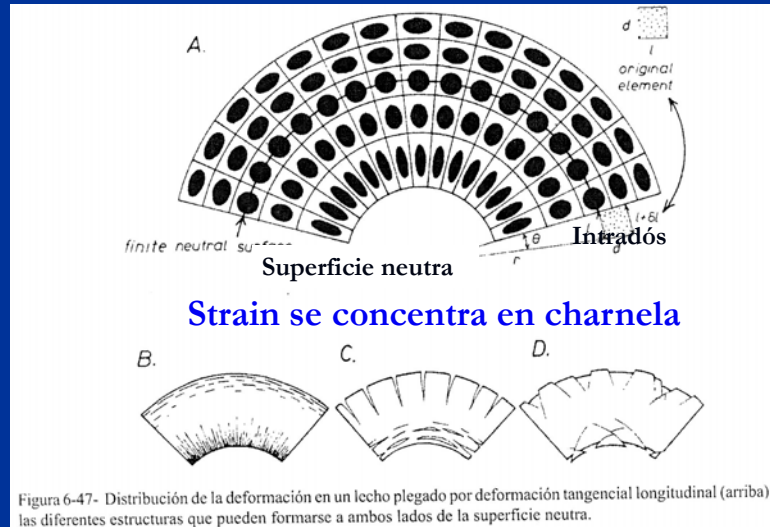


Particularidades

- **Rotación de los flancos:**
 - Favorece la amplificación
- **Engrosamiento de la capa:**
 - No favorece la amplificación
- **Elipses de deformación muestran que aun las capas competentes sufren deformación interna.**
- **Dos modos básicos de acomodar deformación interna:**
 - Deformación tangencial longitudinal.
 - Fluencia de capas durante flexura.

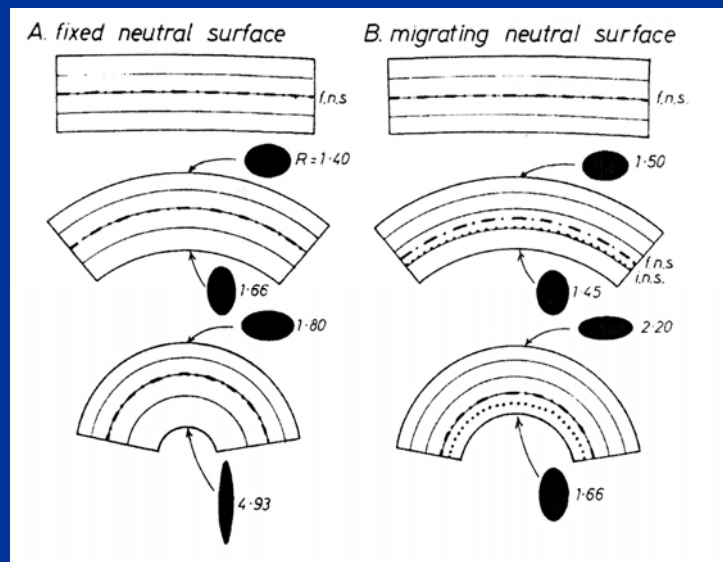
Flexura ortogonal

Extradós

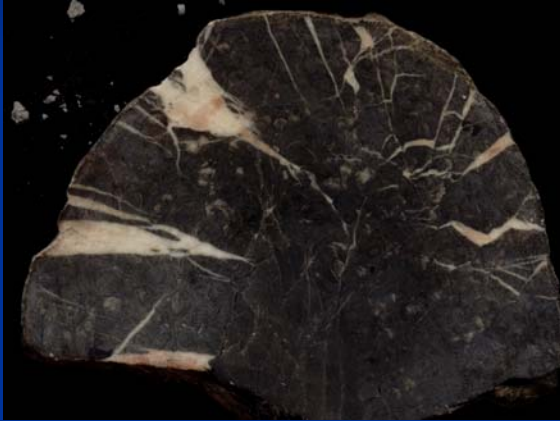


Inestabilidad de la superficie neutra

Superficie Neutral Finita
 vs.
 Superficie Neutral Infinitesimal



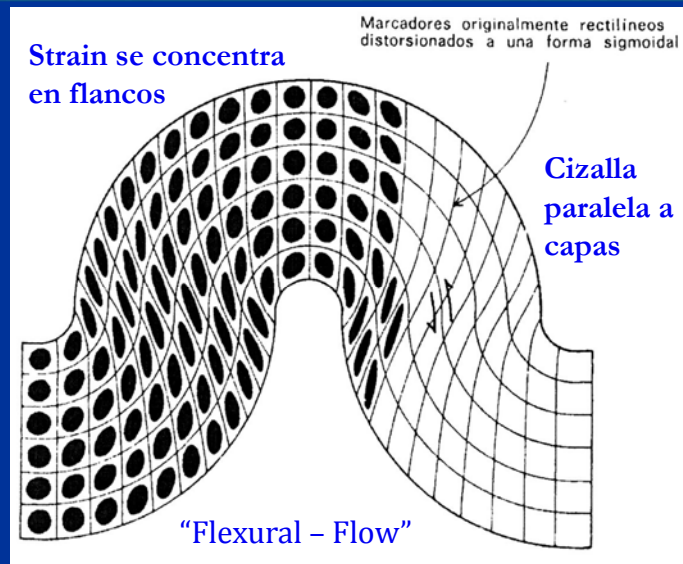
Pliegues de pando y deformación de charnela



Flexo-fluencia

- **Flancos del pliegue** se deforman por un mecanismo de cizallamiento simple actuando paralelamente a los límites de la capa = "*Flexural Flow*".

Flexo-fluencia (o cizalla paralela)



Resultados de la flexo-fluencia

Ptygmáticos



Charnelas sin raíz



Pliegues *mullion*

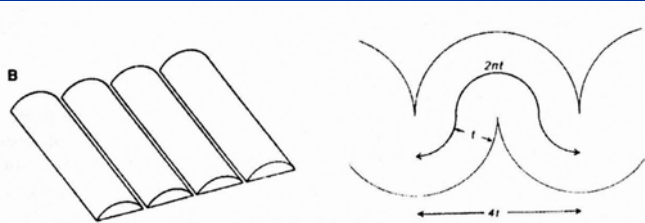
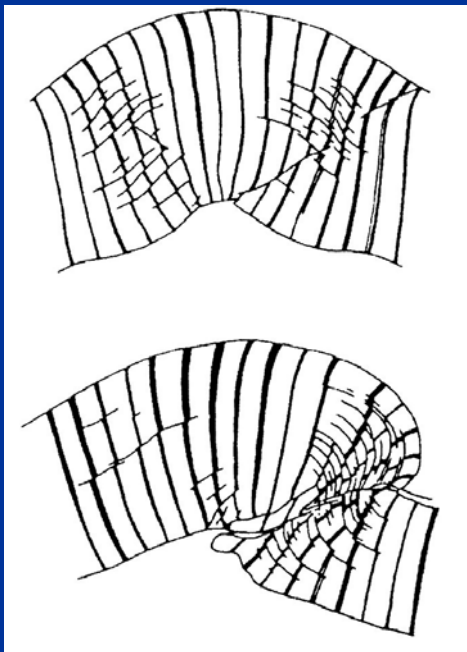
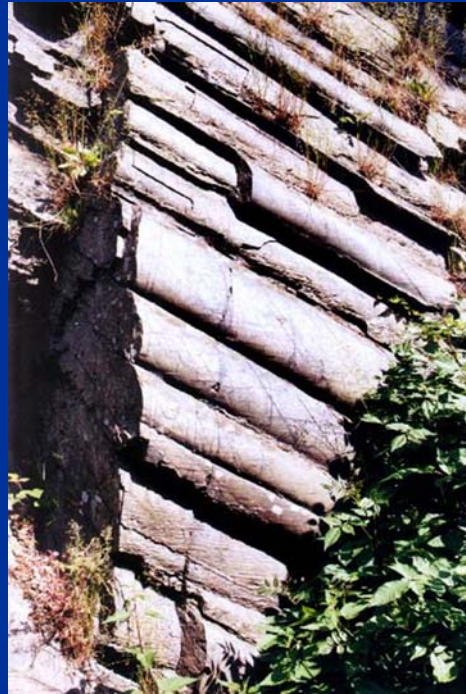


Figura 6-54- los *mullions* de las ventanas góticas (izquierda) y perfil de un pliegue de tipo *mullion* en una capa competente con poco contraste de la matriz (derecha).



Flexo-fluencia

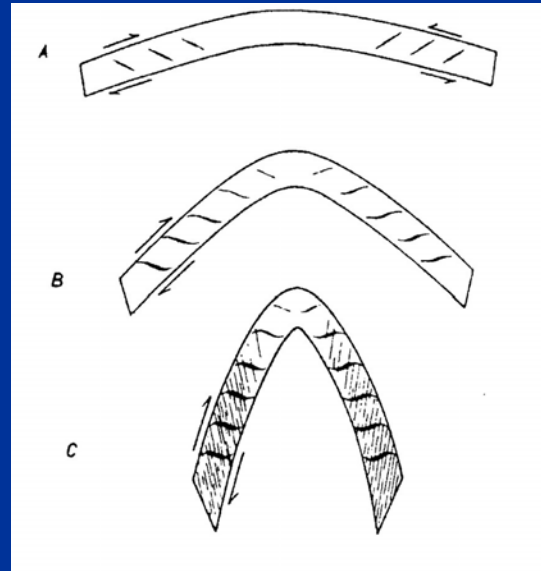
- Desarrollo de fracturas paralelas al borde de las capas.
- Fracturas acomodan la fluencia durante el plegamiento.

De la flexión al aplastamiento

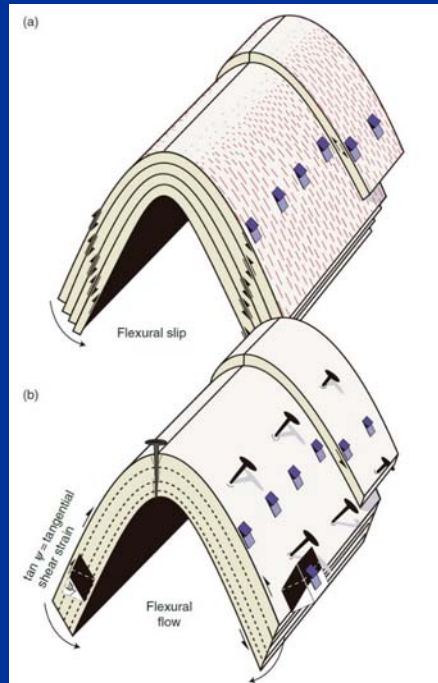
A. Cizalla paralela a la estratificación.

B. Cizalla y torsión generando diaclasas de tensión sigmoides

C. Cizalla simple, torsión y clivaje en abanico



Deslizamiento flexural vs. Flujo flexural



Estrías producidas por deslizamiento flexural

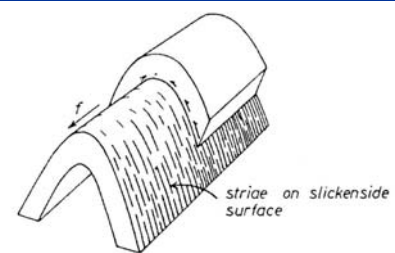
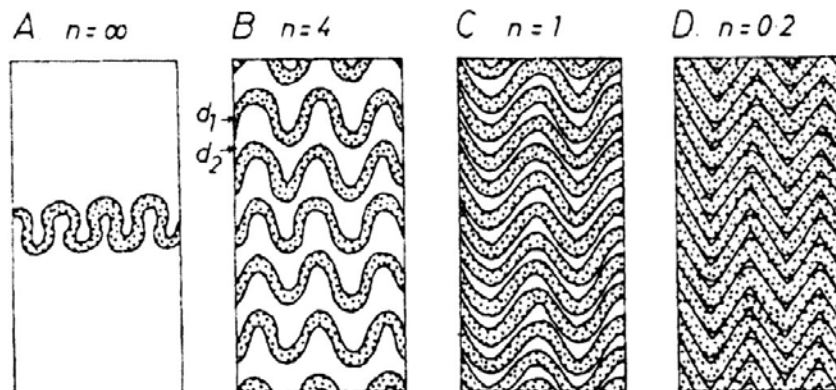


Figura 6-64- Estrías producidas por flexodeslizamiento

Deslizamiento flexural en Creta



Relación entre espesor de capas competentes/incompetentes y geometría de los pliegues

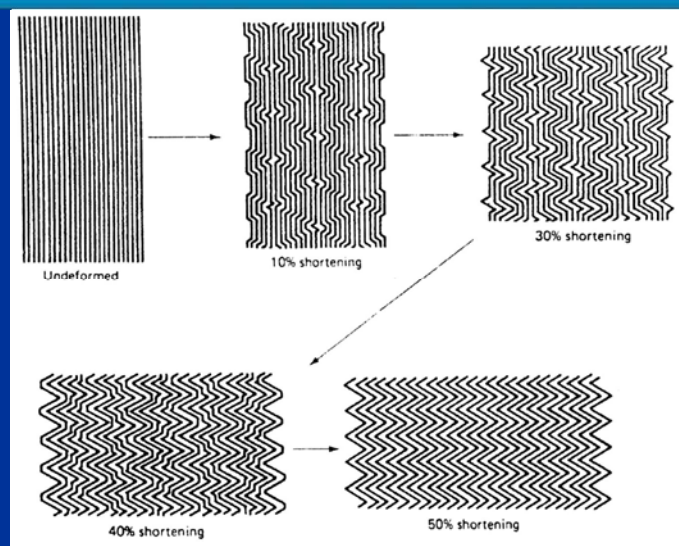


Formación Asmari (Irán)

The diagram shows three models of fold formation:

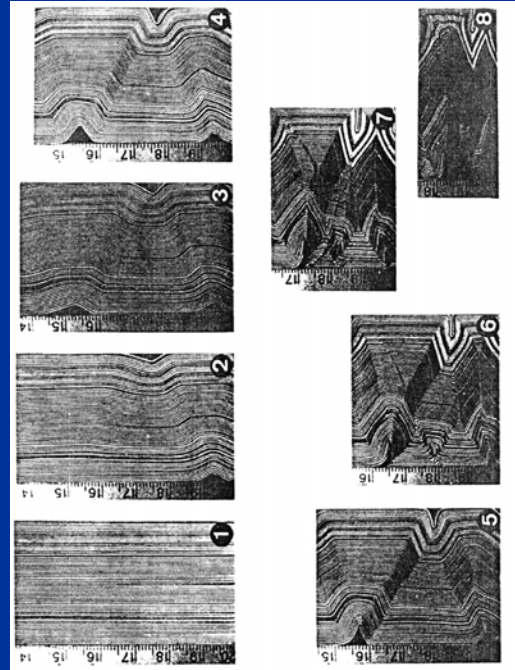
- Model A:** μ_1/μ_2 low, n high. Shows a layered material with low viscosity contrast and high number of layers. Under compression, it forms broad, rounded folds. Parameters: $W_1(1+\epsilon)$, λ low, ϵ high.
- Model B:** μ_1/μ_2 low, n moderate. Shows a layered material with low viscosity contrast and moderate number of layers. Under compression, it forms more frequent, sharper folds. Parameters: $W_1(1+\epsilon)$, λ moderate, ϵ moderate.
- Model C:** μ_1/μ_2 low, n low. Shows a layered material with low viscosity contrast and low number of layers. Under compression, it forms very sharp, narrow folds. Parameter: No characteristic W_1 .

Evolución mecánica de pliegues angulares desde kink bands hasta chevrones



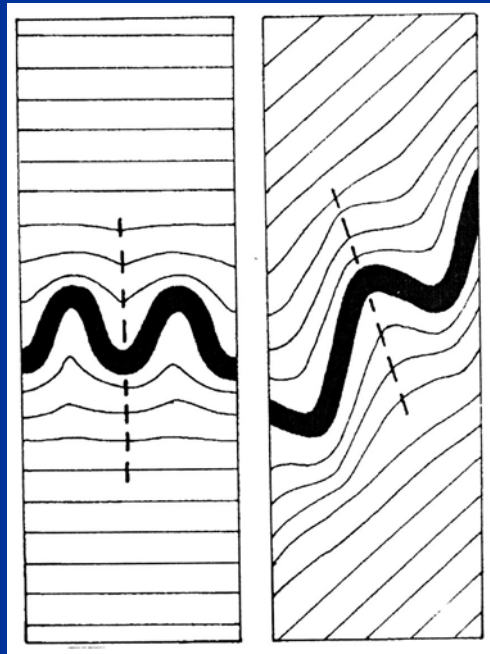
Experimento con tarjetas de cartón: Evolución desde kink a chevrón

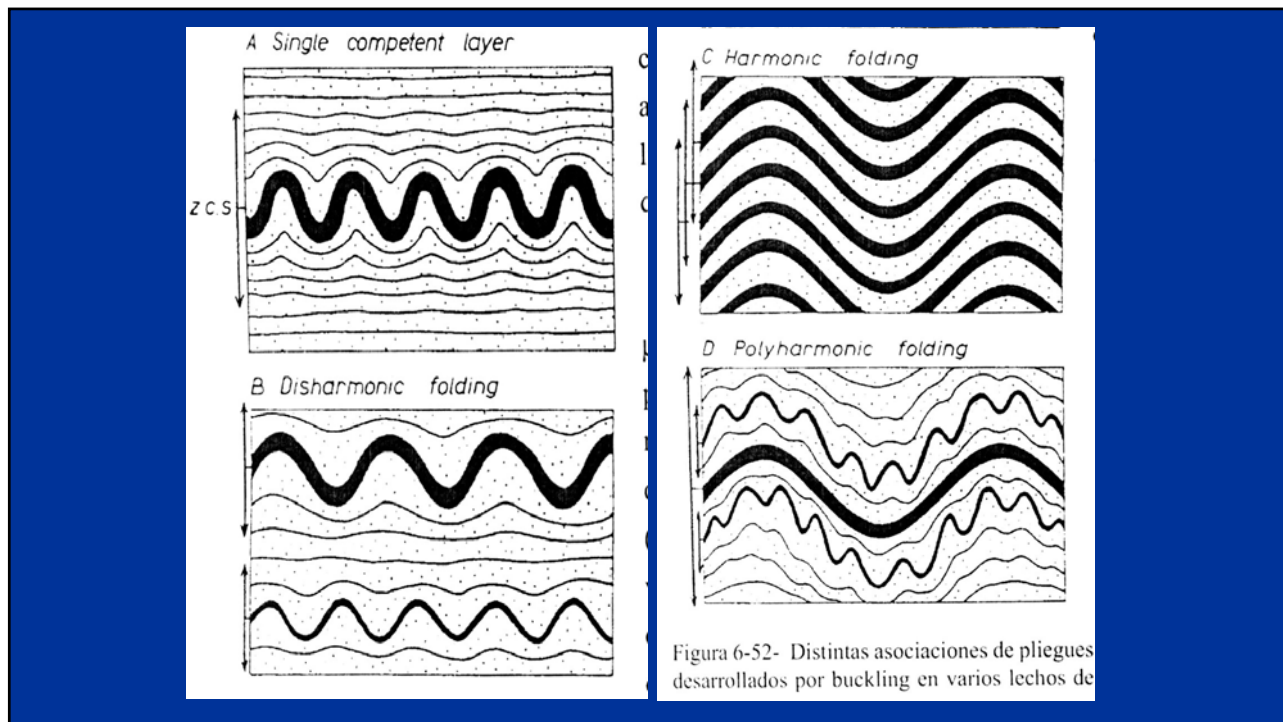
Millook Cliffs (Gales, GB)



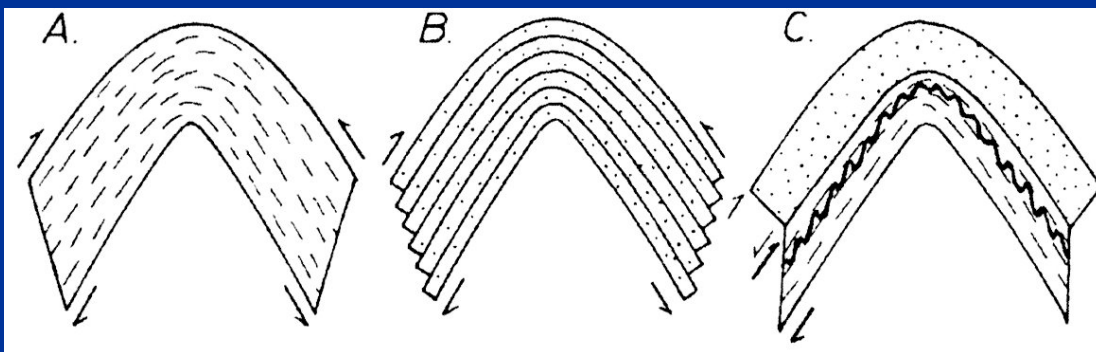
Relación del plano axial de pliegues desarrollados por pandeo con el ángulo inicial entre las capas y la dirección de máximo acortamiento:

Oblicuidad máxima: 20°





Combinación cizalla simple con flexo-deslizamiento



- Cizalla simple de las capas incompetentes en los flancos (A y C).
- Flexo-fluencia entre capas adyacentes (B).

Pliegues pasivos vs. activos

- **Activos:**
 - Aquellos en los cuales las capas que se pliegan controlan la curvatura y el deslizamiento se efectúa por flexura entre capas.
- **Pasivos:**
 - Aquellos en los cuales las capas ya no controlan ni la curvatura, ni el deslizamiento, el cual pasa a depender de la foliación por flexo-fluencia o flujo inhomogéneo.

Flujo inhomogéneo



Refracción de foliación

f.n.p. puntos sin
deformación
finita

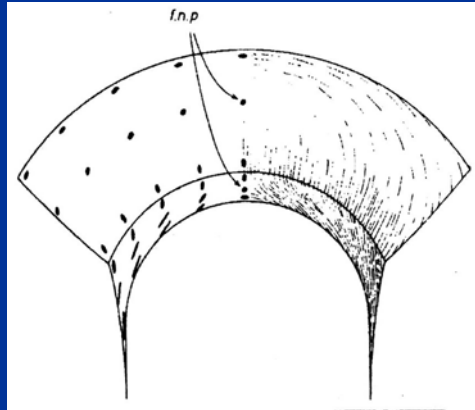


Figura 6-65- Desarrollo de clivaje en un pliegue formado por una capa competente (arriba) y otra incompetente (debajo). f.n.p. son los puntos sin deformación finita, llamados neutros.

Abanicos de foliación

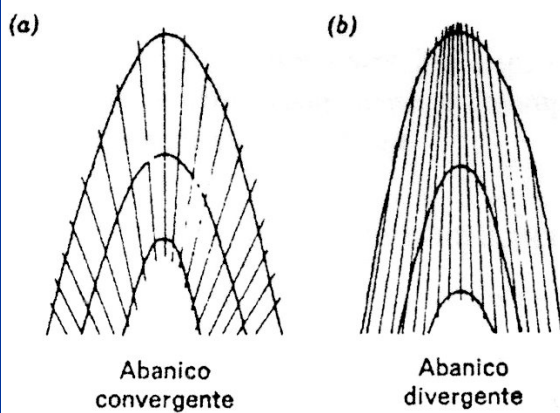
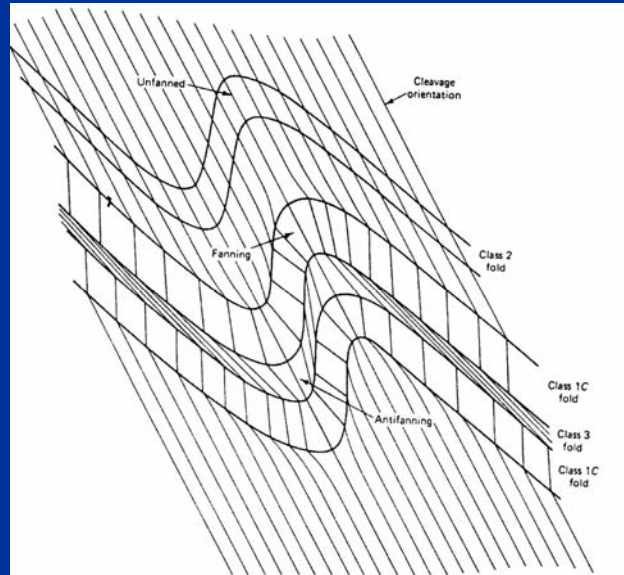


Figura 6-67- Abanico convergente y embudo o abanico divergente en capas competentes e incompetentes respectivamente.



Grados de engrosamiento de charnela según penetratividad de foliación

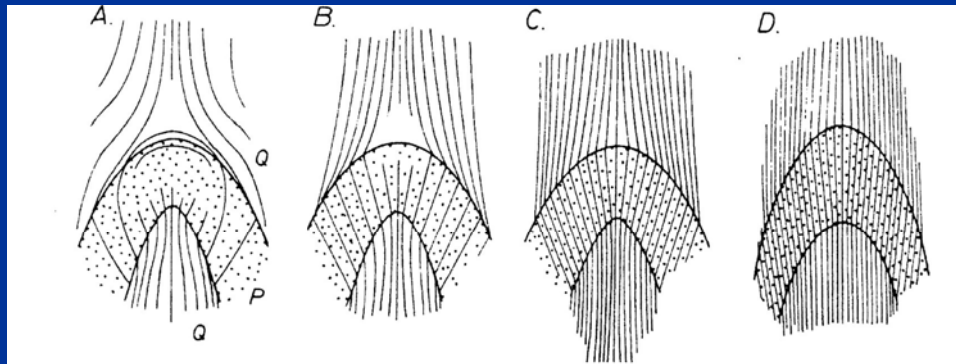


Figura 6-68- Patrones de clivaje en la charnela de pliegues con distintos grados de engrosamiento de la capa competente (a puntos).

Relación con elipsoides de deformación

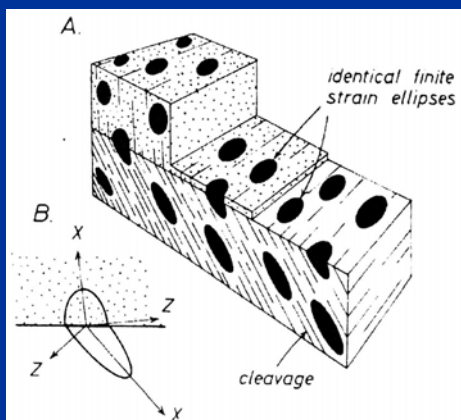


Figura 6-69- Relaciones entre los elipsoides de deformación de capas competentes e incompetentes en el caso de refracción del clivaje.

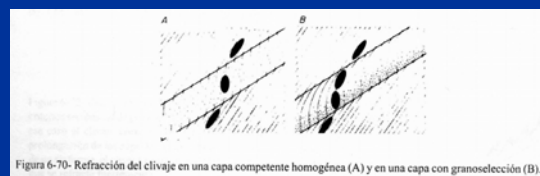
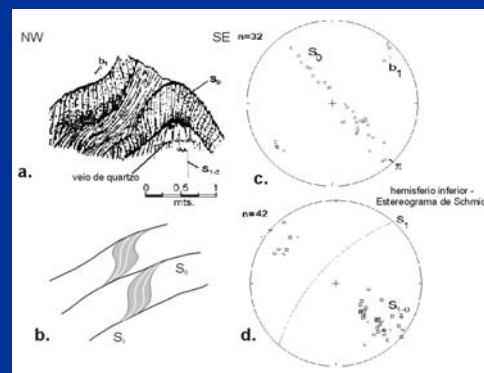
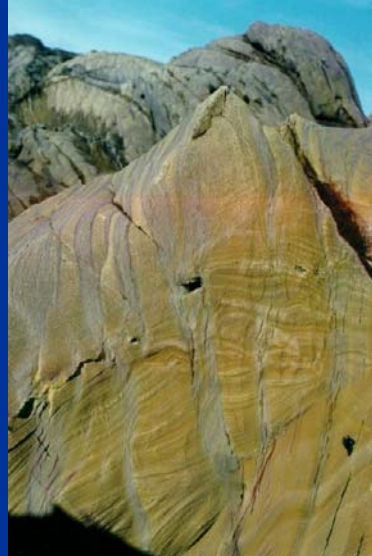


Figura 6-70- Refracción del clivaje en una capa competente homogénea (A) y en una capa con granoselección (B).



Ejemplo: La Paloma



Pliegues recumbentes con foliación

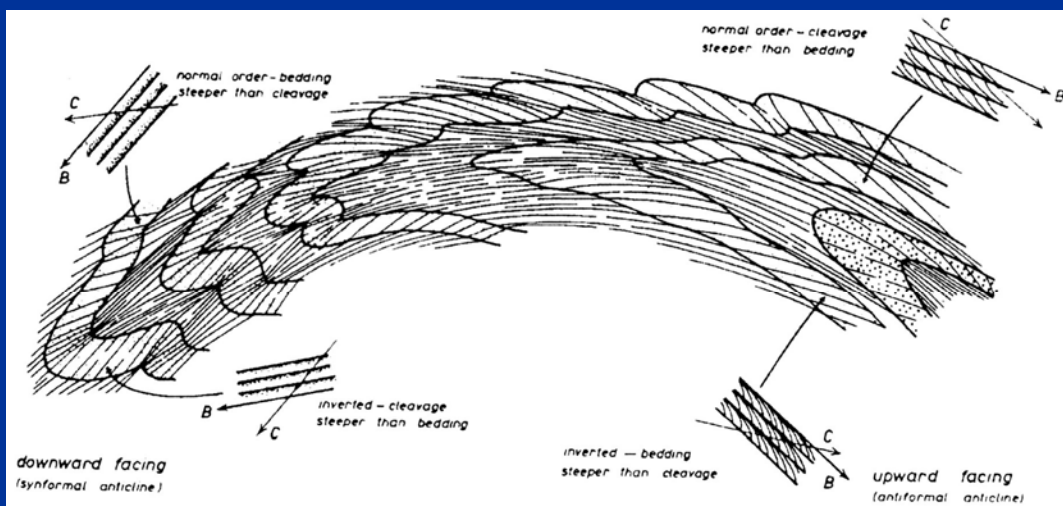


Figura 6-73- Relaciones entre el clivaje y la estratificación en un pliegue recumbente replgado.

Polaridades estratigráfica y tectónica

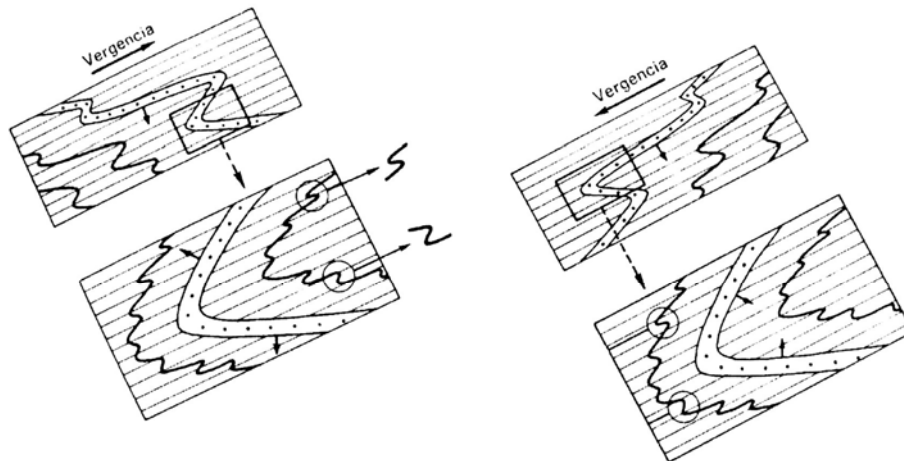


Figura 6-74- Dos casos en los que puede comprobarse que conociendo dos de las tres variables, vergencia regional, polaridad estratigráfica y polaridad tectónica, puede deducirse la tercera. Las flechas pequeñas señalan el muro de la capa de arenisca.

Interferencia de tipo 3 y recorte entre foliaciones

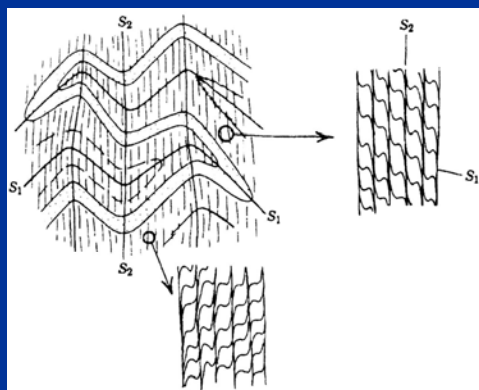
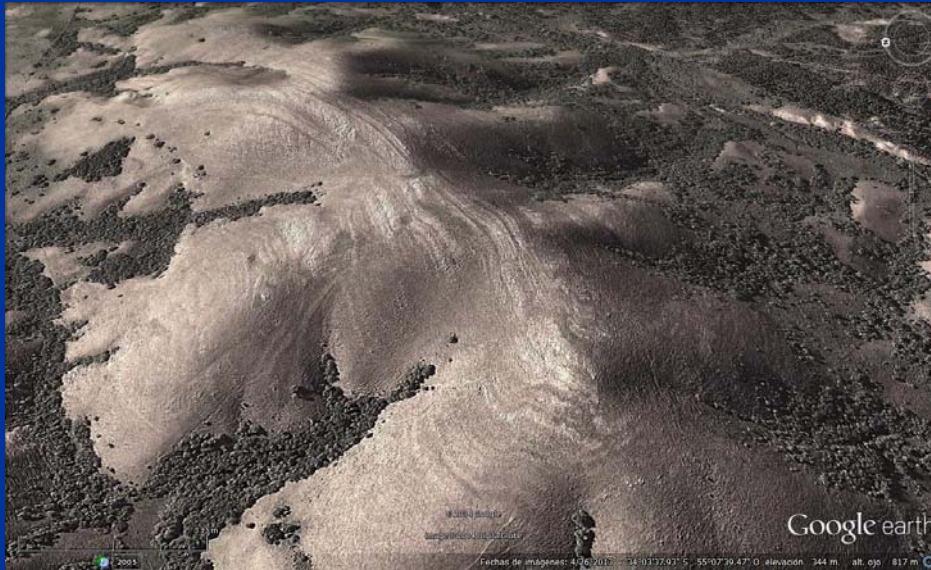


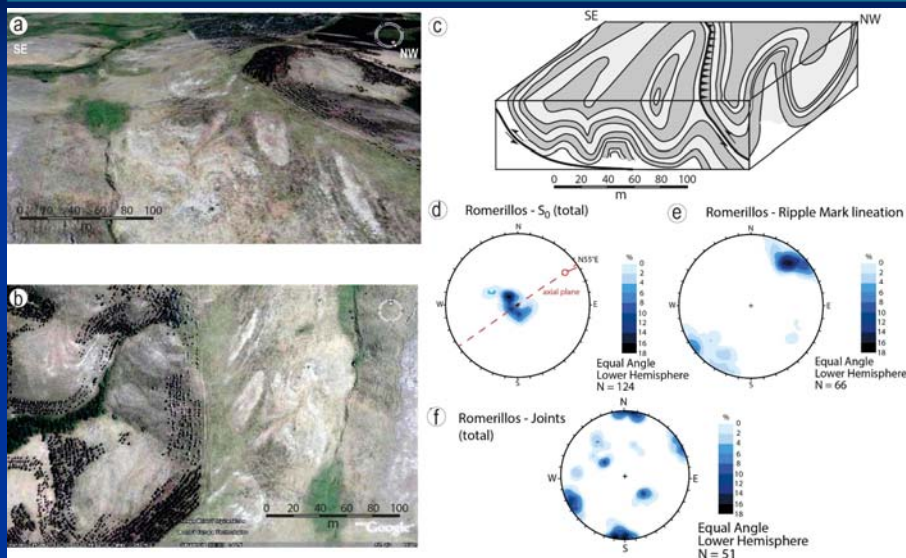
Figura 6-75- Interferencia de plegamiento de tipo 3 de Ramsay mostrando las relaciones entre dos clivajes desarrollados en dos flancos de un pliegue de la segunda fase.



Cerro Sepultura



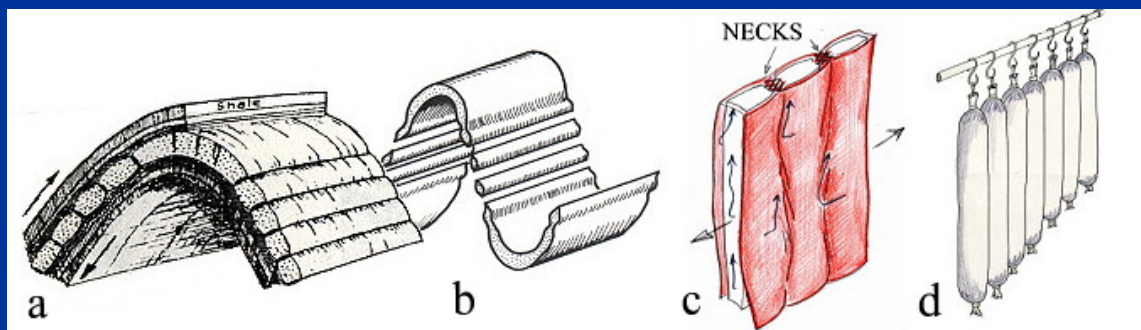
Cuarcitas de Los Romerillos



Boudinage



Origen francés: Boudins



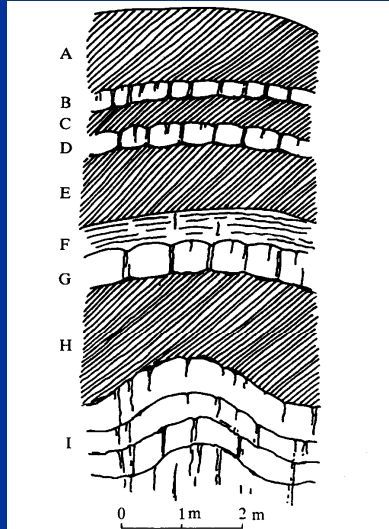


Fig. 16.1. The original boudins described by Lohest in 1909. The boudins are formed in the sandstone beds (unornamented) by layer-normal compression and are separated from each other by quartz veins. (The sandstones have subsequently been folded by layer-parallel compression.) The shale beds. A, C, E and H are cleaved but the cleavage does not seem to be related to either the layer-normal or layer-parallel compression.

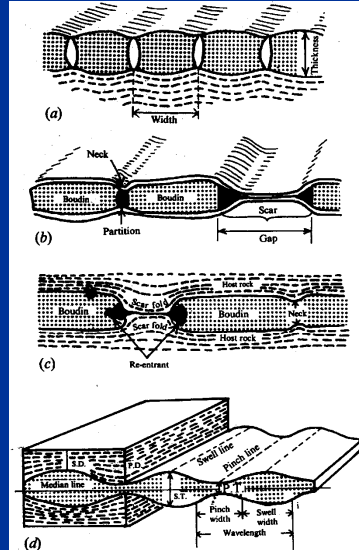


Fig. 16.2. (a)-(c) Terminology used to describe boudins. (After Wegmann, 1932; Jones, 1959; and Wilson, 1961.) (d) Terminology used to describe pinch-and-swell structures. S.T. and S.D. are swell thickness and swell disturbance and P.T. and P.D. pinch thickness and pinch disturbance. *i* denotes an inflection point. (After Penge, 1976.)

Elementos geométricos de los *boudins*

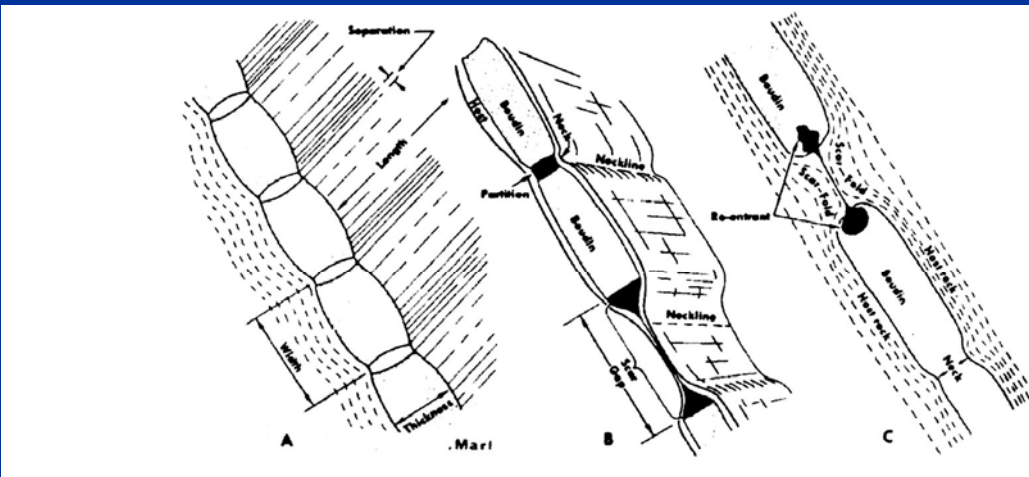
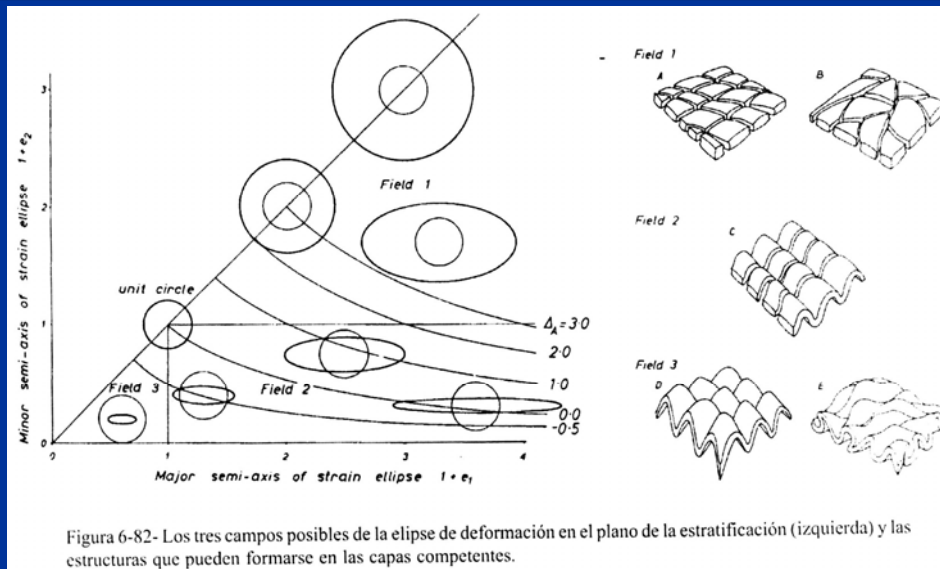


Figura 6-76- Elementos geométricos de los *boudins*.

Campos de deformación en la estratificación



Boudinage en “tableta de chocolate”



Relaciones entre pliegues y boudins

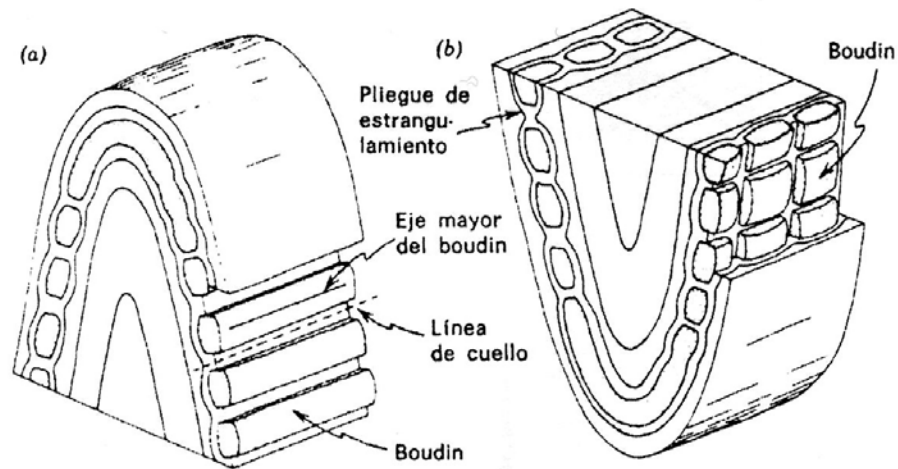


Figura 6-83- Relaciones posibles de los *boudins* con los pliegues.

Capas plegadas - budinadas

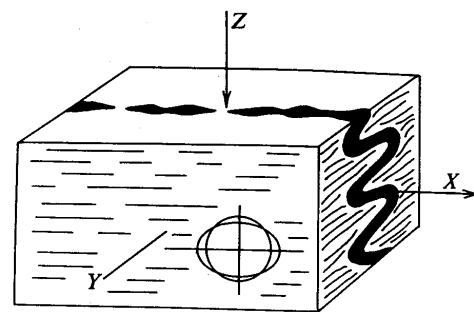
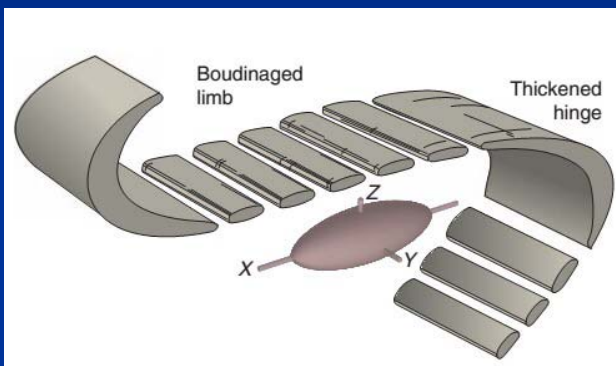


Fig. 16.45. Folds and boudins (pinch-and-swell structures) produced simultaneously in a relatively competent layer in a less competent block of material deformed by pure shear. X = maximum extension; Y = zero strain; Z = maximum contraction. The axes of principal stress coincide with those of principal strain. (After Ramberg, 1959.)



Formación de boudins en deformación rotacional

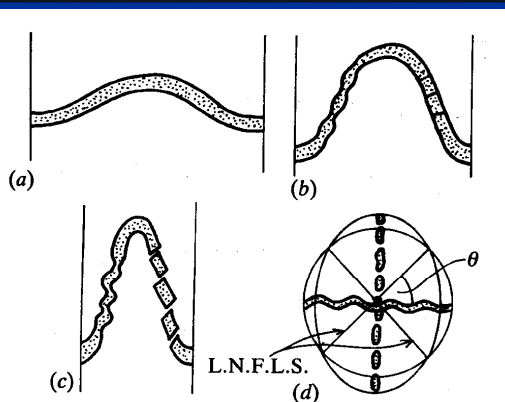


Fig. 16.46. (a)–(c) Various stages in the amplification of a fold and the formation of boudins or pinch-and-swell structures on the limbs as they rotate into the finite extension field. (d) Circle representing the undeformed state and the ellipse represents the strain ellipse. L.N.F.L.S. = lines of no finite longitudinal strain.

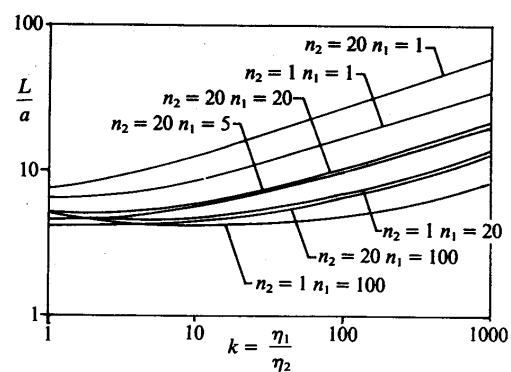
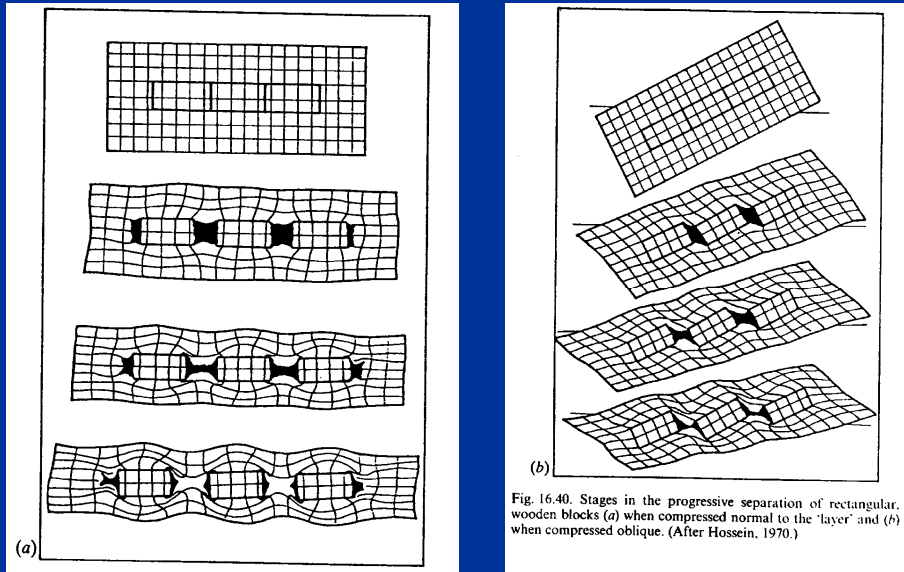


Fig. 16.29. Plot of dominant wavelength/thickness ratio (L/a) for folds and pinch-and-swell structures against viscosity ratio (k) between layer and matrix for various non-linear materials. If the materials are power-law materials, then n_1 and n_2 are the stress exponents of the layer and matrix respectively. Only strain-rate softening materials ($n > 1$) are shown. (After Smith, 1977.)

Etapas de desarrollo de *boudinage* asimétrico: Indicador cinemático

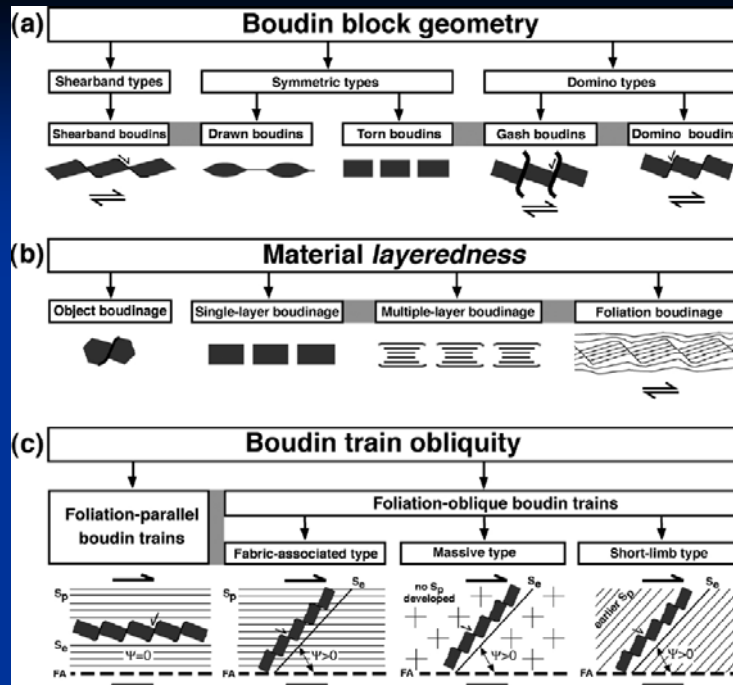
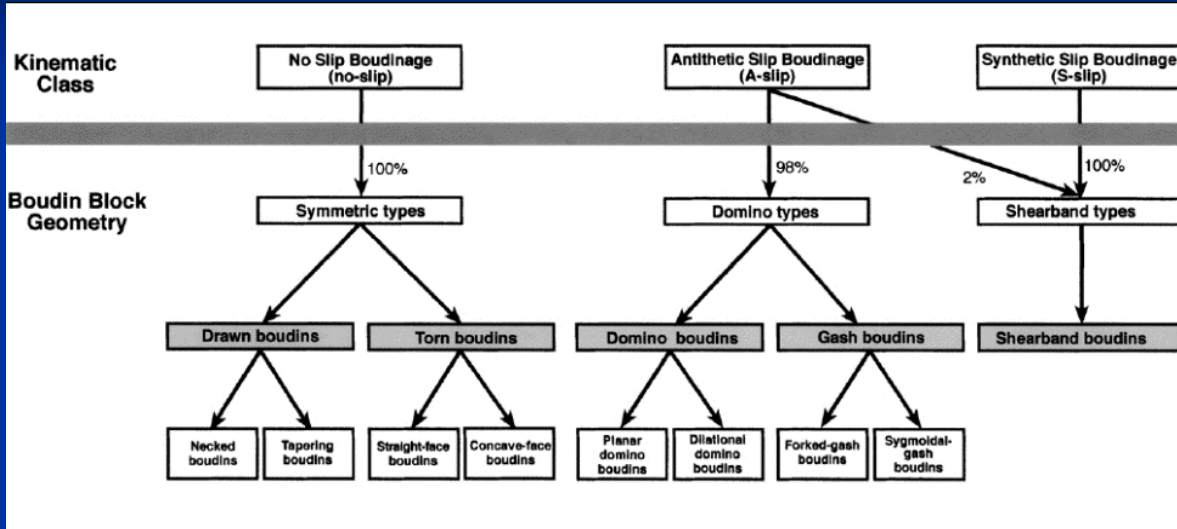


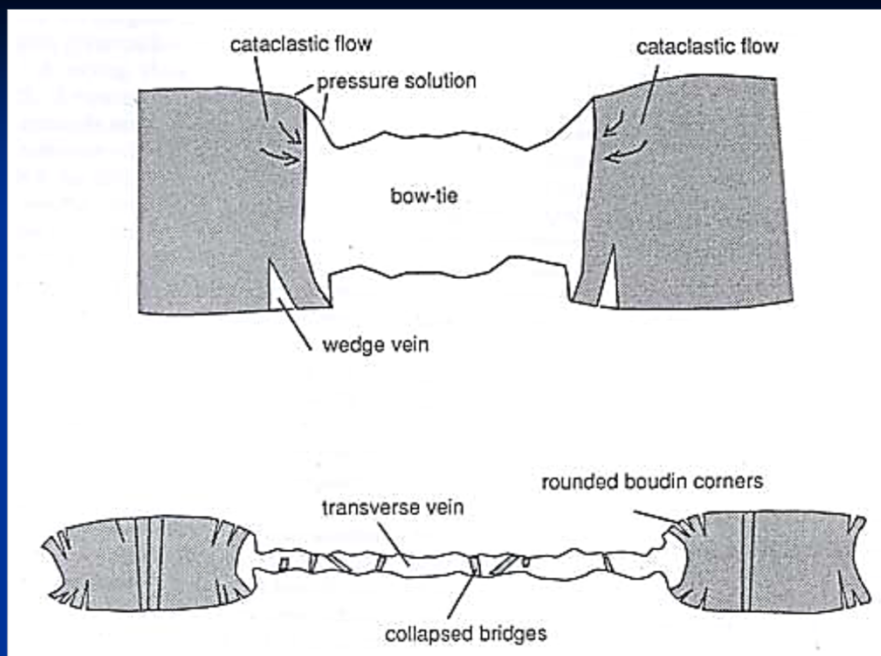
Boudinage de tipo "nudo de corbata" asimétrico

Cantera Libro
Gigante,
Lavalleja



Clases cinemáticas de boudinage



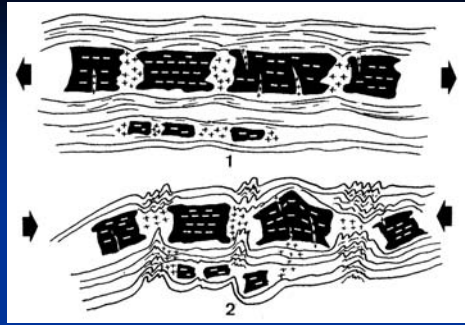


Boudinage "Bow-Tie" en mármoles

Mármoles
de Polanco



Boudins Plegados (varios)



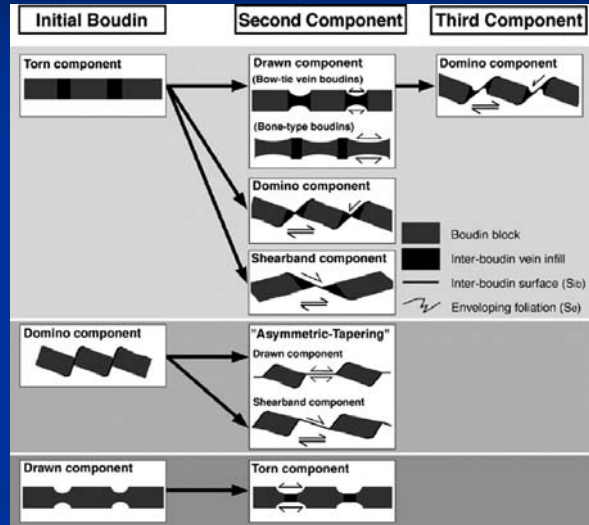
Boudinage asimétrico con deslizamiento

Boudins within shear band reflecting shear direction



Evolución de la forma del boudin

- Componentes cinemáticas que condicionan el resultado final de los boudins: **Con o sin rasgado**.
- Segunda componente: **Con o sin cizalla**.
- Tercera componente: **Con rotación**



Boudinage de foliación

Gneises
Cerro Olivo



Drawn Boudins

Caledonides
Noruega



Boudinage asimétrico con deslizamiento por falla

Rodopé
Bulgaria



Boudinage múltiple

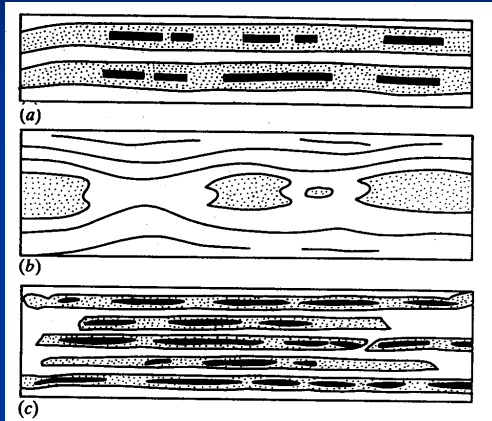


Fig. 16.10. Sections of compressed cakes of putty simulating incompetent rocks and Plasticine or cheese simulating competent rocks. In (a) the boudin layer is cheese and in (b) and (c) Plasticine. (After Ramberg, 1955.)



Luontokuva
(Finlandia)

Boudinage múltiple de tipo "Barril"



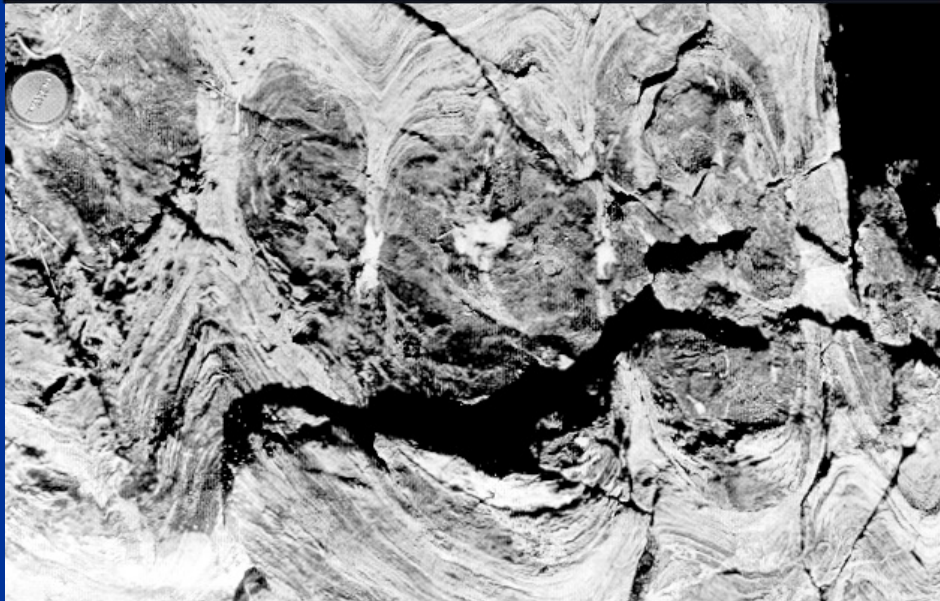
Mármol Artigas
Maldonado

Boudinage de tipo "barril" con desplazamiento

Pajas Blancas
Montevideo



Inversión tectónica: Budines acortados



Estratos boudinados, luego plegados

St Suliac
(Bretaña)
Francia



Glaucofanitas boudinadas en Isla de Groix



Conclusiones

- **Pliegues y boudinage son a la vez:**
 - Excelentes indicadores de deformación por acortamiento y extensión respectivamente.
 - Excelentes indicadores de contraste en las propiedades mecánicas de las rocas, siendo un indicador **paleopiezométrico** y **paleotermométrico**.
- **Boudinage puede registrar:**
 - **Inversión tectónica** por acortamiento posterior, lo cual indica posible **rotación** de la estructura respecto del **elipsoide de deformación finita**.
 - **Asimetría** y oblicuidad respecto del **eje de estiramiento instantáneo**, lo que es sintomático de una componente de **cizallamiento simple**.