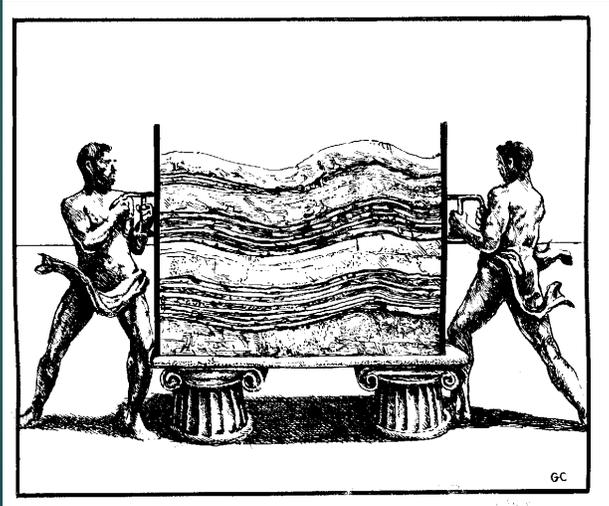


## 2. Esfuerzo y Deformación



### Fuerza

- Magnitud vectorial que produce:
  - Cambio en el movimiento de un cuerpo (desplazamiento).
  - Cambio de forma de un cuerpo (deformación interna).
- Se combinan varias fuerzas en una resultante.
- Se descompone en componentes.

## Tipos de fuerza

- ▶ **Fuerzas de cuerpo**
  - ▶ En relación directa con la masa (gravedad o peso, centrífuga, magnética).
- ▶ **Fuerzas de superficie**
  - ▶ Causas externas al cuerpo y aplicadas a una superficie del cuerpo (**fuerzas tectónicas**).

## Fuerzas de cuerpo

- ▶ Sólo la **gravedad** es significativa en geología.
- ▶ Las **fuerzas de cuerpo** pueden estar al inicio del desarrollo de **fuerzas de superficie**:
  - ▶ Deslizamientos de tierra
  - ▶ Impacto de meteoritos

## Fuerzas de superficie

- ▶ Dependেন siempre de *causas externas* al cuerpo
- ▶ *No tienen relación con la masa* del mismo
- ▶ Se aplican directamente a una *superficie* del cuerpo
- ▶ *Fuerzas de superficie:*
  - ▶ Simple → movimiento del cuerpo
  - ▶ Compuestas → distorsión del cuerpo (cambio de forma)

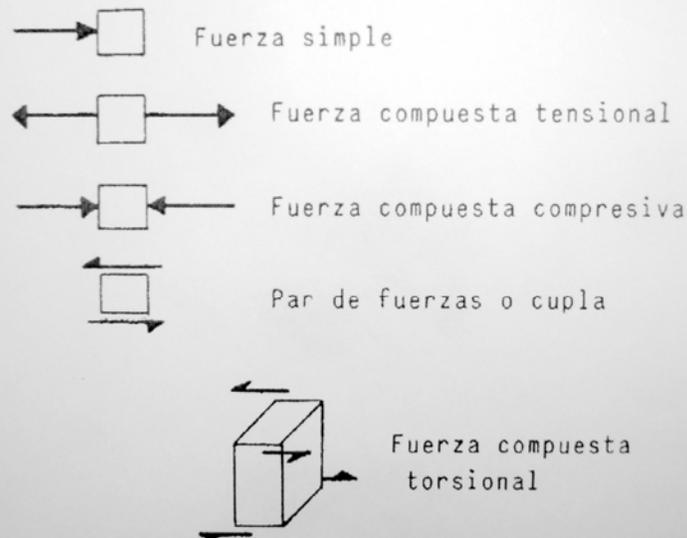


Figura 1-1- Tipos de fuerzas de superficie.

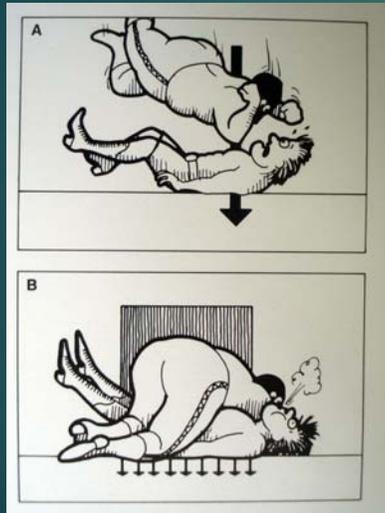
## Unidades de medida

- ▶  $F = m \cdot a$  (Primera Ley de Newton)
- ▶  $m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2$  (Segunda Ley de Newton)
- ▶ Unidad de masa: gramo o kilogramo
- ▶ **Unidad de fuerza:**
  - ▶ La necesaria para que una masa unidad adquiriera una aceleración igual a una unidad de longitud por cada unidad del tiempo al cuadrado
  - ▶ cegesimal: dina ( $1 \text{ dina} = 1 \text{ gr} \cdot \text{cm} / \text{seg}^2$ )
  - ▶ Internacional: newton ( $1 \text{ newton} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{seg}^2$ )
- ▶  $1 \text{ Newton} = 10^5 \text{ dinas}$

## Esfuerzo

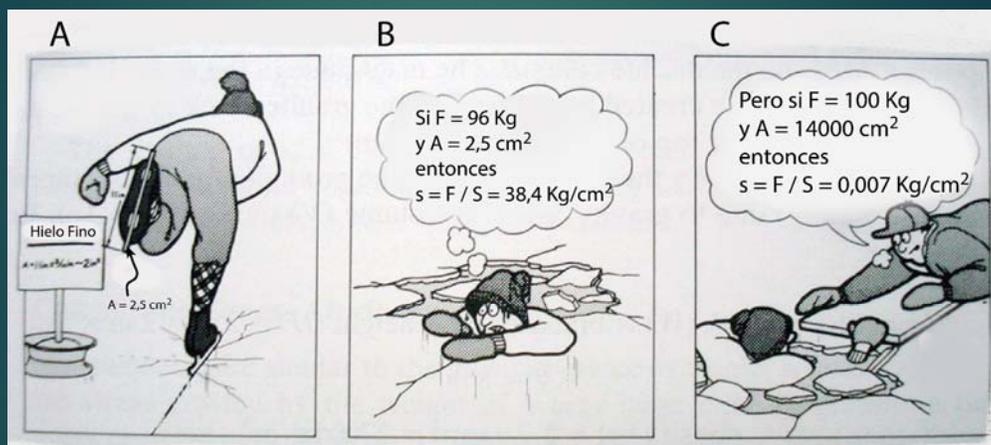
- ▶ **Esfuerzo (stress):**
  - ▶ Fuerza aplicada sobre una superficie del cuerpo
  - ▶ Repartición de la fuerza sobre la superficie en la cual se aplica.
- ▶ **Fuerza aplicada a un cuerpo:** Es la misma con independencia de la superficie del mismo sobre la cual se aplica.
- ▶ Por descomposición vectorial, se aplica a **todas las superficies** contenidas en el cuerpo aunque no genera el mismo esfuerzo en cada una.
- ▶ Al variar la superficie, varía la relación  $F / S$ .

## Aplicación a infinitas superficies

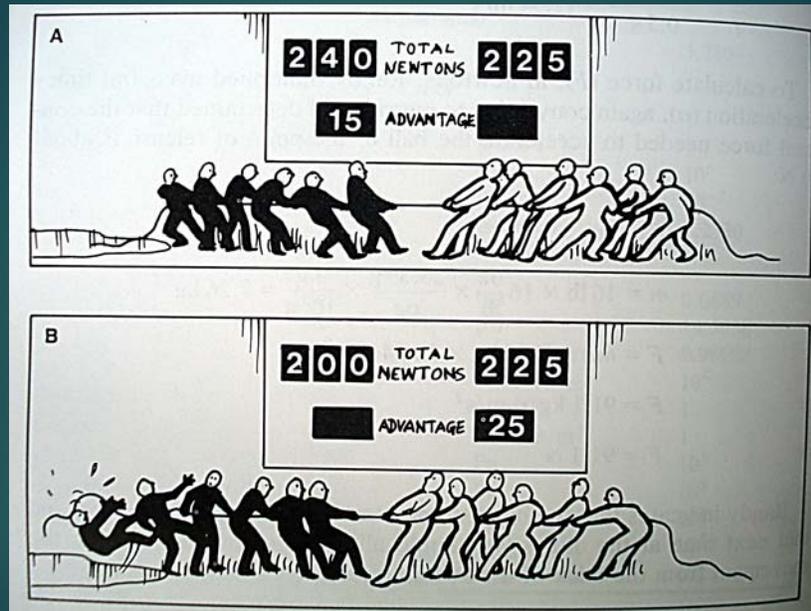


► El daño producido por el luchador que cae sobre el otro depende de la superficie de contacto entre ambos luchadores, o sea de la **superficie de aplicación de la fuerza**

## Ejemplo del esquiador sobre hielo



Una **mayor superficie** produce un **menor esfuerzo** en el hielo evitando el accidente



## Unidad de medida del esfuerzo: " $\sigma$ "

- ▶ **Sistema internacional:**
  - ▶ Pascal:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ Newton} / \text{m}^2$
- ▶ **Sistema cegesimal:**
  - ▶ Baria:  $1 \text{ Baria} = 1 \text{ dina} / \text{cm}^2$
  - ▶  $1 \text{ Bar} = 10^6 \text{ barias}$
  - ▶  $1 \text{ Kbar} = 10^3 \text{ bar}$

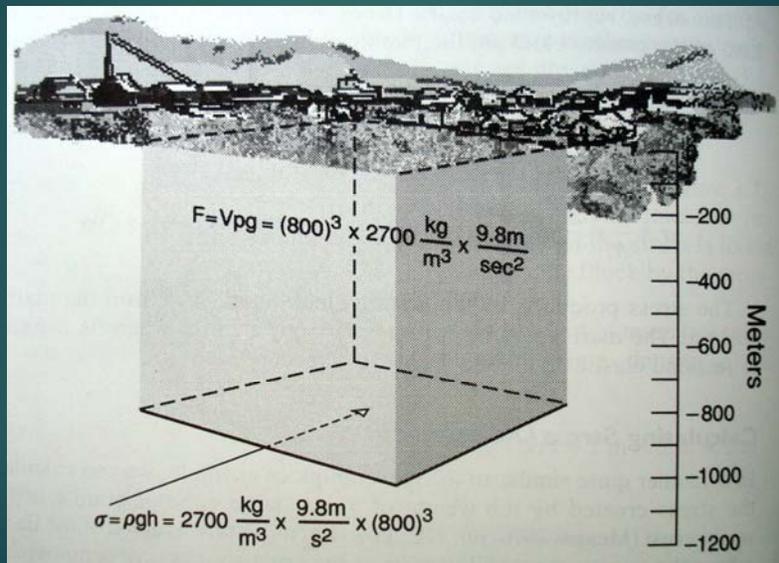
## Tipos de esfuerzo

- ▶ *Esfuerzos causados por fuerzas de cuerpo y superficie son diferentes.*
- ▶ *Gravedad:*
  - ▶ *Presión litostática (debida al peso de rocas que tiene encima:  $P_L = \rho \cdot g \cdot z$ )*
- ▶ *Fuerzas de superficie:*
  - ▶ *Descomposición vectorial*

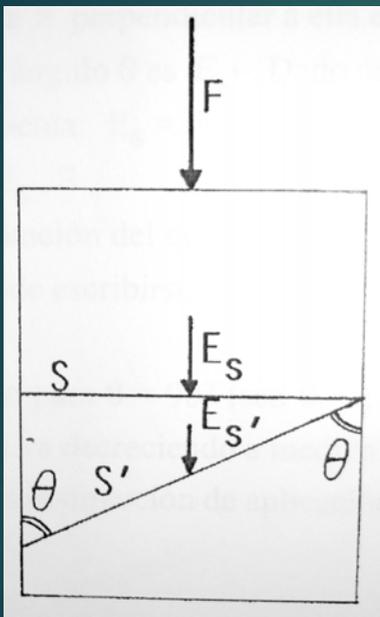
## Efecto de acción y reacción: tercera ley de Newton

- ▶ **Presión litostática** no suele ser de tipo hidrostático, salvo que las rocas se comporten como líquidos (caso de los magmas).
- ▶ Para cada **acción** (fuerza) existe una **reacción** igual en magnitud y dirección, de sentido contrario.
- ▶ Equivale a considerar el esfuerzo como causado por una **cupla de vectores** (tensionales o compresivos) actuando sobre una superficie.

## Presión litostática a P = 800 m



## Esfuerzo que actúa sobre una superficie inclinada



- ▶ La misma fuerza actuando sobre distintos planos crea distintos esfuerzos:

- ▶  $E_s = F / S$

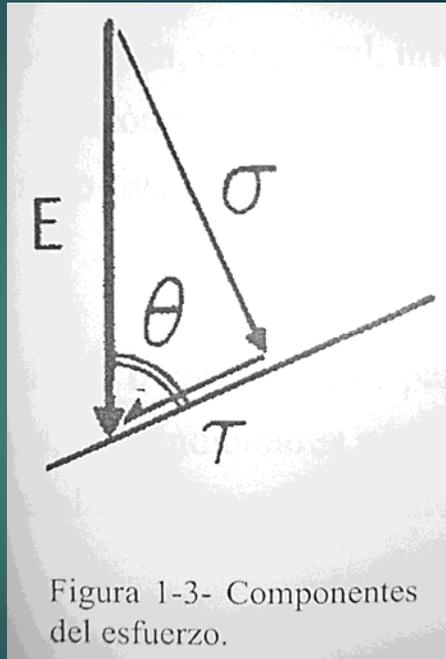
- ▶  $E_{s'} = E_s \cdot S / S'$

- ▶  $\text{Sen } \theta = S / S'$

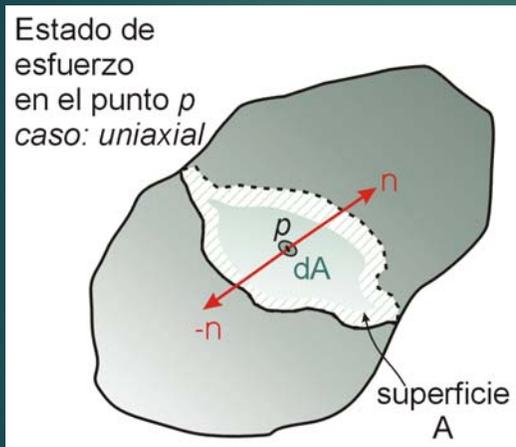
- ▶  $E_{s'} = E_s \cdot \text{Sen } \theta$

## Componentes vectoriales del esfuerzo en un plano

- ▶  $\sigma = E \cdot \text{sen } \theta$
- ▶  $\tau = E \cdot \text{cos } \theta$



## Estado de esfuerzo



- ▶ Conjunto de infinitos vectores que actúan sobre los infinitos planos **que pasan por un punto** en un instante dado.<sup>4</sup>
- ▶ **Infinitos vectores** = campo vectorial (tensor de segundo orden)

## Las 9 componentes de un estado de esfuerzo

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}, \quad \text{ó bien } \sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

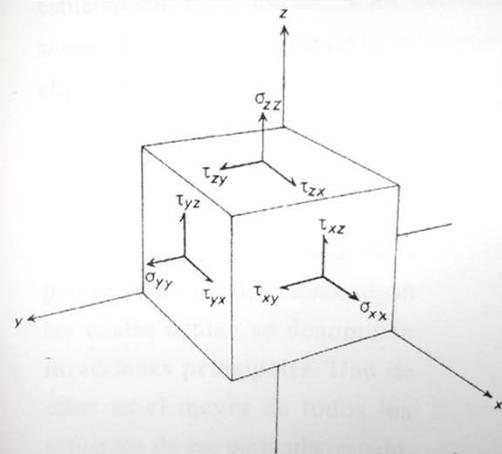
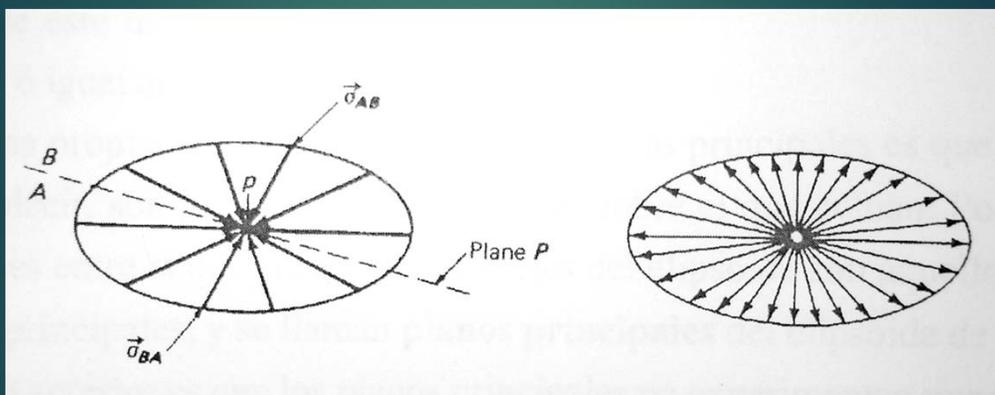


Figura 1-5- Las nueve componentes de un estado de esfuerzo.

**Elipses de esfuerzos (2D)** construidas con vectores que actúan sobre los infinitos planos que pasan por un punto en un instante dado.



## Esfuerzo en 3D

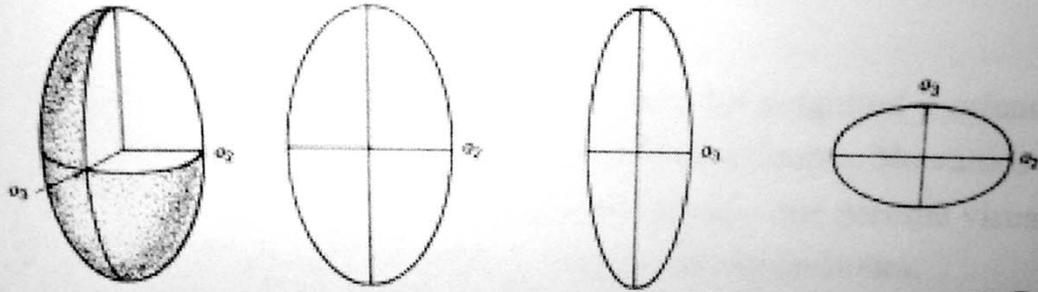
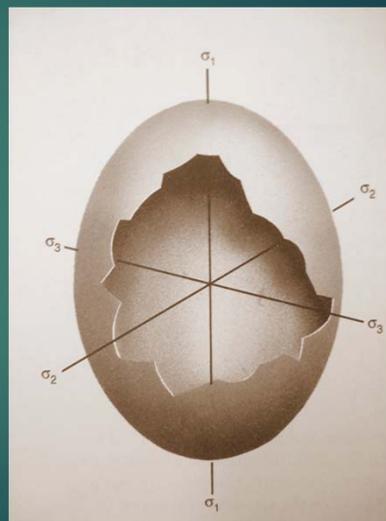


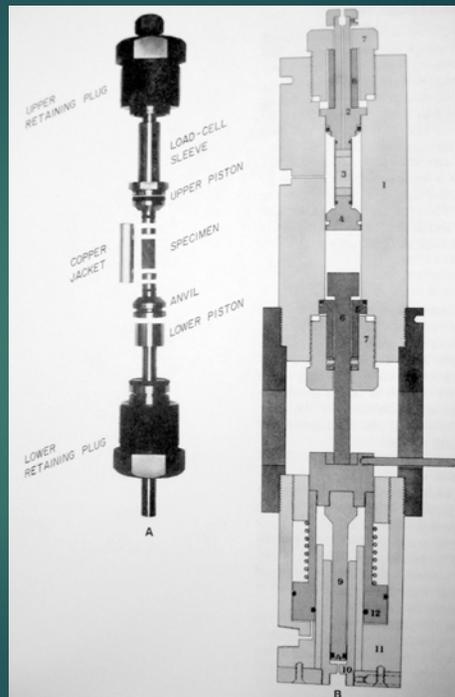
Figura 1-7- Un elipsoide de esfuerzo triaxial y sus planos principales

## Elipsoide de esfuerzo

- ▶ **Elipsoide triaxial** mostrando los ejes (esfuerzos principales):
- ▶ **Anisotropía poliaxial o triclínica.**



## Prensa triaxial



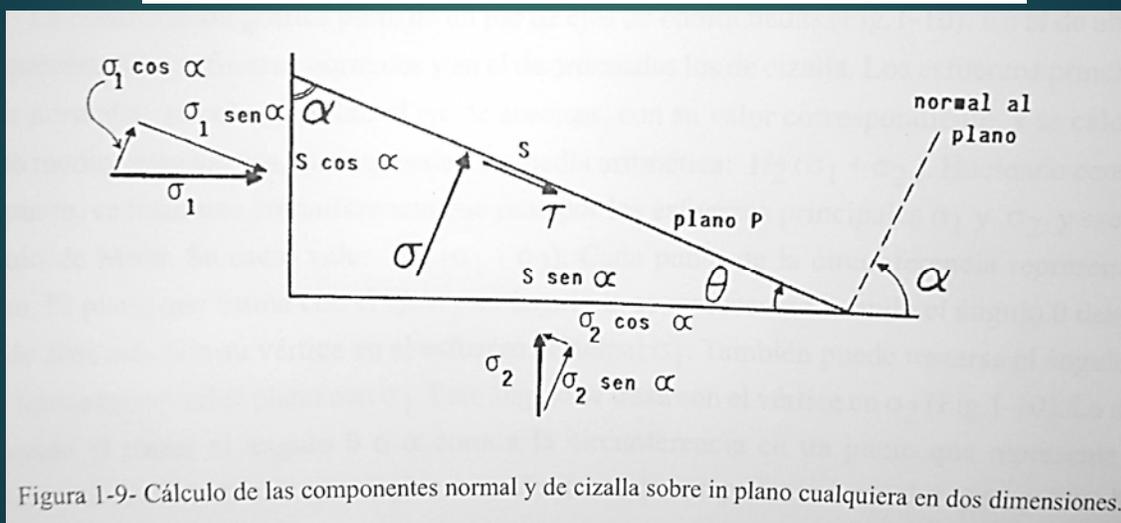
## Ensayos de compresión



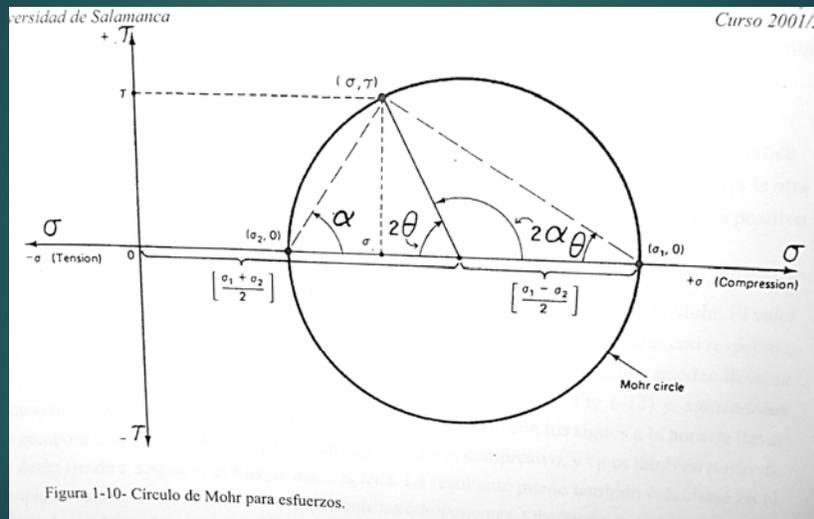
## Clases de anisotropía de esfuerzo

- ▶ **Uniaxial**
  - ▶ Sólo un esfuerzo principal
- ▶ **Biaxial**
  - ▶ 2 esfuerzos principales
- ▶ **Triaxial**
  - ▶ 3 esfuerzos principales
    - ▶ Poliaxial: si  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$
    - ▶ Axial: si  $\sigma_1 = \sigma_2$  o  $\sigma_2 = \sigma_3$
    - ▶ Hidrostático: si  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$

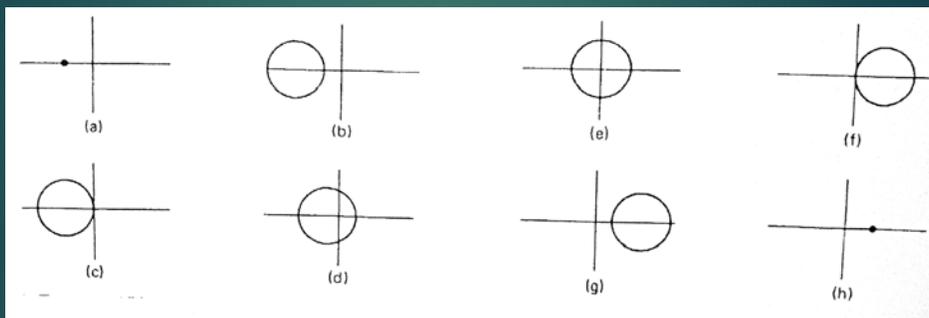
## Componentes de esfuerzo sobre P



## Círculo de Mohr para esfuerzos



## Representación 'Mohr' para diversos estados de esfuerzo



Representación de diversos estados de esfuerzo 2D, utilizando el círculo de Mohr: a. tensión hidrostática, b. tensión general, c. tensión uniaxial, d. Tensión y compresión, e. cizallamiento puro, f. compresión uniaxial, g. Compresión general, h. compresión hidrostática.

## Deformación

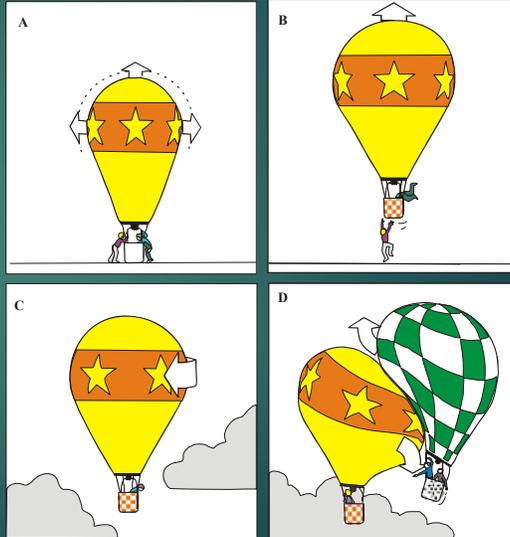
- ▶ Componentes
- ▶ Frágil y dúctil
- ▶ Homogénea y heterogénea
- ▶ Longitudinal y angular
- ▶ Con o sin rotación interna
- ▶ Finita e infinitesimal
- ▶ Progresiva

## ¿Qué es la deformación?

- ▶ Es el **proceso físico** responsable de cualquier **cambio en la posición** o **relaciones geométricas internas** sufridos por un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un **campo de esfuerzos**.

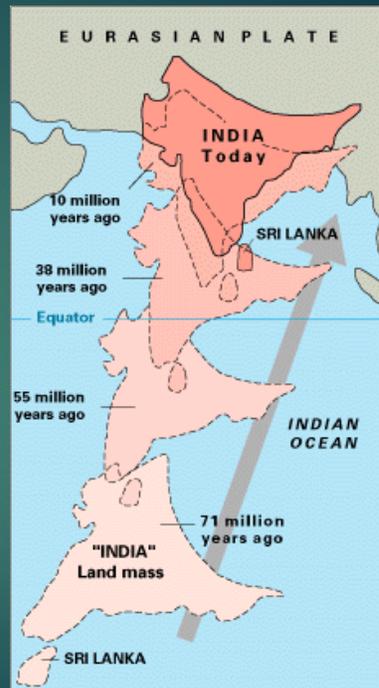
## Componentes de la deformación

- ▶ **Dilatación**
  - ▶ cambio de volumen
- ▶ **Traslación**
  - ▶ cambio de posición
- ▶ **Rotación**
  - ▶ cambio de orientación
- ▶ **Distorsión**
  - ▶ cambio de forma

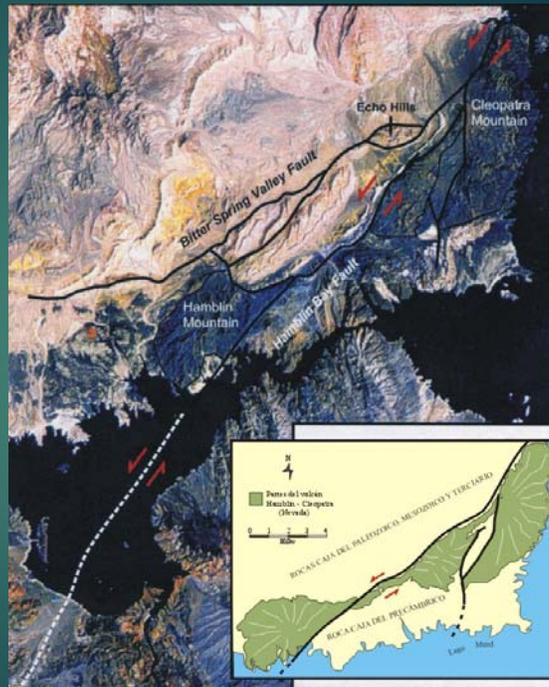


## Traslación

- ▶ Desplazamiento de un microcontinente (India)

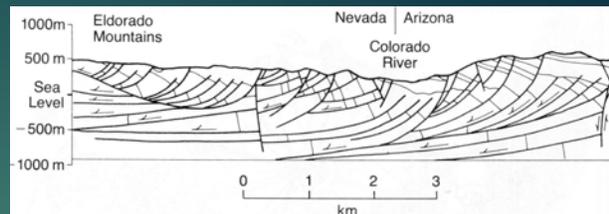


- ▶ Volcán cortado por falla en dirección
- ▶ Sentido de desplazamiento (sinistral)
- ▶ Rechazo horizontal medible

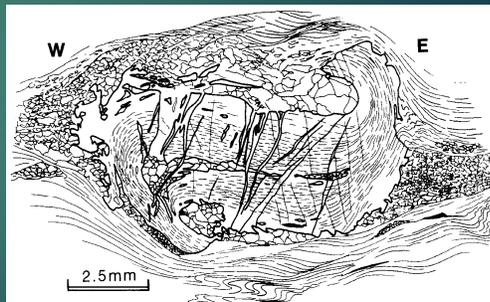


## Rotación

- ▶ **Fallas lístricas** (e.g. Rocosas):
  - ▶ Rotación descentrada
- ▶ **Granates:**
  - ▶ Rotación rígida por espín (≠ por vorticidad)



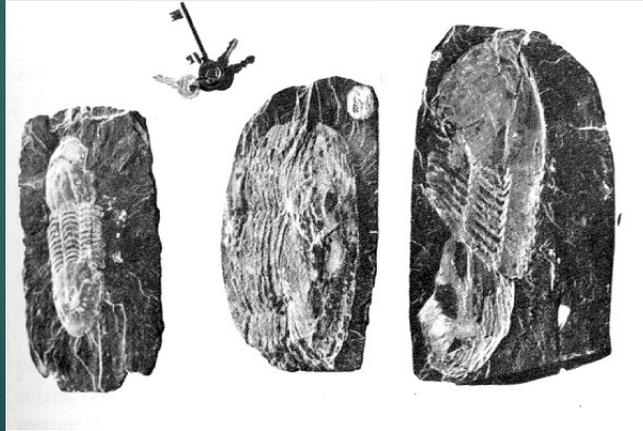
**Figure 2.22** Listric normal faulting in the Lake Mead region. Tertiary and Precambrian rocks are rotated to steep dips along curved faults. [From Anderson (1971). Courtesy of United States Geological Survey.]



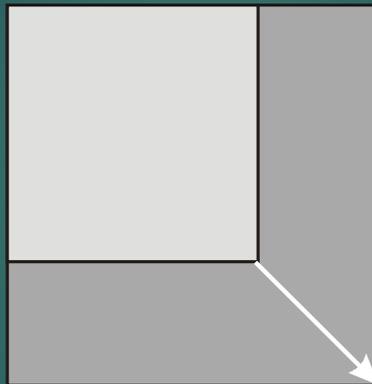
**Figure 2.24** Detailed drawing of a spiral garnet in metamorphic rock collected in the Caledonides of south Norway. [Reprinted with permission from *Journal of Structural Geology*, v. 14, Fossen (1992), Elsevier Science, Ltd., Pergamon Imprint, Oxford, England.]

## Deformación interna (*Strain*)

- ▶ Cambio de forma: **distorsión**
- ▶ Cambio de volumen: **dilatación**

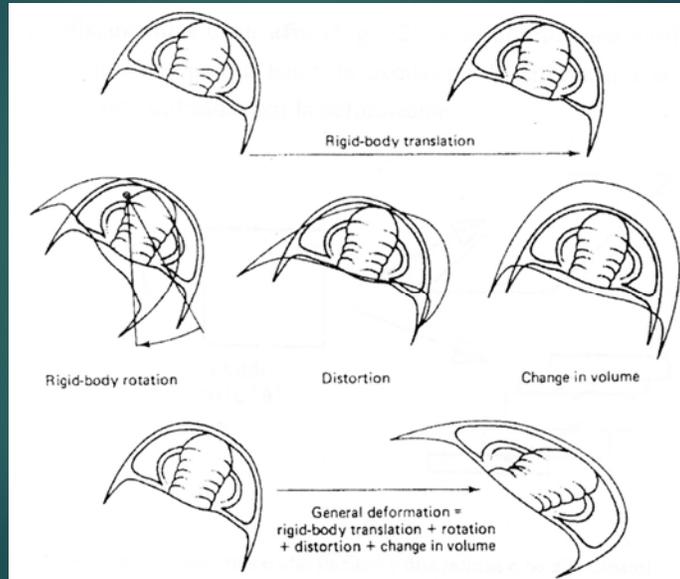


## Cambio de volumen (dilatación)

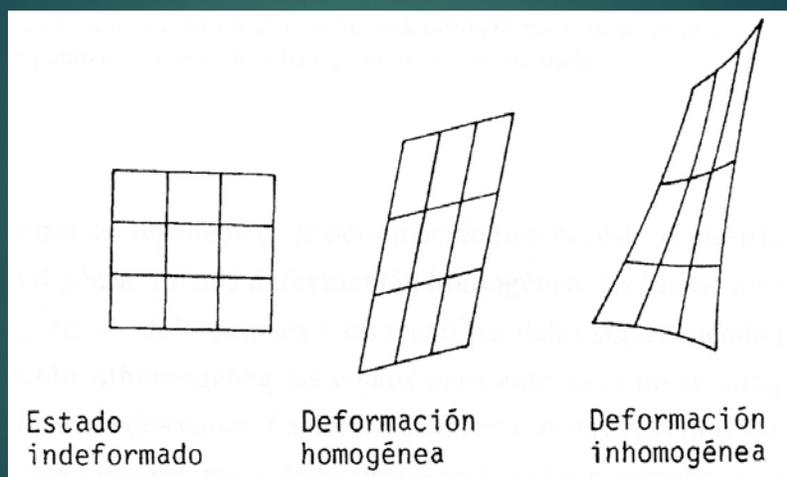


$$\text{Dilatación: } \Delta = \frac{(V_f - V_i)}{V_i}$$

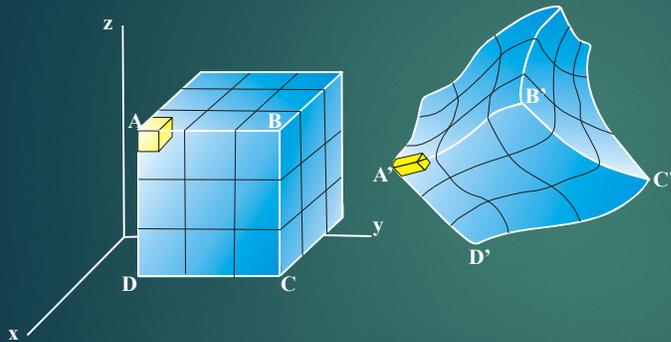
## Distorsión y deformación general



## Deformación homogénea

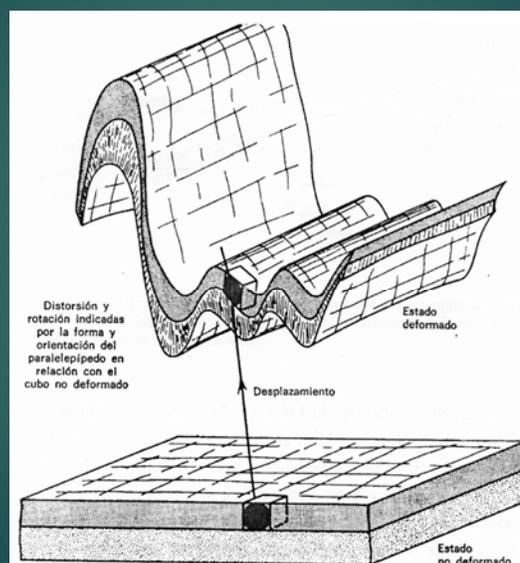


## Homogeneidad en 3-D

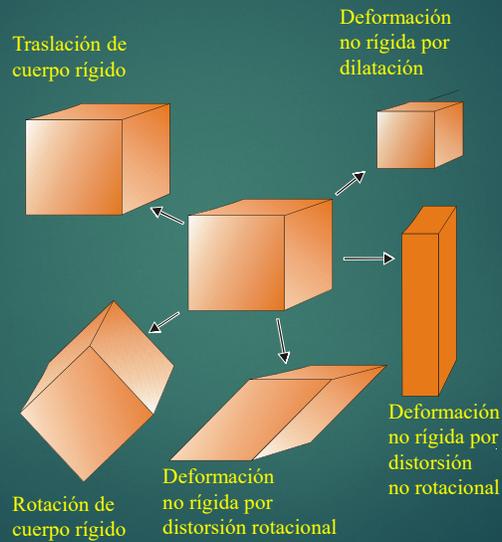


- ▶ **Homogénea:**
  - ▶ líneas rectas permanecen rectas
  - ▶ Líneas paralelas permanecen paralelas
- ▶ **Heterogénea:**
  - ▶ Lo contrario

## Ejemplo geológico



## Cambio de forma y simetría



## Deformación homogénea en 2D

- ▶ Líneas rectas permanecen rectas.
- ▶ Líneas paralelas permanecen paralelas.
- ▶ Un círculo se transforma en una elipse (elipse de *strain*).
- ▶ Pero:
  - ▶ Largo de una línea cambia
  - ▶ Ángulo entre dos líneas cambia.

## Campo de desplazamiento

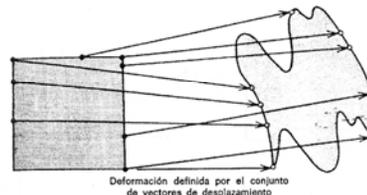
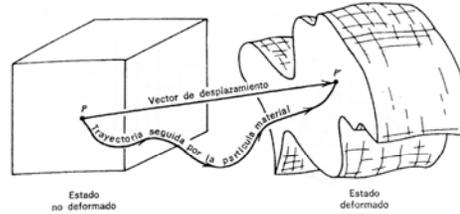
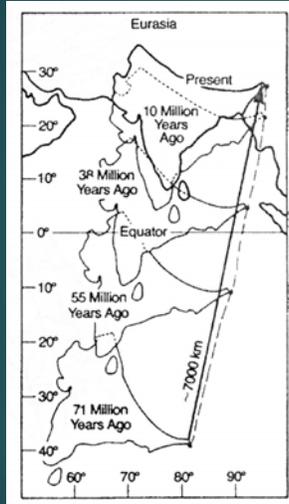
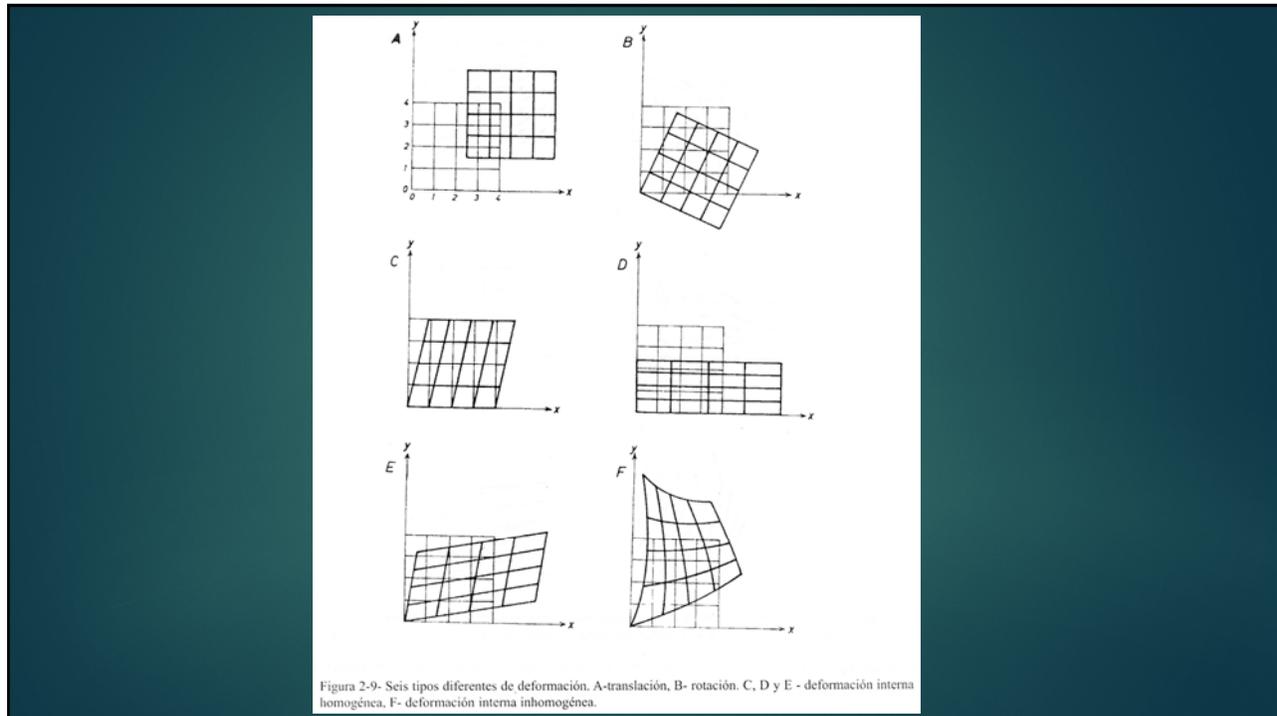


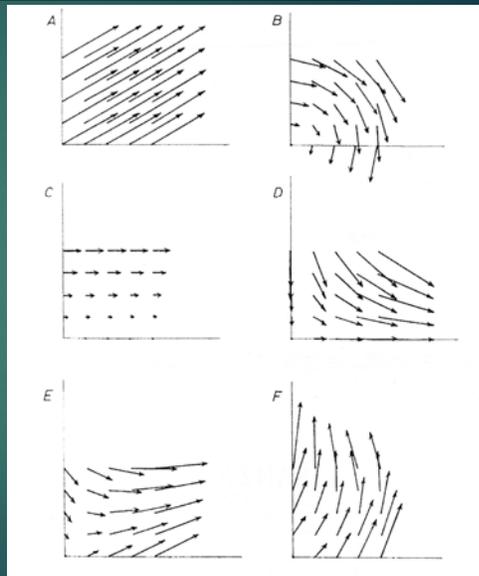
Figura 2-7.- Vector desplazamiento y trayectoria de un punto material en una deformación inhomogénea (arriba) y campo de desplazamiento para una superficie de esa misma deformación.

*Regímenes de  
deformación interna*



## Campos de desplazamiento

- A. Traslación.
- B. Rotación rígida.
- C. Deformación interna homogénea (cizalla simple).
- D. Deformación interna homogénea (cizalla pura).
- E. Deformación interna homogénea (cizalla sub-simple).
- F. Deformación interna inhomogénea.

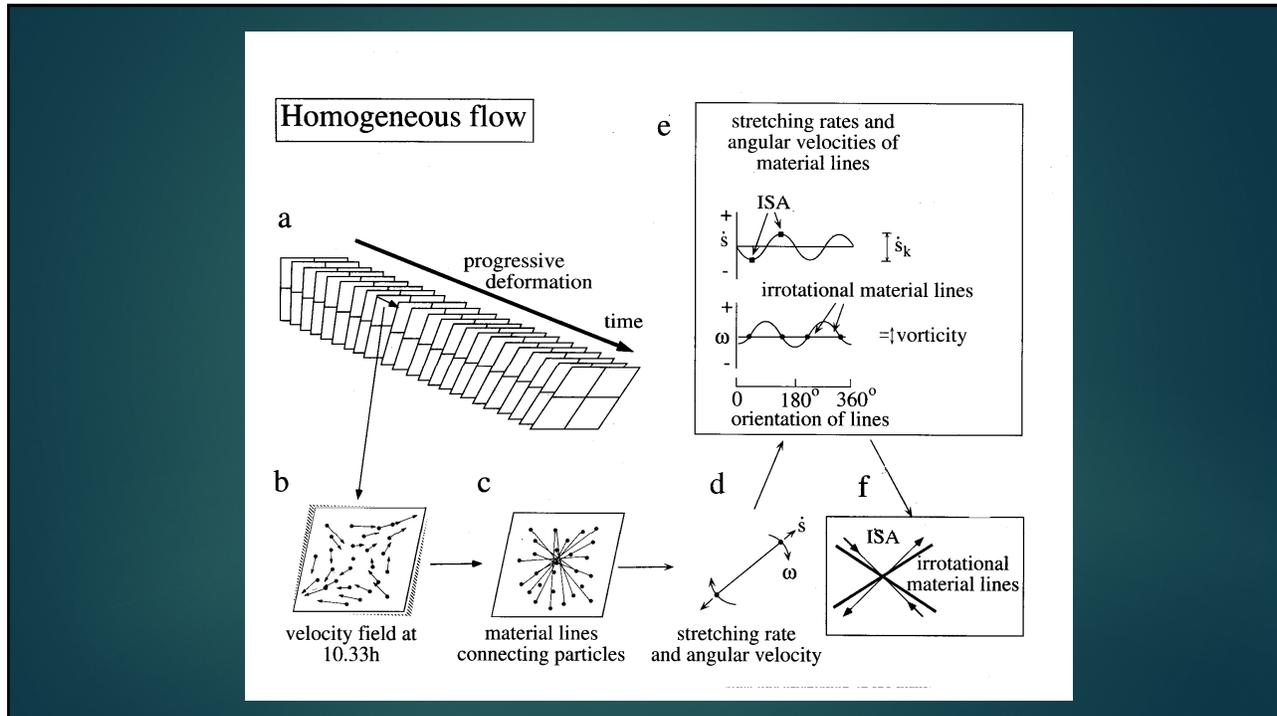


## Deformación Rotacional vs. No Rotacional

- ▶ **Rotacional:**
  - ▶ cuando los ejes de la deformación finita no son paralelos a la configuración restaurada del estado no deformado.
- ▶ **No rotacional:**
  - ▶ cuando los ejes de la deformación finita son paralelos.

## Flujo material

- ▶ **Rocas con deformación dúctil:**
  - ▶ Vistas desde la perspectiva de la mecánica de fluidos.
- ▶ **Patrón de desplazamiento por flujo:**
  - ▶ expresión de deformación relativamente homogénea a escala regional.
- ▶ **A partir de un cierto tiempo:**
  - ▶ deformación considerada como homogénea aunque el flujo no sea **isovolumétrico** ni **estacionario**.



## Vorticidad y espín

- ▶ **Velocidad angular:**
  - ▶ Generada por diferencias en tasa de flujo.
  
- ▶ **Vorticidad:**
  - ▶ suma de velocidades angulares de cualquier par de líneas materiales ortogonales (p y q).
  
- ▶ **Espín:**
  - ▶ Rotación adicional de los ejes de estiramiento instantáneos respecto a un referencial externo.

## Deformación a través del tiempo

- TRAYECTORIAS DE DEFORMACIÓN Y DESPLAZAMIENTO
- NOCIÓN DE DEFORMACIÓN PROGRESIVA

### Deformación finita vs. infinitesimal



Cada incremento se suma a la elipse de deformación finita



Estado no deformado

Estado de deformación finita

## Régimen de deformación

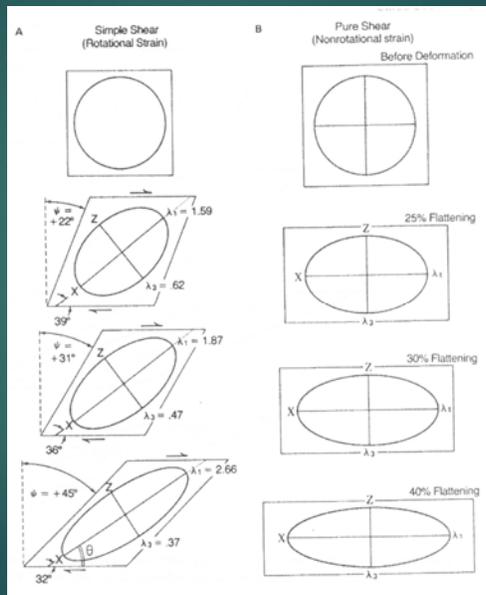
Deformación finita	Deformación incremental
No rotacional = cizalla pura	Coaxial = cizalla pura progresiva
Rotacional = cizalla simple	No coaxial = cizalla simple progresiva o aplastamiento general

- ▶ **Coaxial**
  - ▶ si los ejes de la elipse de deformación infinitesimal son paralelos a los de la elipse de deformación finita.
- ▶ **No coaxial**
  - ▶ si esos ejes no son paralelos.

## Trayectorias de partículas para cizalla simple y pura

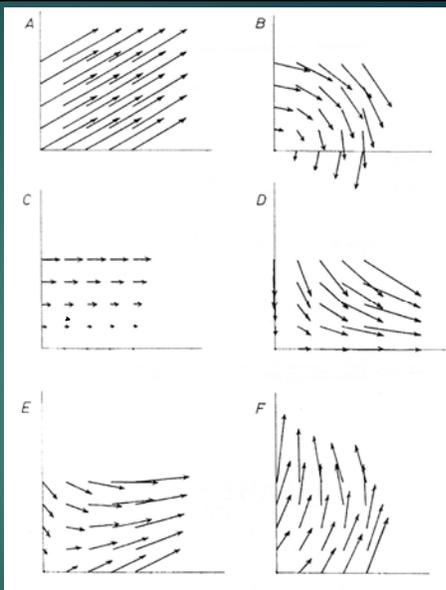
- ▶ **Cizalla simple:**
  - ▶ Partículas se desplazan **paralelamente** al plano de cizalla.
- ▶ **Cizalla pura:**
  - ▶ Partículas describen una **trayectoria hiperbólica**, menos las que se encuentran en la línea neutral, las que se desplazan en forma rectilínea pero con sentido opuesto desde el centro.

## Modelos de cizalla simple y pura



## Trayectorias de desplazamiento

- Existen diversos **campos de deformación** homogénea e inhomogénea.
- **Cizalla simple y cizalla pura** son dos modelos particulares de campo de deformación con *strain* o cambio de forma.



Modelos de campos de *strain* (o tensores modelo)