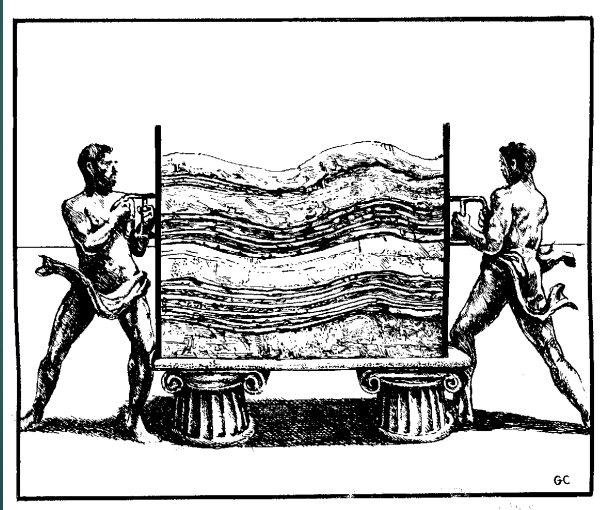


2. Esfuerzo y Deformación



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)

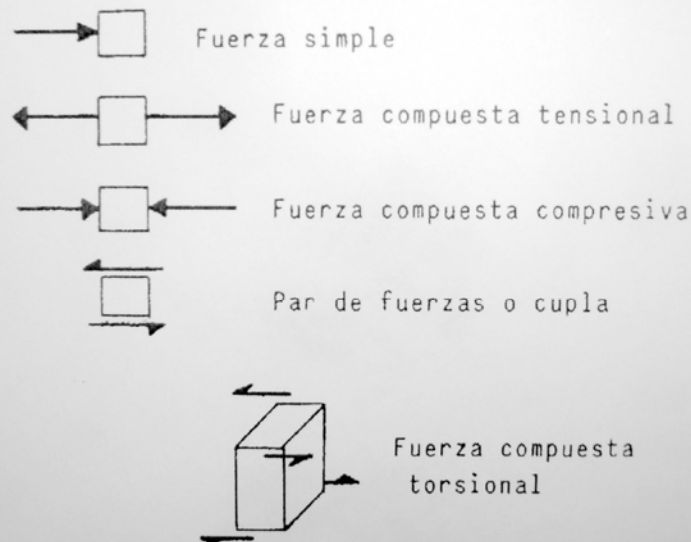


Figura 1-1- Tipos de fuerzas de superficie.

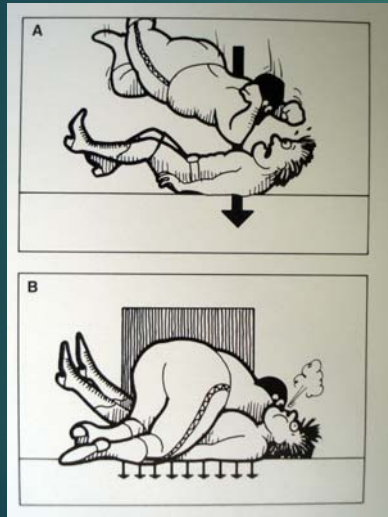
Unidades de medida

- ▶ $F = m \cdot a$ (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 adquiera 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

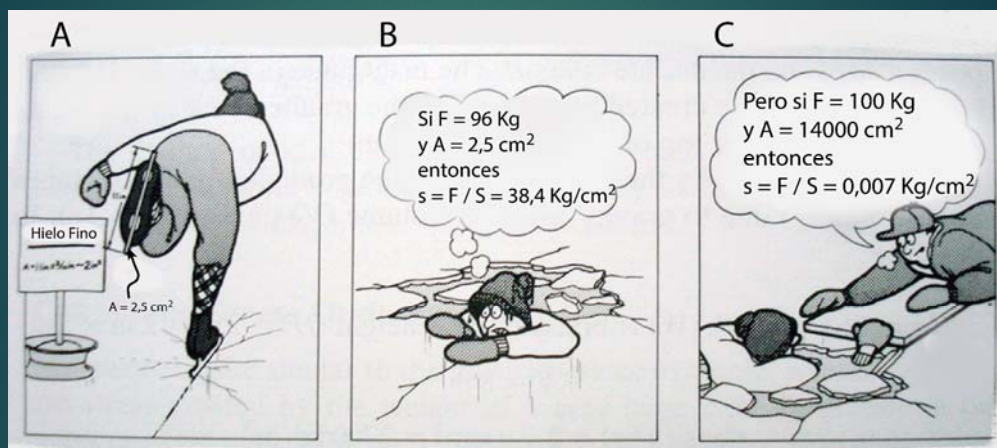
- ▶ **Esfuerzo (stress):**
 - ▶ Fuerza aplicada sobre una superficie del cuerpo
 - ▶ Repartición de la fuerza sobre la superficie en la cual se aplica.
- ▶ **Fuerza aplicada a un cuerpo:** Es la misma con independencia de la superficie del mismo sobre la cual se aplica.
- ▶ Por descomposición vectorial, 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

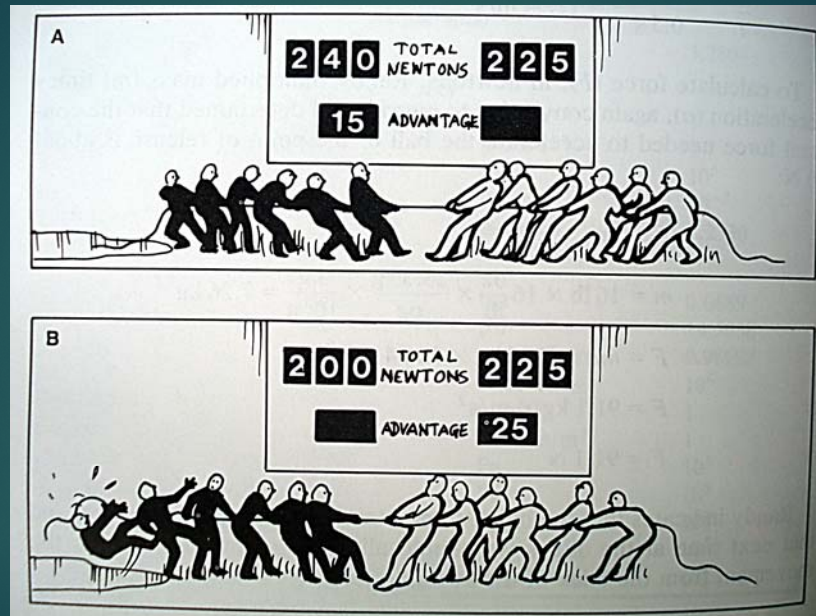


► El daño producido por el luchador que cae sobre el otro depende de la superficie de contacto entre ambos luchadores, o sea de la **superficie de aplicación de la fuerza**

Ejemplo del esquiador sobre hielo



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



Unidad de medida del esfuerzo: " σ "

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

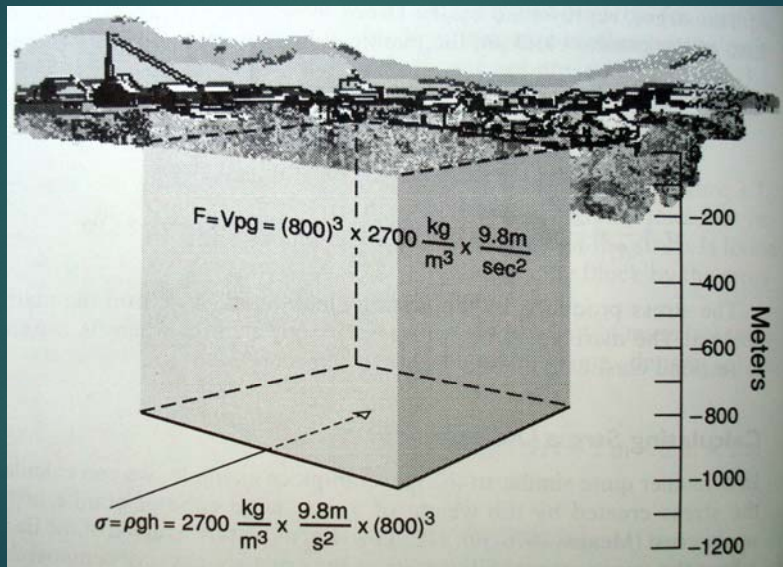
Tipos de esfuerzo

- ▶ *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*

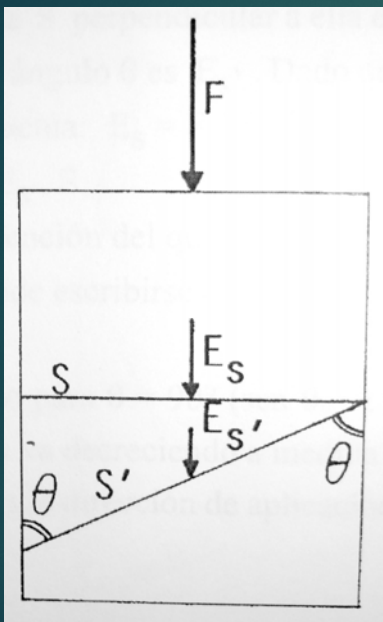
Efecto de acción y reacción: tercera ley de Newton

- ▶ **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

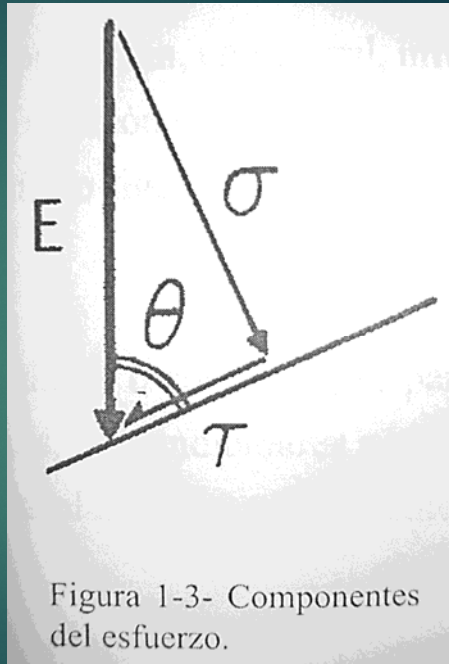


- ▶ La misma fuerza actuando sobre distintos planos crea distintos esfuerzos:

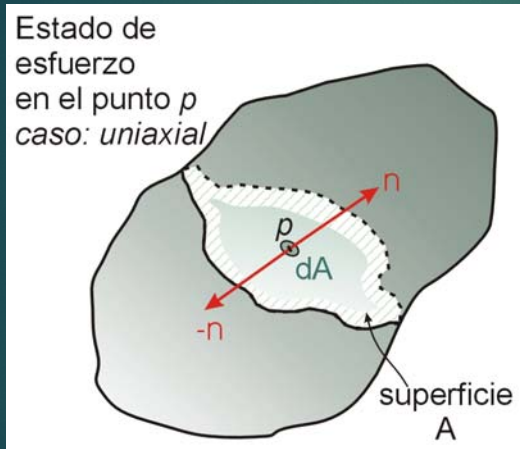
- ▶ $E_s = F / S$
- ▶ $E_{s'} = E_s \cdot S / S'$
- ▶ $\text{Sen } \theta = S / S'$
- ▶ $E_{s'} = E_s \cdot \text{Sen } \theta$

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.⁴
- ▶ **Infinitos vectores** = campo vectorial (tensor de segundo orden)

Las 9 componentes de un estado de esfuerzo

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

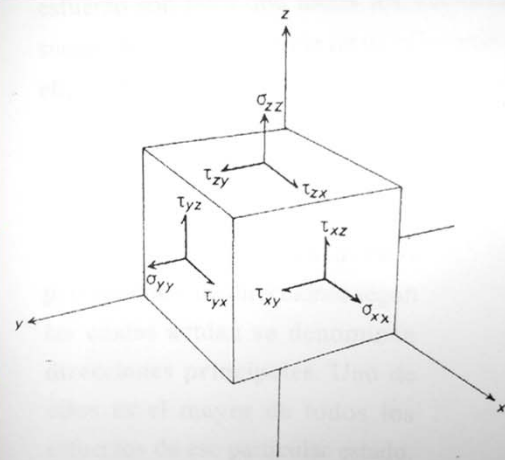
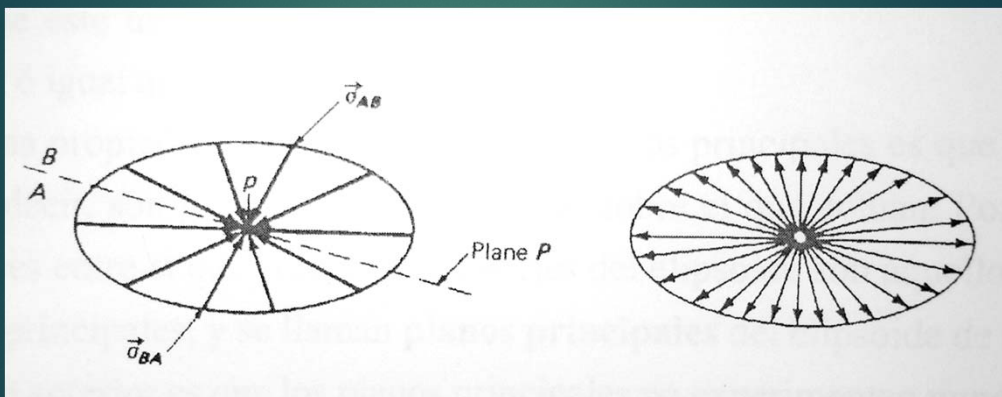


Figura 1-5- Las nueve componentes de un estado de esfuerzo.

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

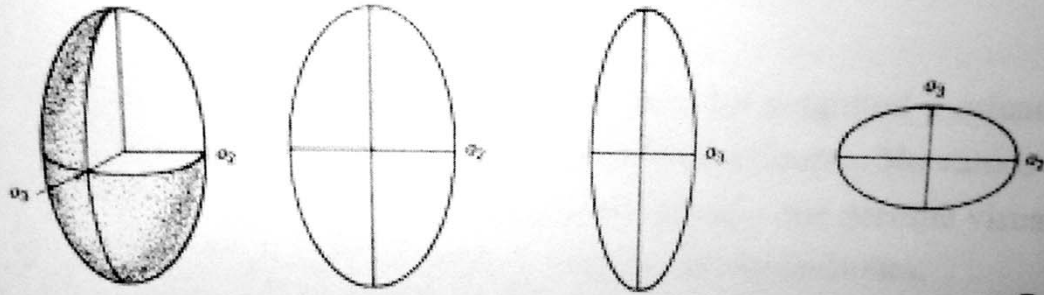
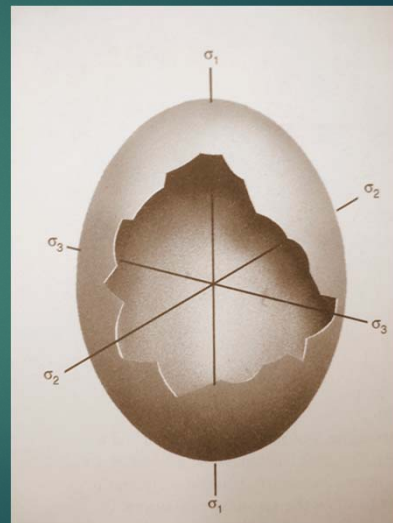


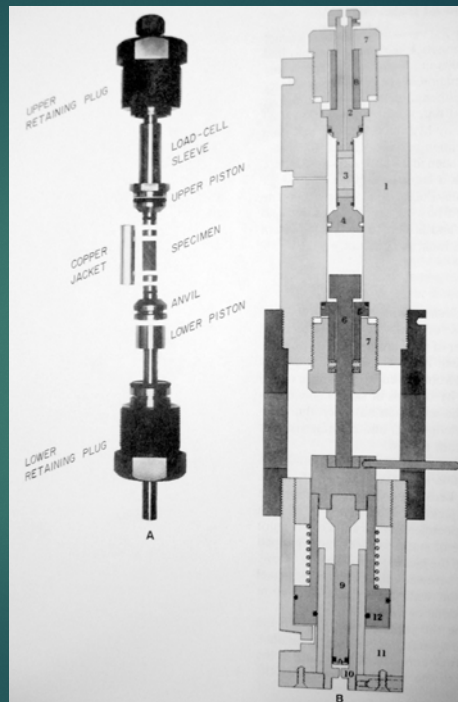
Figura 1-7- Un elipsoide de esfuerzo triaxial y sus planos principales

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

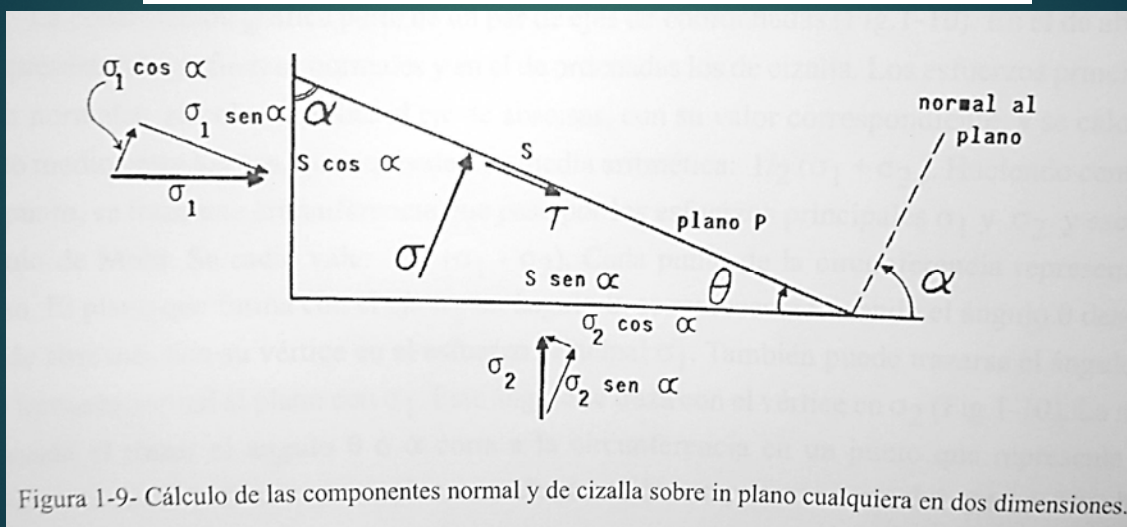
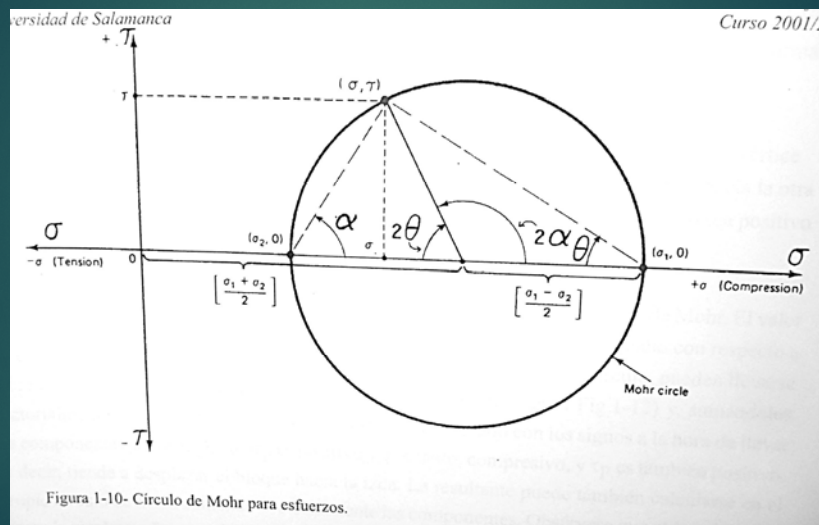
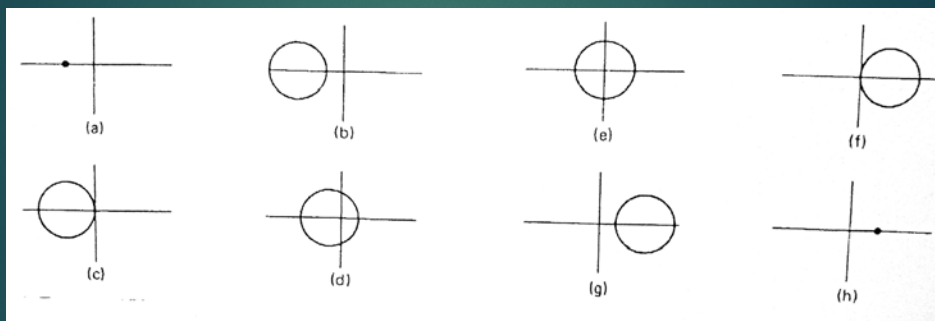


Figura 1-9- Cálculo de las componentes normal y de cizalla sobre in plano cualquiera en dos dimensiones.

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

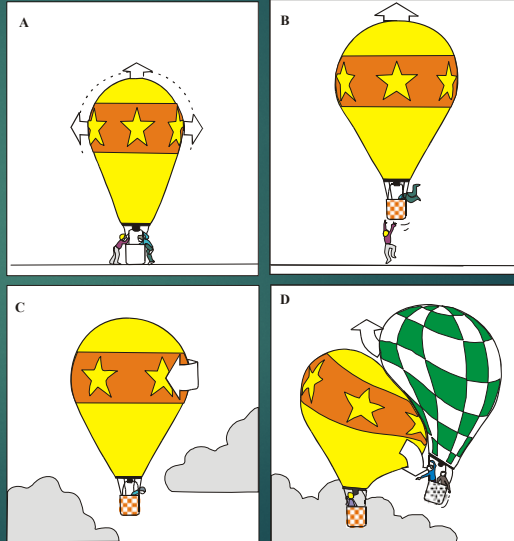
- ▶ Componentes
- ▶ Frágil y dúctil
- ▶ Homogénea y heterogénea
- ▶ Longitudinal y angular
- ▶ Con o sin rotación interna
- ▶ Finita e infinitesimal
- ▶ Progresiva

¿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**.

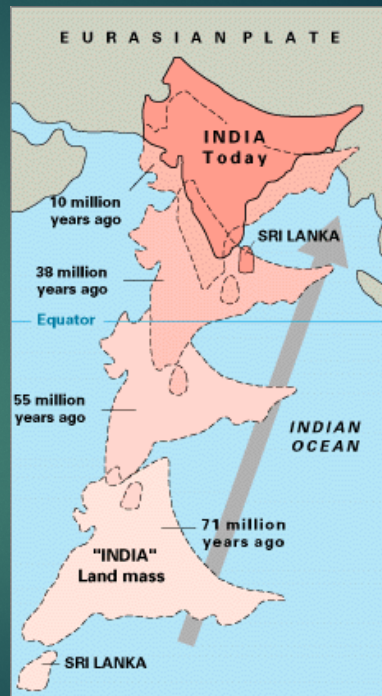
Componentes de la deformación

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

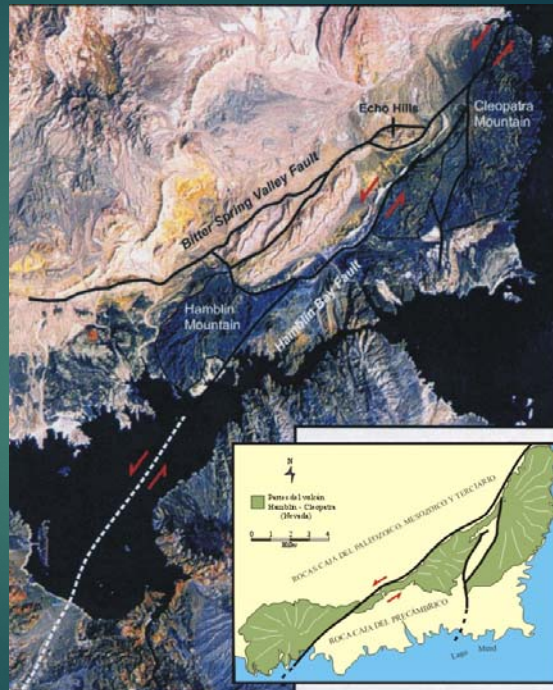


Traslación

- ▶ 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)

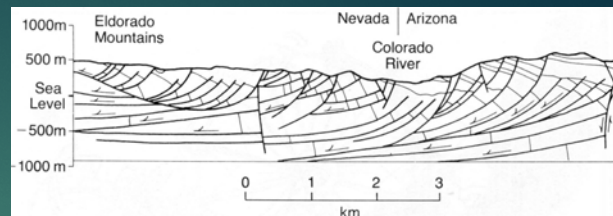


Figure 2.22 Listric normal faulting in the Lake Mead region. Tertiary and Precambrian rocks are rotated to steep dips along curved faults. [From Anderson (1971). Courtesy of United States Geological Survey.]

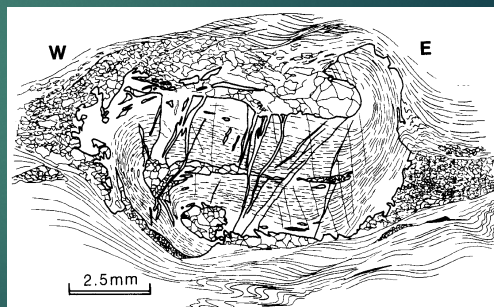
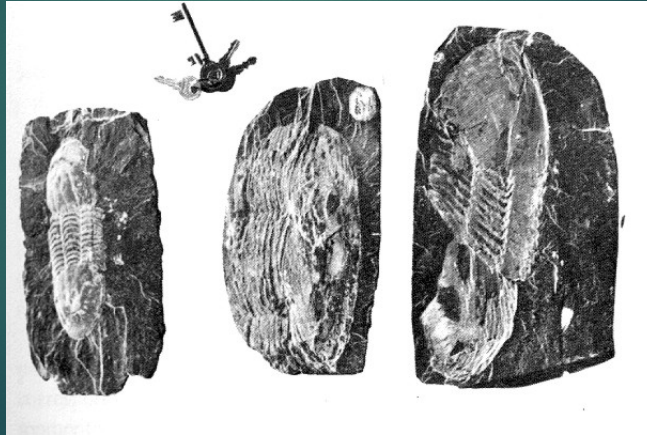


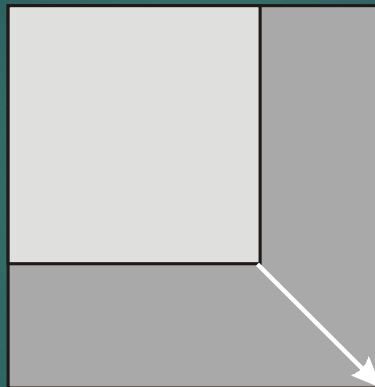
Figure 2.24 Detailed drawing of a spiral garnet in metamorphic rock collected in the Caledonides of south Norway. [Reprinted with permission from *Journal of Structural Geology*, v. 14, Fossen (1992), Elsevier Science, Ltd., Pergamon Imprint, Oxford, England.]

Deformación interna (*Strain*)

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

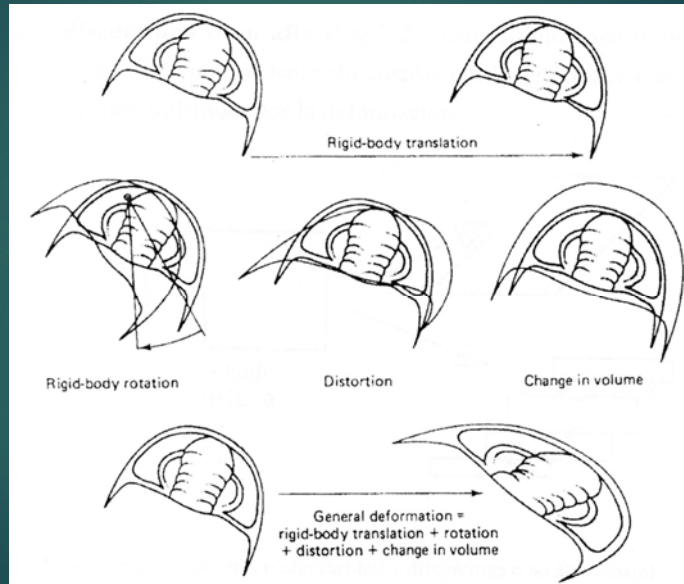


Cambio de volumen (dilatación)

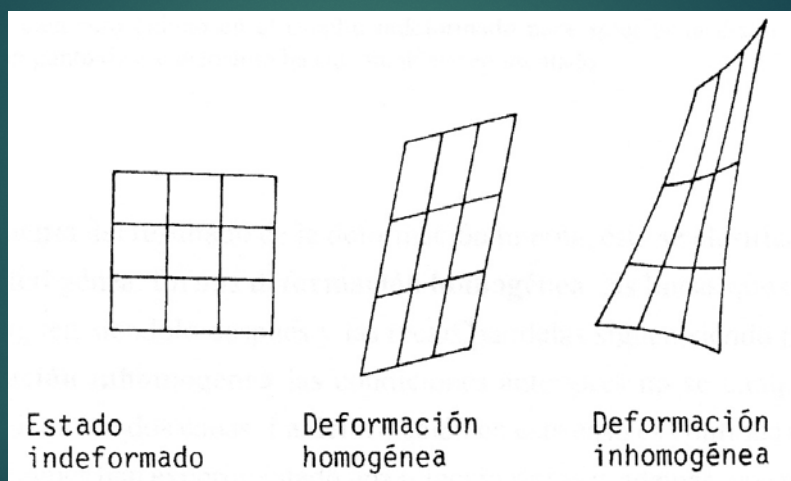


$$\text{Dilatación: } \Delta = \frac{(V_f - V_i)}{V_i}$$

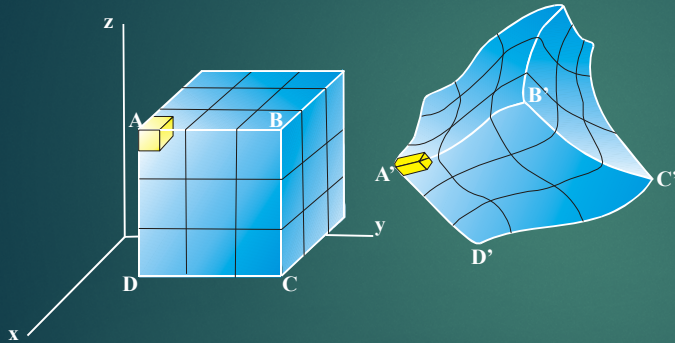
Distorsión y deformación general



Deformación homogénea

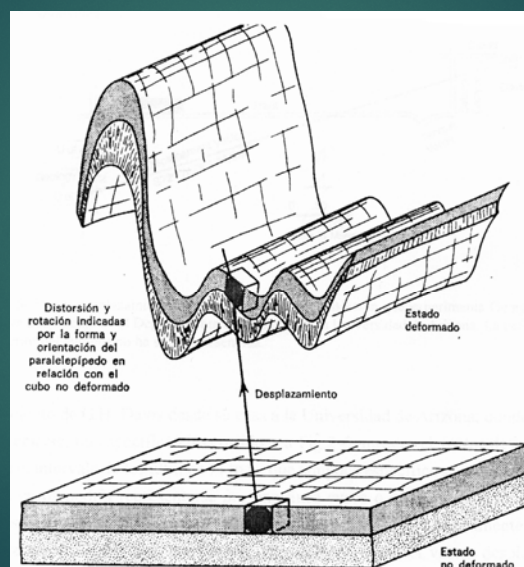


Homogeneidad en 3-D

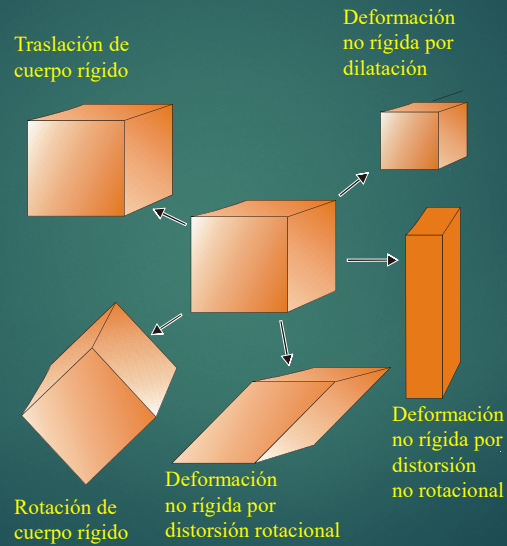


- ▶ **Homogénea:**
 - ▶ líneas rectas permanecen rectas
 - ▶ Líneas paralelas permanecen paralelas
- ▶ **Heterogénea:**
 - ▶ Lo contrario

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

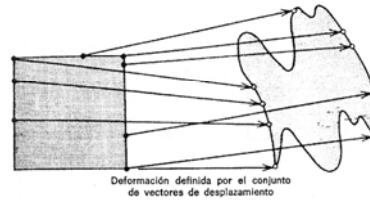
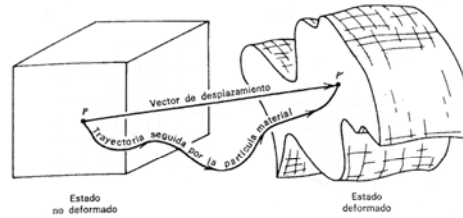
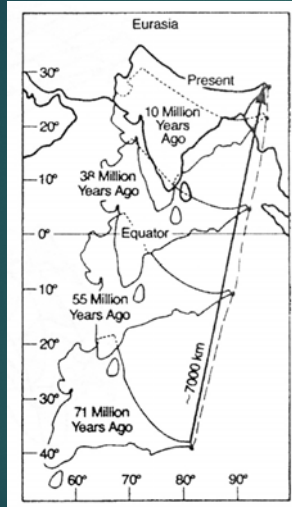
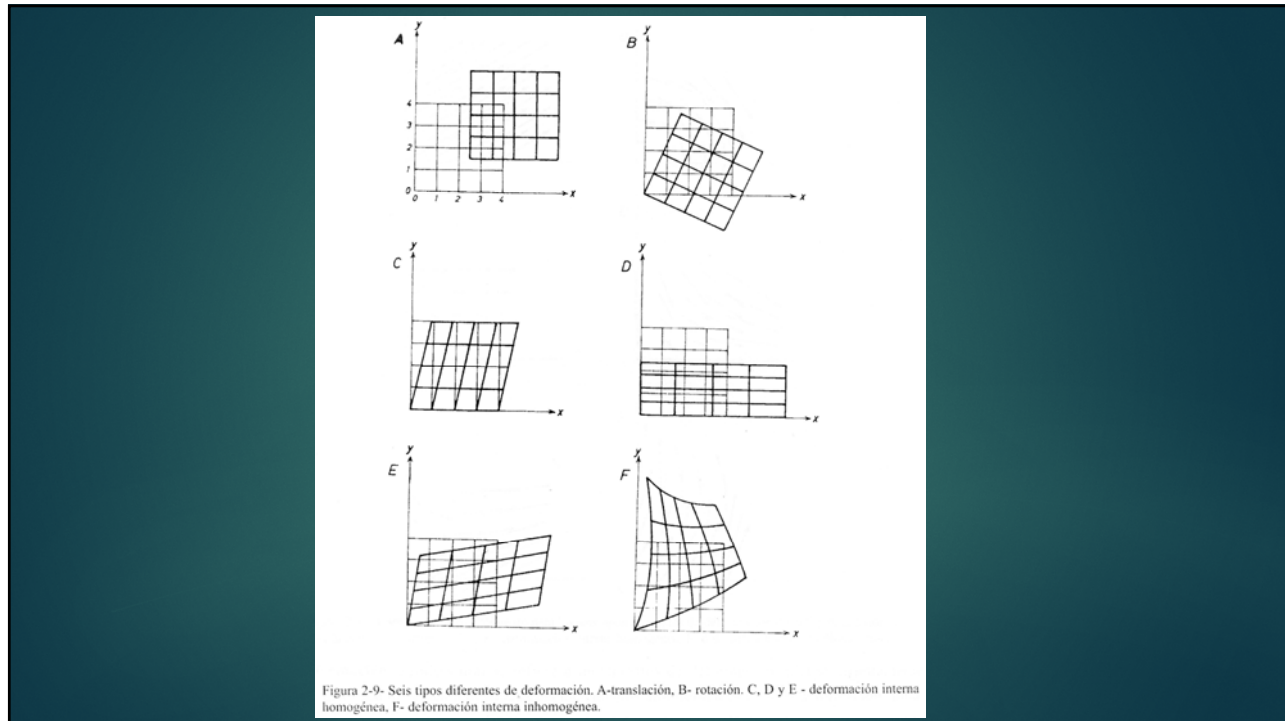


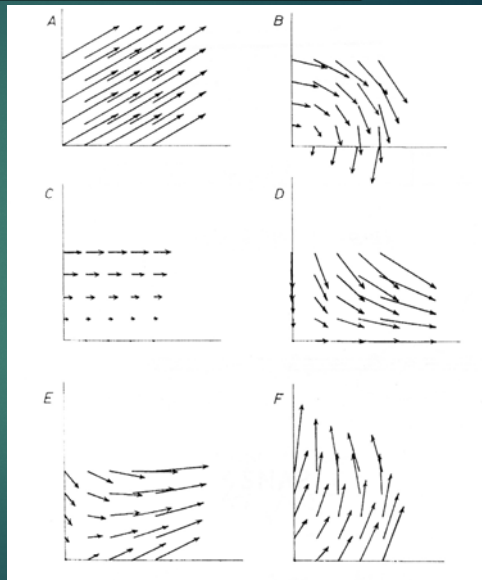
Figura 2-7.- Vector desplazamiento y trayectoria de un punto material en una deformación inhomogénea (arriba) y campo de desplazamiento para una superficie de esa misma deformación.

*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.

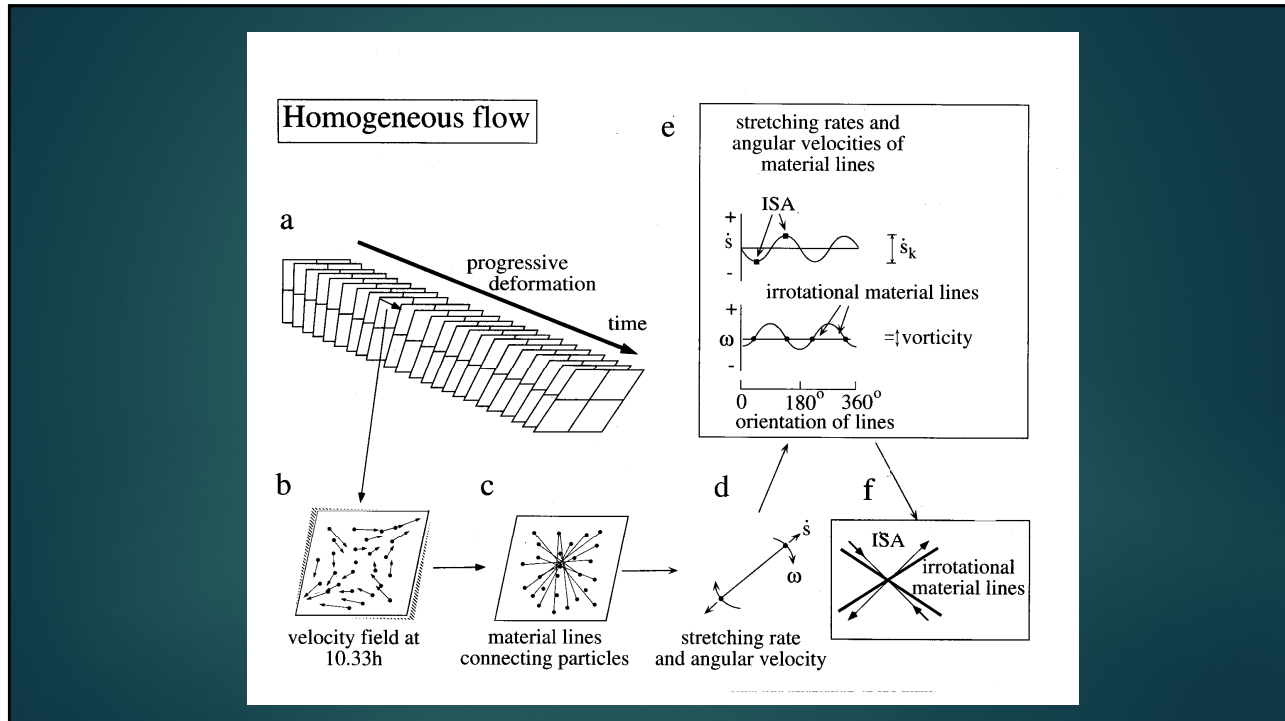


Deformación Rotacional vs. No Rotacional

- ▶ **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

patrón de flujo

Vorticidad

Ejes de estiramiento instantáneos

espín

vorticidad $W = \omega \rho$

referencial externo

- ▶ **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



Régimen de deformación

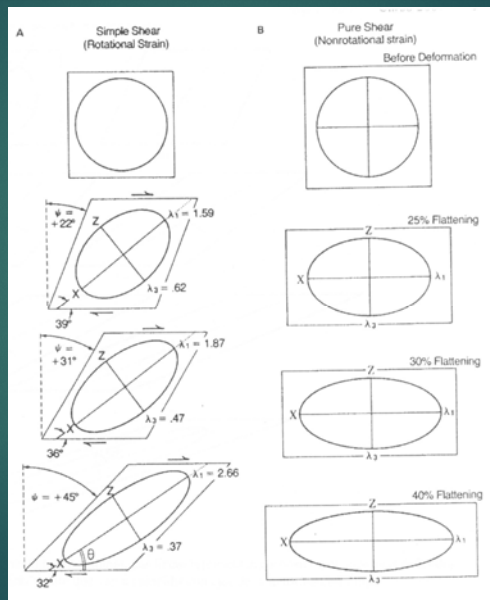
Deformación finita	Deformación incremental
No rotacional = cizalla pura	Coaxial = cizalla pura progresiva
Rotacional = cizalla simple	No coaxial = cizalla simple progresiva o aplanamiento general

- ▶ **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

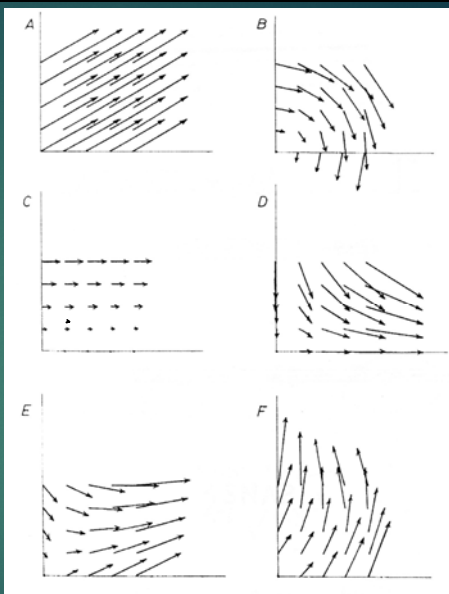
- ▶ **Cizalla simple:**
 - ▶ Partículas se desplazan **paralelamente** al plano de cizalla.
- ▶ **Cizalla pura:**
 - ▶ Partículas describen una **trayectoria hiperbólica**, menos las que se encuentran en la línea neutral, las que se desplazan en forma rectilínea pero con sentido opuesto desde el centro.

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)