

# Fluidos en las rocas y la importancia de los stresses efectivos

En la corteza los fluidos más comunes son el agua, la salmuera y los hidrocarburos.

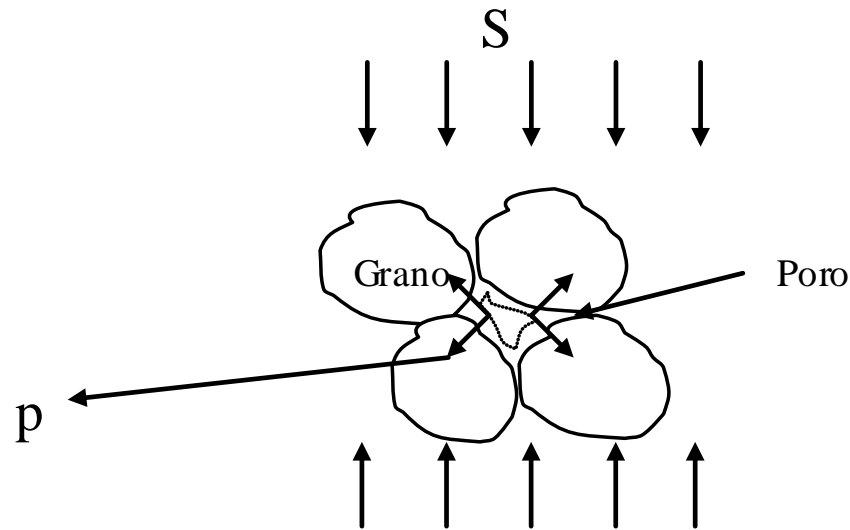
La influencia de los fluidos en la resistencia de las rocas es considerable. Inicialmente se comprobó que la resistencia de un cristal seco es diez veces mayor a la del mismo en estado húmedo. Price (1960) y otros concluyeron que la resistencia uniaxial de una roca completamente saturada era solo un 45% de su resistencia cuando se secaba en horno.

- La influencia de los fluidos en la resistencia de una roca se asocia a efectos químicos y mecánicos. El efecto químico (o Rehbinder) está relacionado con la pérdida de energía superficial de las paredes de los poros producida por el agua absorbida. Si hay una condición de stress favorable, las microfracturas tienden a propagarse. El agua absorbida también produce, a elevadas temperaturas, migración de soluciones inorgánicas y disolución. Este efecto químico es común en la naturaleza. Sin embargo, sus efectos son pequeños cuando se compara con la influencia mecánica de las presiones de fluidos.

- Los efectos mecánicos son:
- La presión de fluidos reduce la habilidad de la roca de soportar los efectos del stress diferencial (es decir, altas presiones de fluidos reducen la resistencia de la roca).
- La presión de fluidos influye en el modo de deformación

# Stress efectivo

Para graficar el fenómeno usaremos la definición de esfuerzos efectivos en suelos. Consideremos un agregado granular, poroso, sujeto a una compresión  $S$  en todas direcciones, tal que se desarrolla en el fluido intersticial una presión de fluidos  $p$ .

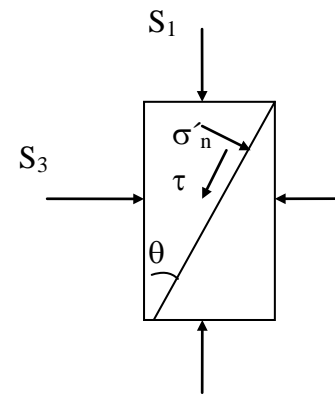


Cierre de poro en respuesta del esfuerzo compresivo que tiende a juntar las partículas.

En su forma más simple, la relación entre estos esfuerzos es

$$S - p = \sigma'$$

Donde  $\sigma'$  es el stress efectivo responsable de la deformación de la masa granular.



Material poroso con agua.  
Aislado por una membrana  
impermeable.

- El stress normal y de cizalle ( $S_n$  y  $\tau$ ) en una superficie interna, que forma un ángulo con el eje de compresión máxima:

$$S_n = \frac{S_1 + S_3}{2} - \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\theta.$$

Si se escribe estas ecuaciones en términos de stress efectivo quedan

$$S - p = \sigma'$$

$$\sigma'_n = \frac{(S_1 - p) + (S_3 - p)}{2} - \frac{[(S_1 - p) - (S_3 - p)]}{2} \cos 2\theta$$

$$= \frac{(S_1 + S_3)}{2} - \frac{(S_1 - S_3) \cos 2\theta}{2} - p$$

$$\sigma'_n = S_n - p$$

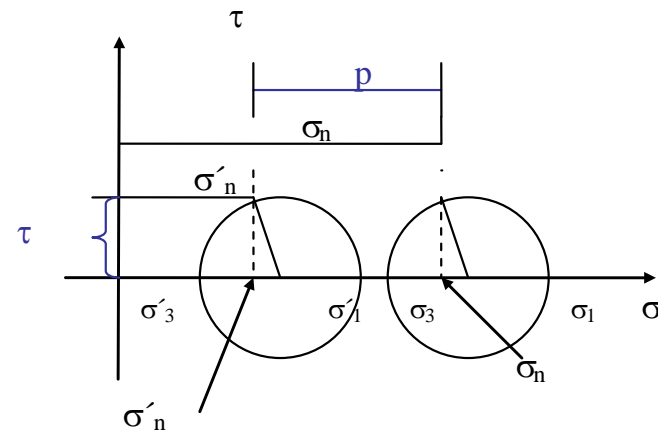
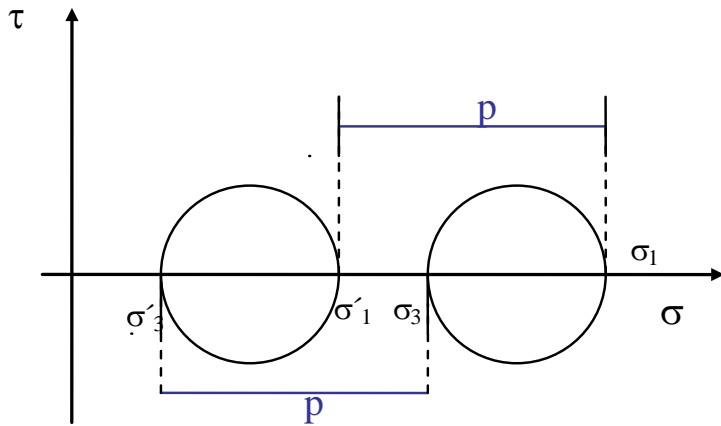
En término de stress total habíamos visto:

$$S_n = \frac{S_1 + S_3}{2} - \frac{S_1 - S_3}{2} \cos 2\theta$$
$$\tau = \frac{S_1 - S_3}{2} \sin 2\theta.$$

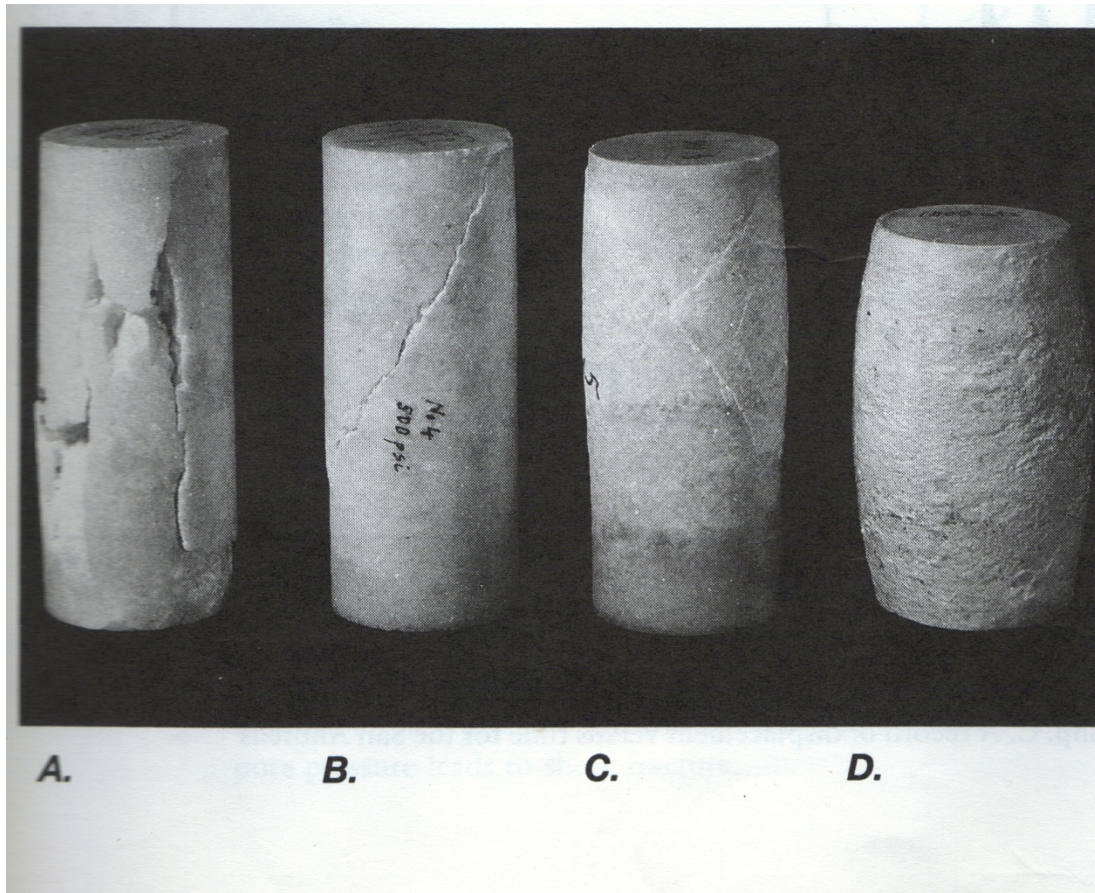
Para stress efectivo:

$$\tau_r = \frac{(S_1 - p) - (S_3 - p)}{2} \sin 2\theta$$
$$\tau = \frac{(S_1 - S_3)}{2} \sin 2\theta$$
$$\tau_r = \tau.$$

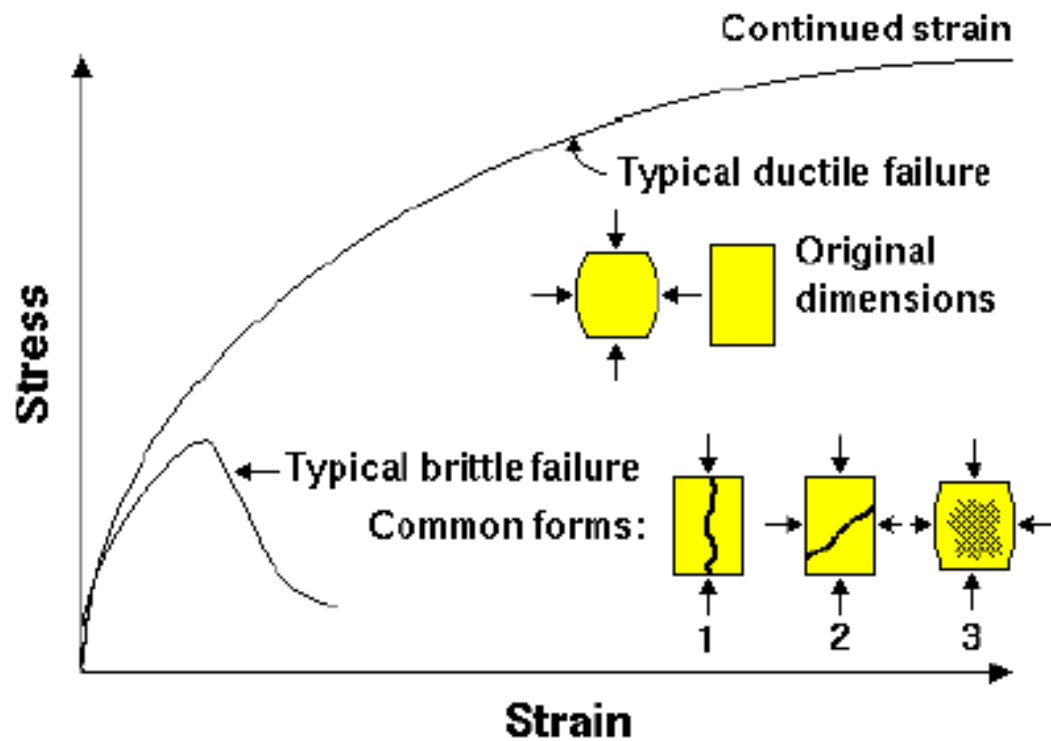
- La presión de fluidos reduce el stress normal que actúa en un plano arbitrario, pero no afecta al stress de cizalle.
- Si los esfuerzos totales y efectivos son ploteados en un círculo de Mohr, esta relación se hace evidente







**Figure 9.10** Effect of confining pressure  $p$  on the mode of deformation in Wombeyan marble at room temperature. All the samples had the same undeformed length. A. Longitudinal splitting at  $p = 0.1$  MPa. B. Single shear fracture at  $p = 3.5$  MPa. C. Brittle–ductile transition at  $p = 35$  MPa. D. Ductile flow at  $p = 100$  MPa.



**Figure 2-4.** Failure modes for different types of rock sample stress-strain behavior. 1 – tensile splitting, 2 – shear splitting, 3 – ‘barrel’-shape failure. (Geology for Engineers 2001.)

# Criterio de Navier-Coulomb para ruptura frágil

- Este criterio de ruptura de cizalle frágil está basado en la ley de deslizamiento friccional (Ley de Amonton) que dice:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi$$

Donde  $\tau$  y  $\sigma$  son los esfuerzos normal y de cizalle actuando en el plano de ruptura potencial y  $\phi$  es el ángulo de fricción interna de ese plano (ángulo de deslizamiento).

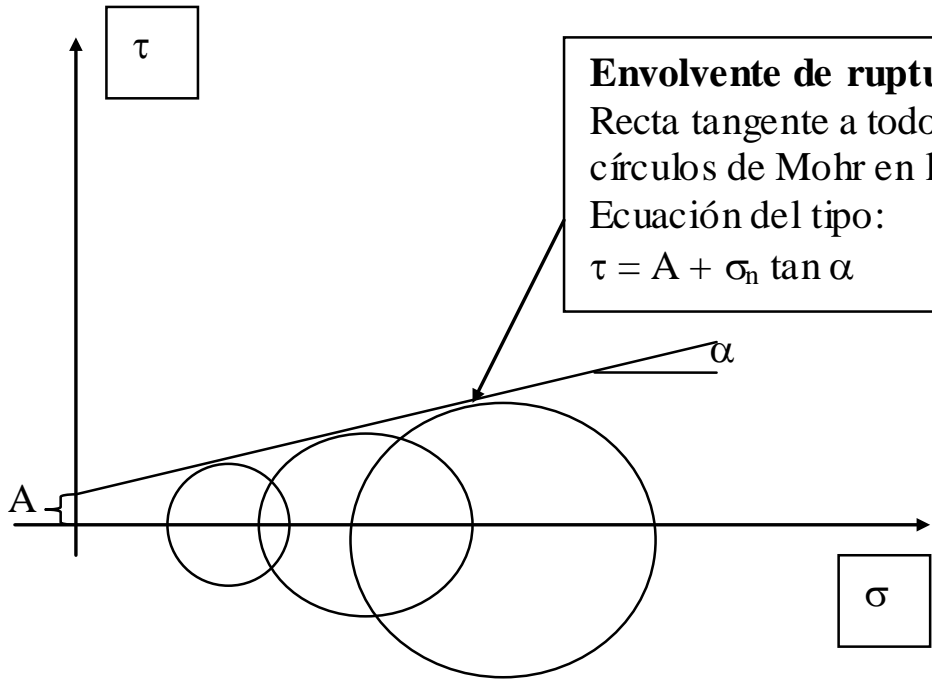
Se ha reconocido además que, con anterioridad al desarrollo del plano de fractura, la cohesión ( $C_0$ ) de la roca tiene que ser sobrepasada. Entonces, el criterio puede ser expresado como:

$$\tau = c_0 + \sigma_n \tan \phi$$

- El criterio completo de ruptura de cizalle puede escribirse como

$$\tau = c_0 + \sigma_n \mu$$

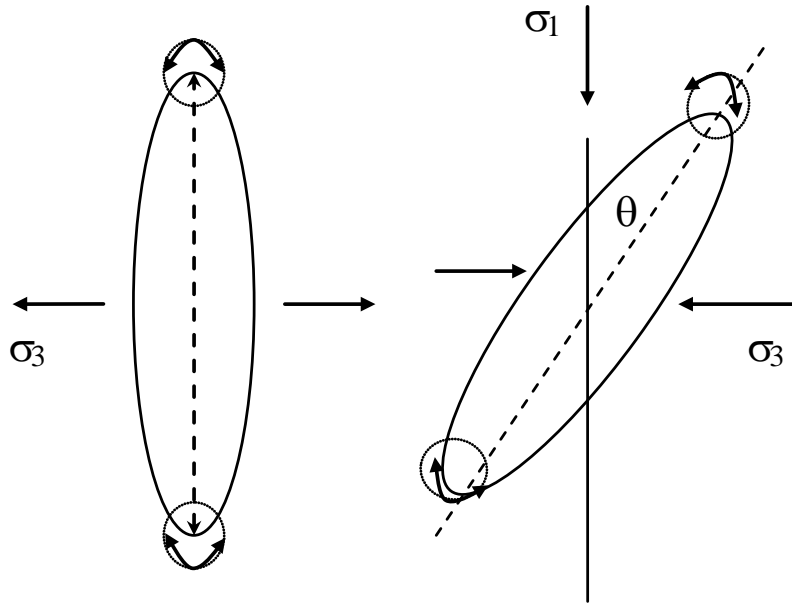
$$\mu = \tan \phi = \frac{\tau}{\sigma}$$



**Envolvente de ruptura:**  
Recta tangente a todos los  
círculos de Mohr en la ruptura:  
Ecuación del tipo:  
 $\tau = A + \sigma_n \tan \alpha$

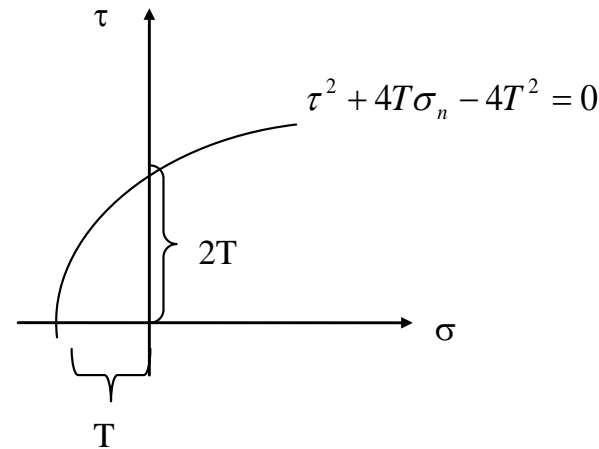
# Criterio de Griffith para ruptura frágil

- La tesis usada por Griffith se basa en los enlaces interatómicos.
- De la teoría de los enlaces interatómicos la resistencia a la tracción teórica de sólidos frágiles ideales es  $T \cong E/10$ , donde  $E$  es el Módulo de Young.
- Para muchas rocas resistentes, el módulo de elasticidad  $E > 8000$  MPa, indicaría una  $T \cong 800$  MPa.
- Sin embargo, en la práctica, valores máximos para  $T$  son alrededor de 35 - 40 MPa.

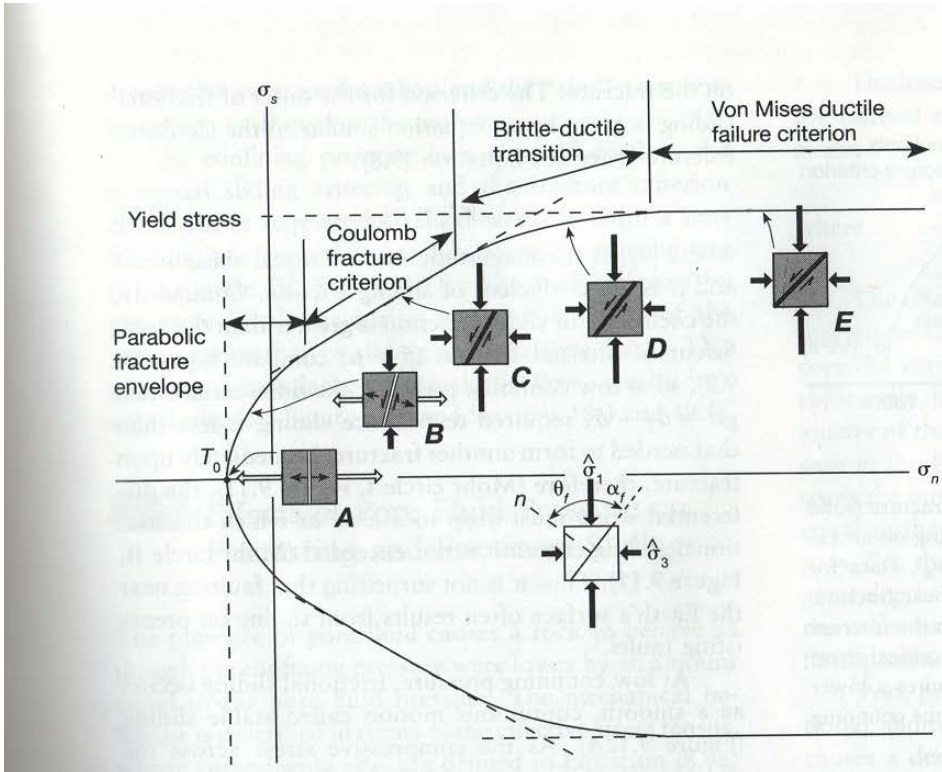
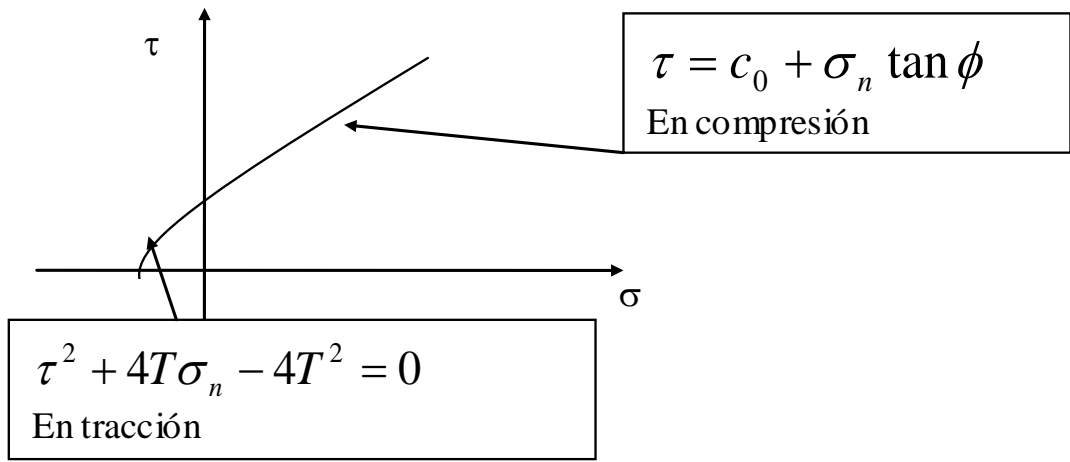


Murrell (1958) expresó esta relación no lineal entre los esfuerzos principales en la ruptura como una envolvente de Mohr con la ecuación

$$\tau^2 + 4T\sigma_n - 4T^2 = 0 \quad (T = \text{resistencia a la tracción.})$$

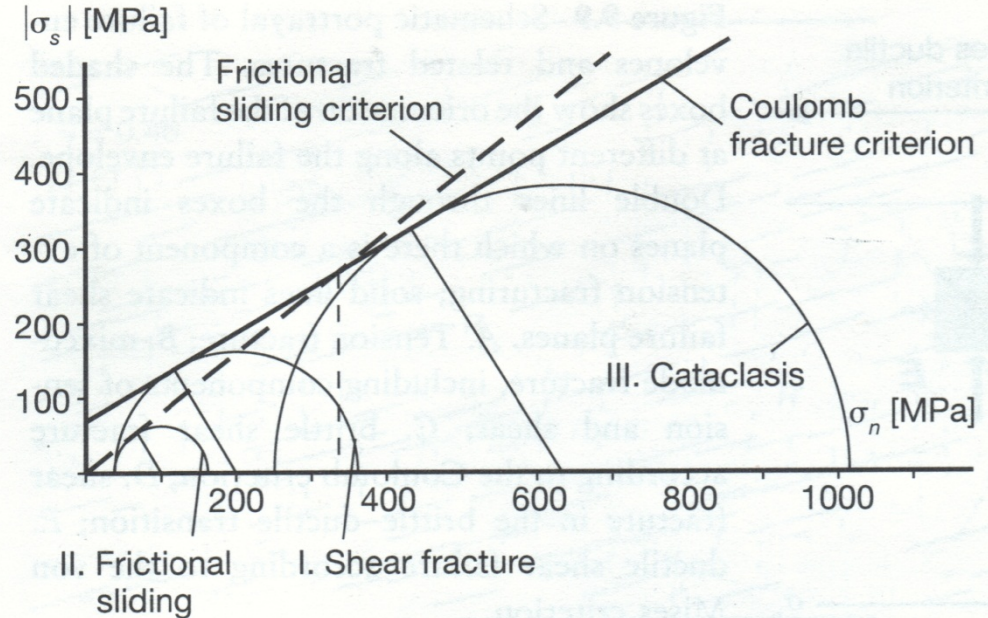
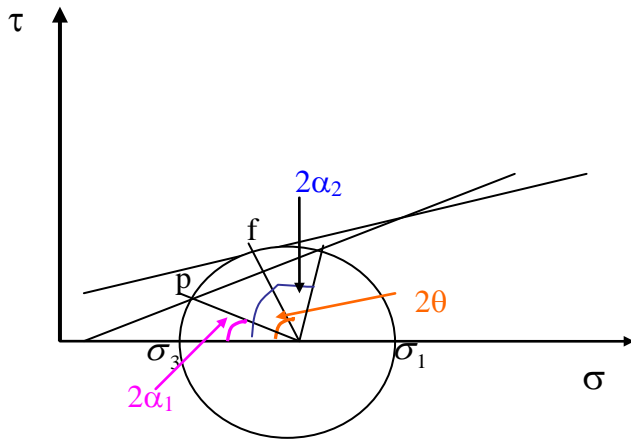






**Figure 9.9** Schematic portrayal of failure envelopes and related fractures. The shaded boxes show the orientation of the failure plane at different points along the failure envelope. Double lines through the boxes indicate planes on which there is a component of extension fracturing; solid lines indicate shear failure planes. A. Tension fracture; B. mixed-mode fracture, including components of tension and shear; C. brittle shear fracture according to the Coulomb criterion; D. shear fracture in the brittle-ductile transition; E. ductile shear failure according to the von Mises criterion.

# Efecto de fracturas preexistentes



**Figure 9.11** Example of Coulomb criterion for fracture (solid line:  $|\sigma_s^*| = 70 + 0.6 E\sigma_n$ ) and for frictional sliding on an existing fault surface (dashed line:  $|\sigma_s^*| = 0.81 E\sigma_n$ ). Data for Weber sandstone. Circle I: a critical stress for shear fracture. Circle II: a critical stress for frictional sliding on the fracture plane at constant confining pressure. Circle III: a critical stress for cataclastic flow during which fracturing requires a lower differential stress than frictional sliding at the same confining pressure  $\hat{\sigma}_3$ .