



## Introducción

- **Fracturas en la corteza terrestre:**
  - Las estructuras geológicas más importantes para la sociedad y el ambiente.
- **Controlan:**
  - **Factores ambientales y de riesgo geológico** (e.g. sismos, volcanismo, circulación agua potable y efluentes contaminantes).
  - **Factores económicos de desarrollo:** (e.g. explotación bienes minerales, oro, petróleo y agua subterránea).

05/05/2016 Henri Masquelin 2

The slide has a blue background. At the top, there is a teal box with the word 'Introducción' in white. Below this, there are two main bullet points, each starting with a yellow arrowhead. The first bullet point is 'Fracturas en la corteza terrestre:' followed by a sub-bullet 'Las estructuras geológicas más importantes para la sociedad y el ambiente.'. The second bullet point is 'Controlan:' followed by two sub-bullets: 'Factores ambientales y de riesgo geológico (e.g. sismos, volcanismo, circulación agua potable y efluentes contaminantes).' and 'Factores económicos de desarrollo: (e.g. explotación bienes minerales, oro, petróleo y agua subterránea)'. At the bottom, there is a blue bar with white text: '05/05/2016', 'Henri Masquelin', and '2'.

## Fracturas

- Superficies a lo largo de las cuales la roca ha perdido su cohesión.
- **Carácter fractal:**
  - Existen en todas las escalas (desde sub-microscópica hasta continental).

05/05/2016

Henri Masquelin

3

## Fracturas simples



05/05/2016

Henri Masquelin



## Escala cartográfica



## Fracturas sin desplazamiento (diaclasas)



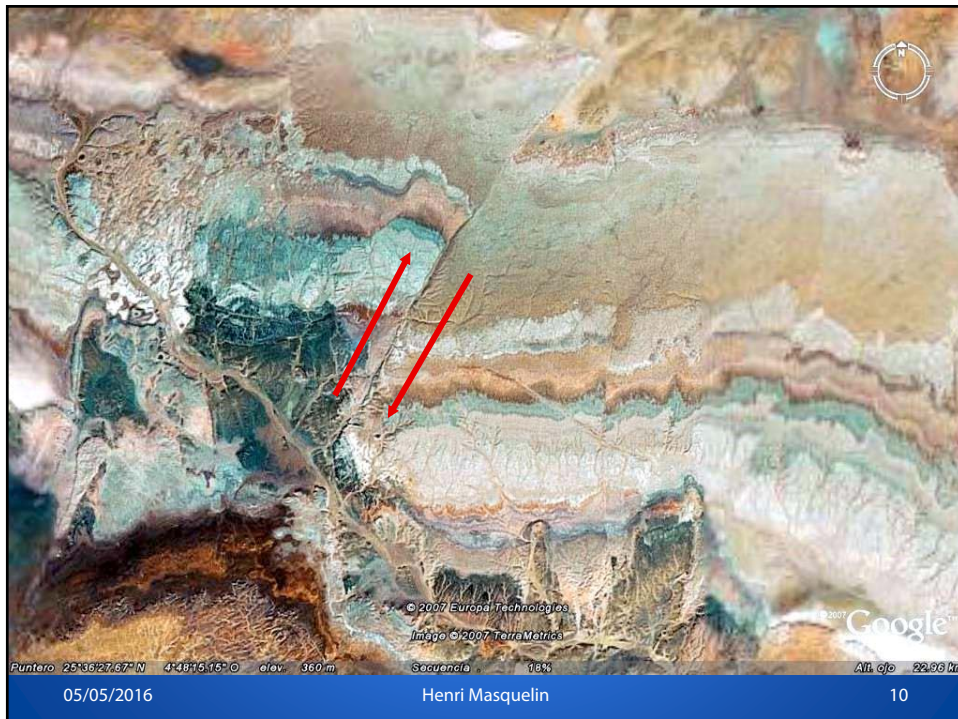
## Fracturas asociadas a pliegues



05/05/2016

Henri Masquelin

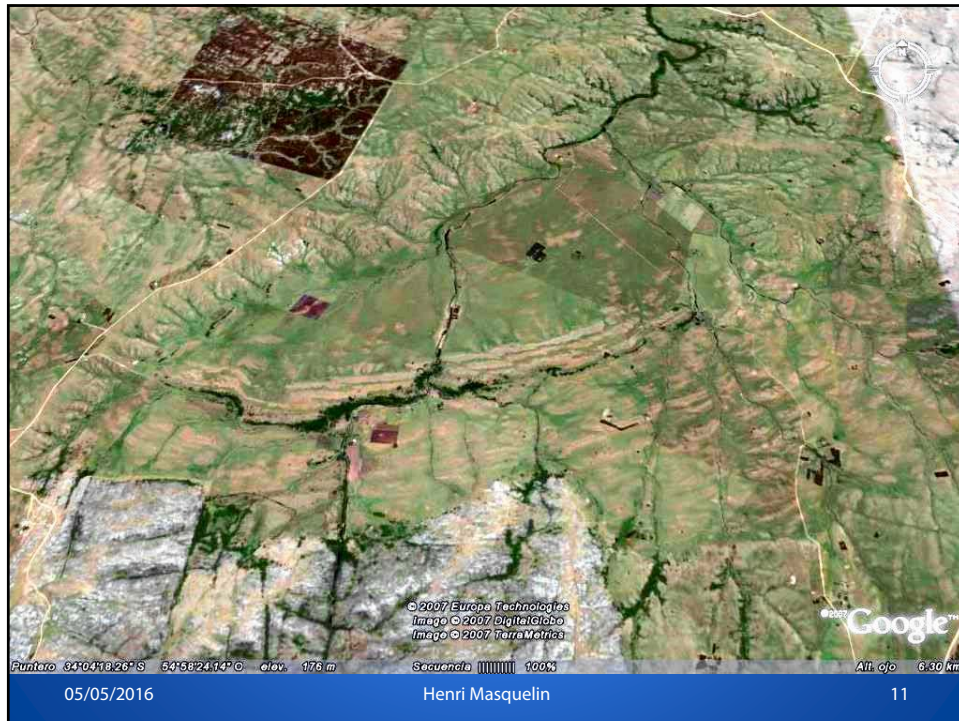
9



05/05/2016

Henri Masquelin

10



## Proceso de Fracturación

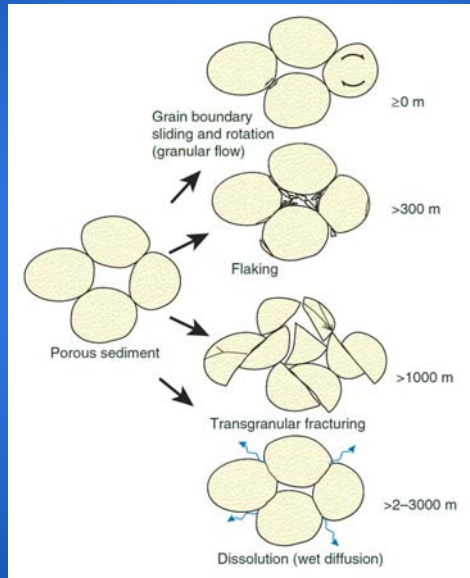
- **Se inicia en discontinuidades microscópicas:**
  - Defectos cristalinos, anisotropía de retículo cristalino
  - Límites de grano
  - Anisotropías de textura previas
- **Se propaga:**
  - A través de superficies de contacto.
  - A través de los minerales, venciendo la resistencia elástica.
- **Se extiende a toda la roca:**
  - Pero se localiza siempre en superficies de aplicación del esfuerzo resuelto.

05/05/2016

Henri Masquelin

12

## Inicio de fracturas microscópicas

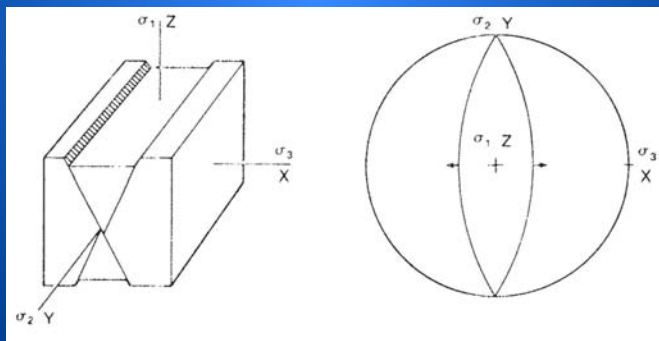
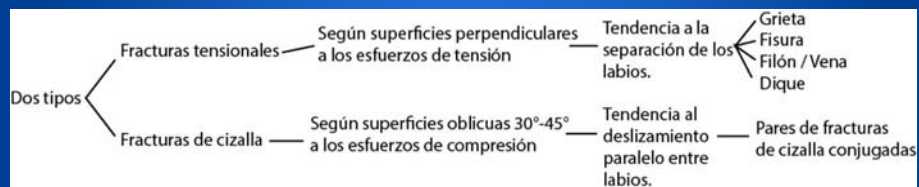


05/05/2016

Henri Masquelin

13

## Planos de fractura y su relación con los esfuerzos principales



05/05/2016

14

## ¿Por qué se forman?

- Para acomodar cantidades de desplazamiento que no pueden ser acomodadas por **deformación continua** a la escala considerada (i.e. deformación distribuida).
- Para ajustar el incremento **no proporcional** de deformación en régimen de **flujo no estacionario**.
- Como respuesta a cambios abruptos en la **tasa de deformación** y el **esfuerzo diferencial**.
- Como respuesta a cambios abruptos en la **dilatación** o **contracción** activados térmicamente.

05/05/2016

Henri Masquelin

15

## Teoría de la rotura

- 1. Ensayo experimental de rotura**
- 2. Criterio de Coulomb**
- 3. Criterio de Griffith**

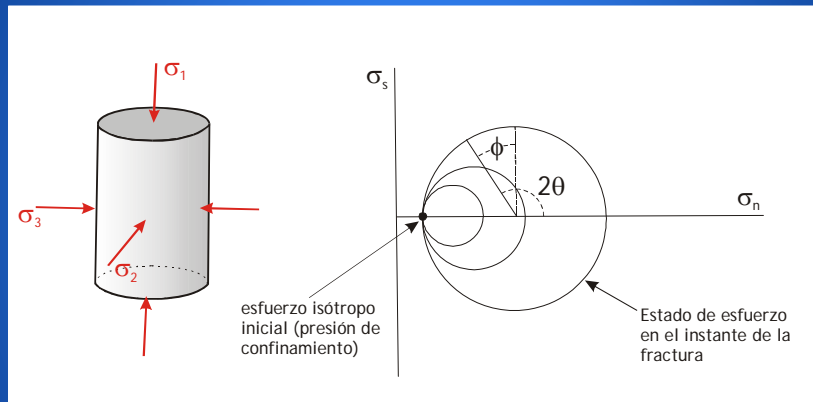
05/05/2016

Henri Masquelin

16



## Círculo de Mohr de los esfuerzos



- Ensayo de rotura experimental para varios incrementos de esfuerzo diferencial.

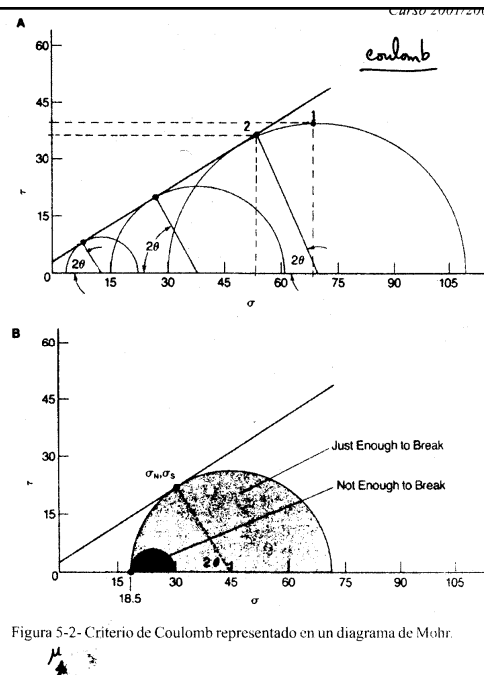
05/05/2016

Henri Masquelin

17

## Comportamiento de Coulomb

- **Diagrama de Mohr:**
  - muestra en qué situación se produce una fractura.
- **Recta de Coulomb:**
  - Comportamiento ideal para una sucesión de ensayos variando esfuerzo diferencial.



05/05/2016

Henri Masquelin

18

## Experimentos de fracturación

- Arena seca consolidada se adapta bien al criterio de Coulomb: **Línea de fracturación**.
- A. Se disminuye en cada ensayo el  $\sigma_3$ .
- B. Se aumenta en cada ensayo el  $\sigma_1$ .

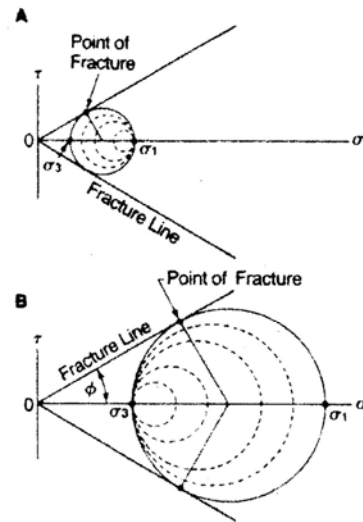
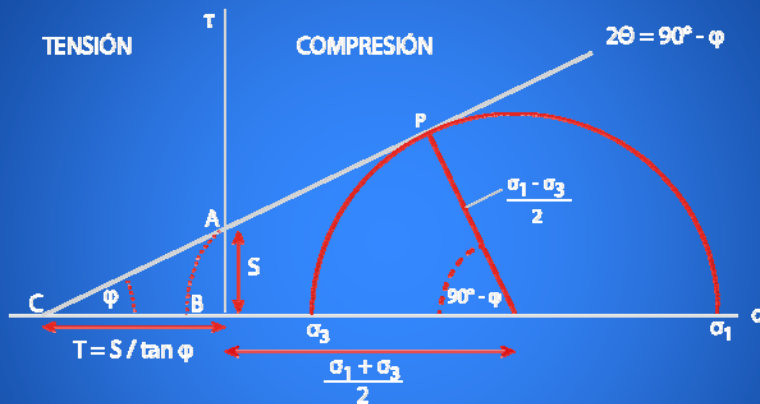


Figura 5-1- Experimentos de fracturación realizados con arena seca (resistencia cohesiva nula).

05/05/2016

Henri Masquelin

## Significado de $\Phi$ , T y S



- Planos de rotura por cizalla siempre forman el mismo ángulo con  $\sigma_1$  ( $2\theta$ );  $\Phi$ : Angulo de fricción o rozamiento interno.
- T: resistencia tensional ; S: resistencia cohesiva

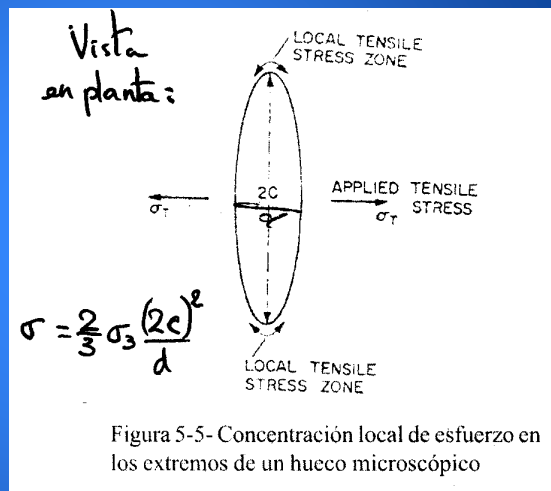
05/05/2016

Henri Masquelin

20

## Comportamiento real

- Rocas reales no siguen exactamente el criterio de Coulomb.
- Se fracturan cuando los valores de  $T$  son la mitad de los valores de  $S$ .



05/05/2016

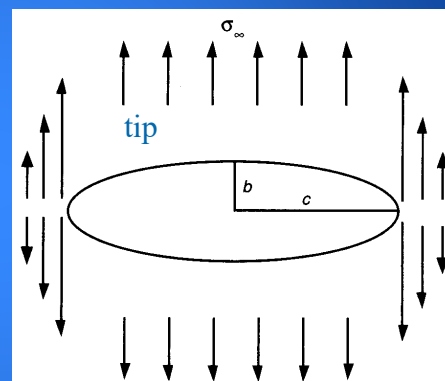
Henri Masquelin

21

## Teoría de Griffith

- Pequeñas fracturas previas con forma elíptica existen en cualquier material natural.
- Esfuerzos se concentran en los límites de propagación superiores en varios ordenes de magnitud al esfuerzo medio (Inglis 1913).
- Balance energético permite determinar si la fractura se propagará o no (Griffith 1920).

$$\sigma \approx \sigma_{\infty} [1+2(c/b)]$$



$$\sigma_f = 2(2E \gamma / \pi c)^{1/2}$$

05/05/2016

Henri Masquelin

22

## Nucleación y propagación

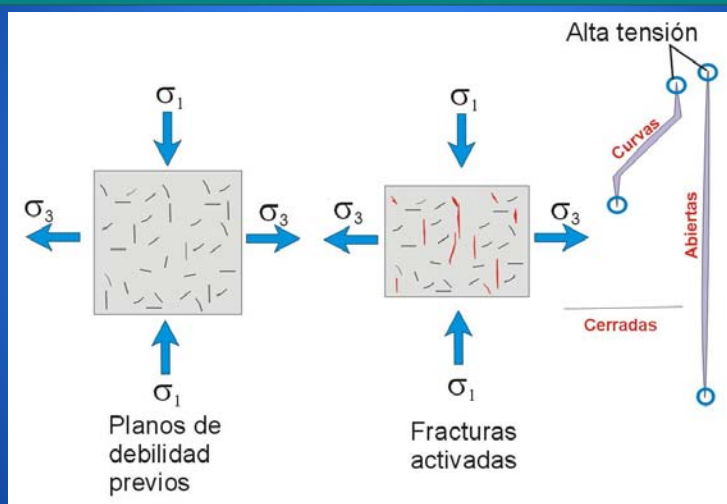
- **Nucleación de una fractura:**
  - Ocurre en discontinuidades naturales entre los objetos (e.g. contactos).
- **Propagación:**
  - Por cisión bajo un esfuerzo diferencial mínimo.
- **Principios de propagación:**
  - Coulomb y Griffith.

05/05/2016

Henri Masquelin

23

## Orientación del límite de fractura en relación a esfuerzos



05/05/2016

Henri Masquelin

24

## Descripción del experimento

- **Fracturas horizontales:**
  - se cierran (pérdida de volumen)
- **Período estable:**
  - esfuerzo elástico sin propagación de fracturas.
- Si  $\sigma_1 - \sigma_3$  más alto:
  - resistencia tractiva superada en los límites de las fracturas orientadas favorablemente (a  $45^\circ$ ):
- **fracturas a  $90^\circ$**  → cerradas.
- **fracturas a  $0^\circ$**  → primeras en abrirse según dirección de  $\sigma_3$ .
- **fracturas inclinadas** → cerradas hasta que luego se propagan en cizalla
  - Determina aumento de volumen.
- **Fracturas se unen entre sí:**
  - atraviesan granos y forman fracturas intergranulares que se unen y anastomosan.

05/05/2016

Henri Masquelin

25

## Criterio de Griffith

- **Curva intrínseca de Griffith:**
  - cruza eje de abscisas en campo tensional
  - función de segundo grado en  $T$ .
- Si  $\tau = 0 \rightarrow \sigma = T$ .

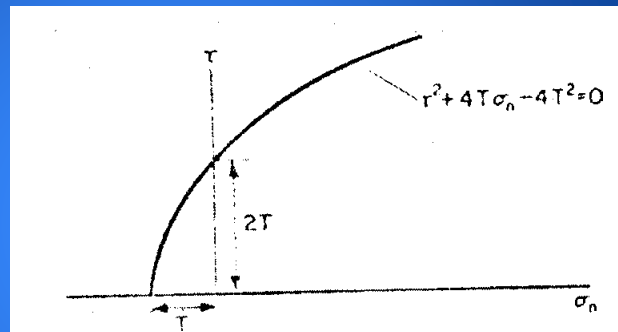


Figura 5-6- Expresión gráfica del criterio de Griffith.

05/05/2016

Henri Masquelin

26

## Griffith: Otros estados de esfuerzo

- El menor de los cuatro ensayos coincide con la resistencia tensional (T).
- Fracturas tensionales en estados triaxiales con un esfuerzo tensional:
  - un único sistema de fracturas orientadas perpendiculares a  $\sigma_3$ .

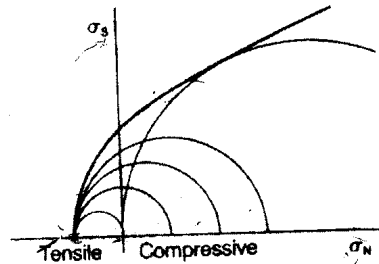


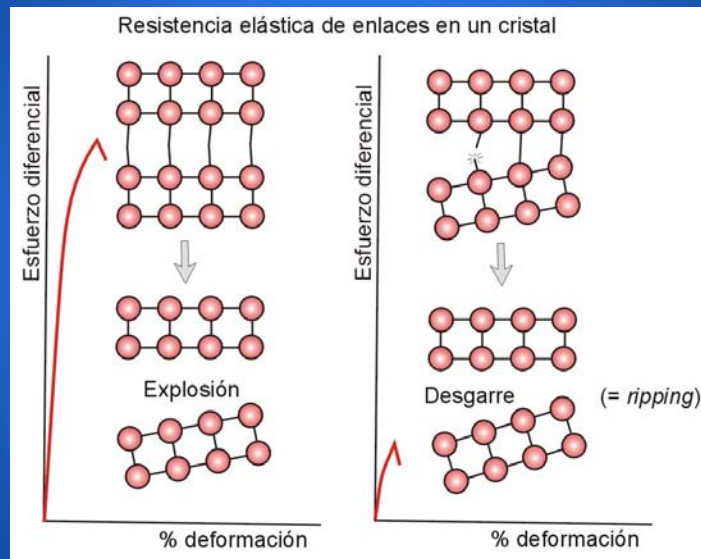
Figura 5-7- Relación entre el criterio de Griffith y distintos estados de esfuerzo.

05/05/2016

Henri Masquelin

27

## Balance energético de la rotura



05/05/2016

Henri Masquelin

28

# Envolvente de Mohr o Curva Intrínseca

1. Envolvente de Mohr
2. Los tres campos de la envolvente de Mohr
3. Coeficiente de fricción para diversas rocas
4. Criterio de Von Mises (plasticidad cristalina)

05/05/2016

Henri Masquelin

29

## Envolvente de Mohr para una diabasa

- **Ensayos de corta duración en prensa triaxial:**
  - Línea de fracturación empírica.
- **Presión confinante:** fija
- Se va aumentando el esfuerzo vertical hasta que la roca rompe.
- Esfuerzo de rotura se registra en una gráfica.

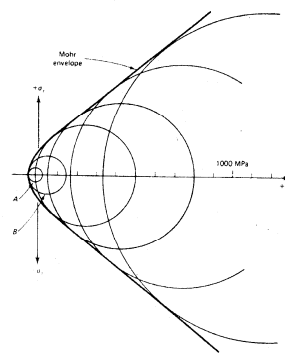


Figura 5-8- Envolventes de Mohr de una diabasa para diferentes esfuerzos ~~de confinamiento~~  
punto en el círculo de Mohr (o dos simétricos, si las fracturas se han producido en dos sistemas conjugados) que representa el plano de fractura. Repitiendo el experimento con muestras diferentes de la misma roca para distintas presiones de confinamiento, se obtienen varios puntos y uniéndolos se obtiene la línea de fracturación.

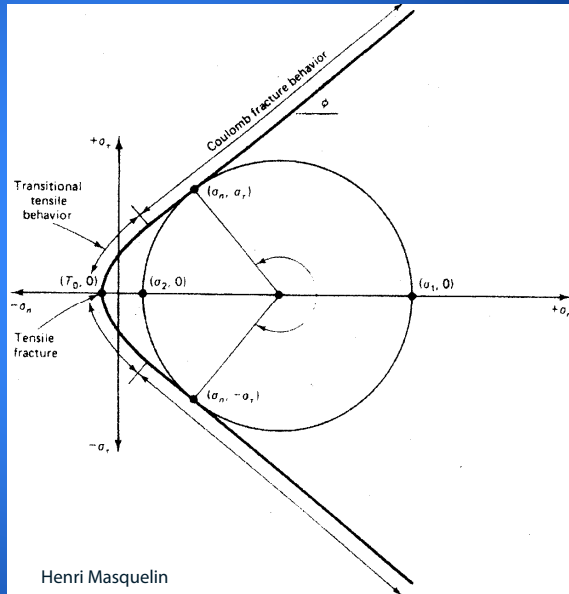
05/05/2016

Henri Masquelin

30

## Tres campos de la envolvente

- **Ramas rectas:** campo de fracturas de cizalla que siguen el criterio de Coulomb.
- **Punto donde la envolvente corta eje ordenadas:** fracturas tensionales
- **Parte curva:** campo tensional transicional (fracturas que en parte son de cizalla y en parte de tensión).



05/05/2016

## Coefficiente de fricción

- **Diversos tipos de roca:**
  - Comportamiento no tan diferente.
- **Gráfico de Byerlee:**
  - $f(S) = T$

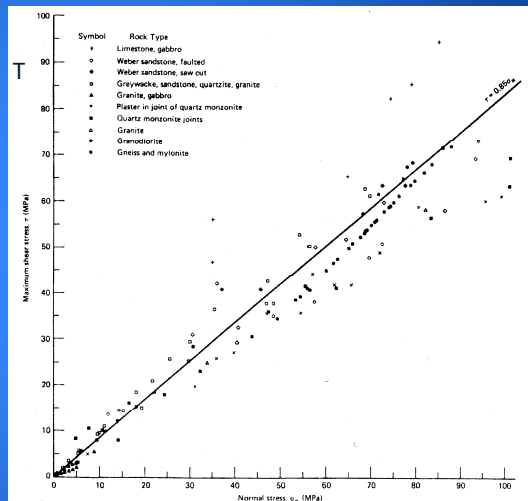


Figura 5-10. Cálculo del coeficiente de fricción para distintas rocas.

05/05/2016

Henri Masquelin

32



## Resistencia plástica (Criterio de Von Mises)

- Esfuerzo mínimo para producir deformación natural permanente.
- Equivale al esfuerzo de cesión plástica

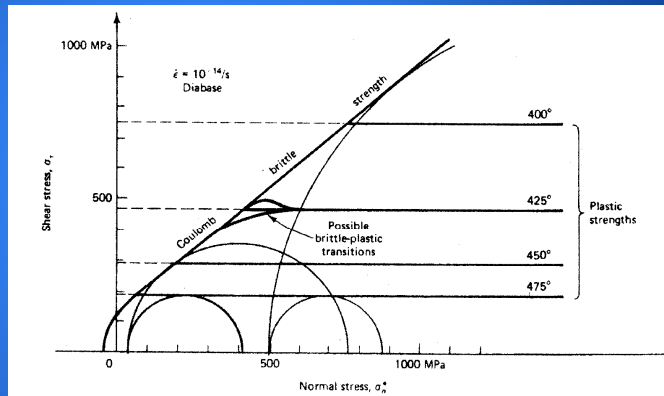


Figura 5-12- Línea de fracturación y resistencia plástica a varias temperaturas para una caliza.

05/05/2016

Henri Masquelin

33

## Factores que controlan la rotura

1. Presión de confinamiento
2. Temperatura
3. Esfuerzo efectivo y esfuerzo diferencial
4. Impregnación fluida
5. Anisotropía previa

05/05/2016

Henri Masquelin

34

## Influencia de la presión confinante

➤ **A mayores presiones de confinamiento:**

- mayores esfuerzos diferenciales para alcanzar límite de resistencia dúctil.

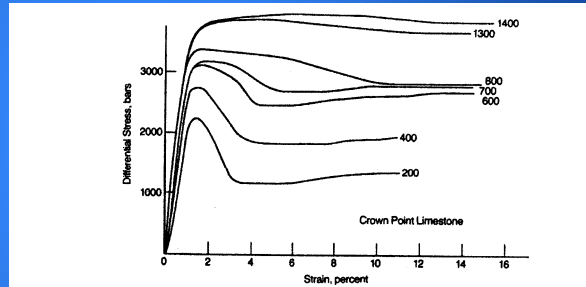


Figura 3-11 - Diagramas de diferentes ensayos de corta duración para la misma caliza a diferentes presiones de confinamiento.

05/05/2016

Henri Masquelin

35

## Influencia de la temperatura

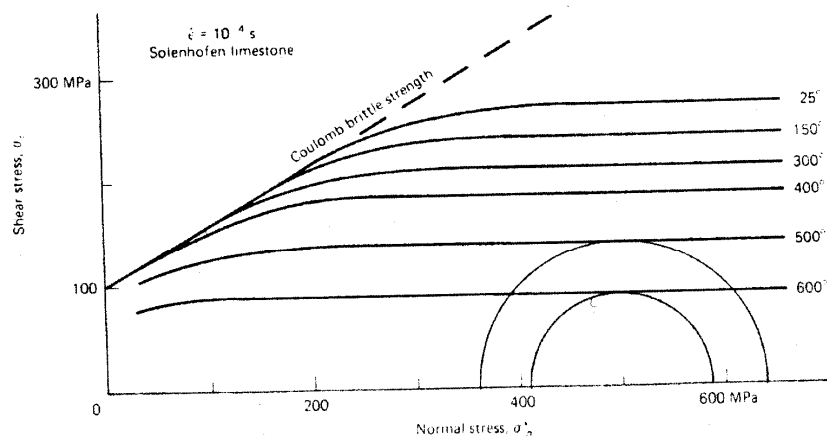


Figura 5-13- Línea de fracturación y resistencia plástica a varias temperaturas para una caliza.

05/05/2016

Henri Masquelin

36

## Influencia del esfuerzo diferencial

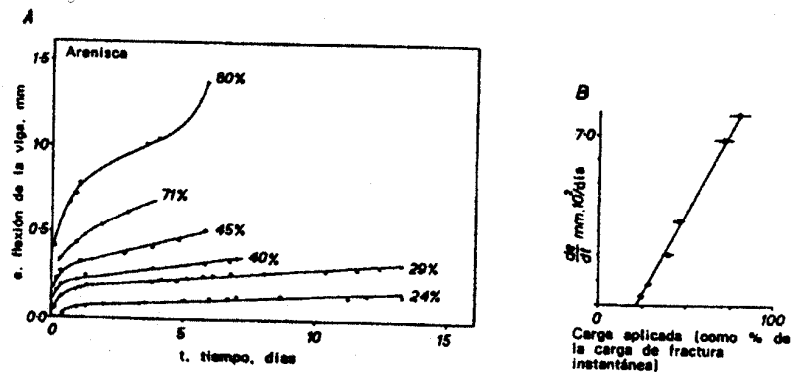


Figura 3-13- Seis ensayos de *creep* realizados con la misma arenisca y distintos esfuerzos.

05/05/2016

Henri Masquelin

37

## Influencia de la impregnación fluida

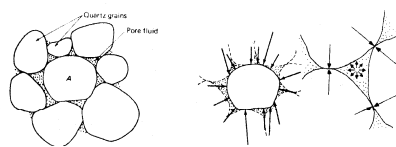


Figura 5-14- Esfuerzos transmitidos por los granos y presión de fluidos (McClure 1975)

- Influencia de la presión de fluidos sobre el círculo de Mohr: **Concepto de esfuerzo efectivo**
- El círculo de Mohr se desplaza hacia la izquierda:  

$$\sigma_1^* = \sigma_1 - P_f$$

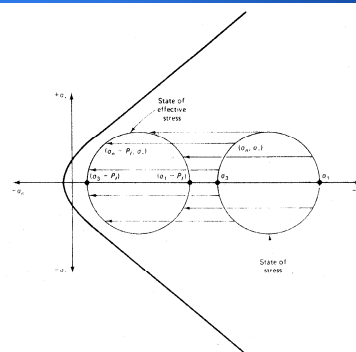


Figura 5-15- Influencia de la presión de fluidos sobre el círculo de Mohr. El concepto de esfuerzo efectivo.

05/05/2016

Henri Masquelin

38

# Influencia de la anisotropía previa

➤ **Dos curvas intrínsecas aparecen:**

- la de la fractura anterior y la de la nueva.

➤ **Las fracturas anteriores:**

- tienden a reactivarse más fácilmente
- la creación de nuevas fracturas depende del patrón anterior

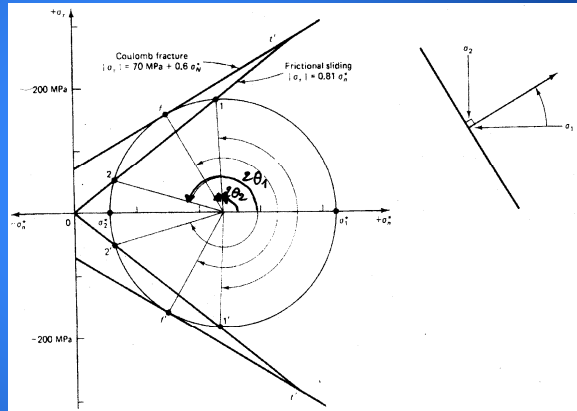


Figura 5-22- Línea de fracturación y línea de deslizamiento friccional (roca ya fracturada) de un arenisca. Cualquier fractura previa orientada entre los puntos 1 y 2 se moverá antes de que se produzca fracturación según los planos f.

05/05/2016

Henri Masquelin

39



05/05/2016

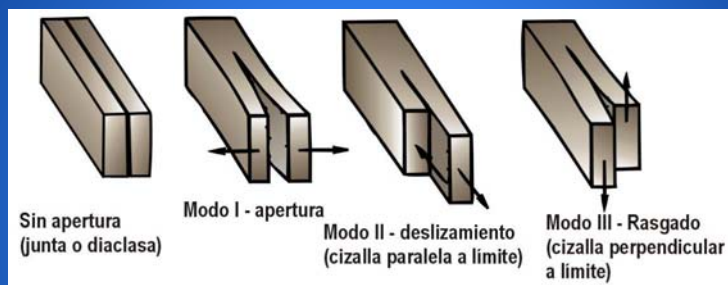
Henri Masquelin

40

## Desarrollo

- **Clasificación cinemática:**
  - Modo de apertura y propagación de fracturas
- **Clasificación dinámica (Anderson)**
  - Fallas normales, inversas y transcurrentes
- **Fracturas de extensión**
- **Diaclasas**
- **Fallas**
- **Procesamiento estadístico de fracturas**
- **Indicadores cinemáticos en fallas**
- **Zonas de cizalla frágiles (Sistema de Riedel)**

## Modos de desplazamiento



- (i) apertura, (ii) propagación, (iii) cizalla (sin torsión y con torsión)
- Modos II y III pueden ocurrir durante la formación de diferentes partes de una misma fractura de cizalla.



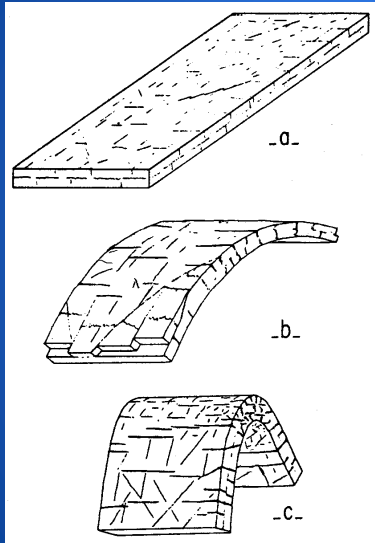
## Juntas o diaclasas

- Superficies de fractura que no implican desplazamiento ni relleno.
- Segmentan la roca en volúmenes groseramente prismáticos (patrón ortogonal).
- Orígenes diversos:
  - retracción térmica
  - relajación frágil de una deformación elástica
  - relajación del esfuerzo isótropo (*i.e.* clivaje o exfoliación pizarrosa).

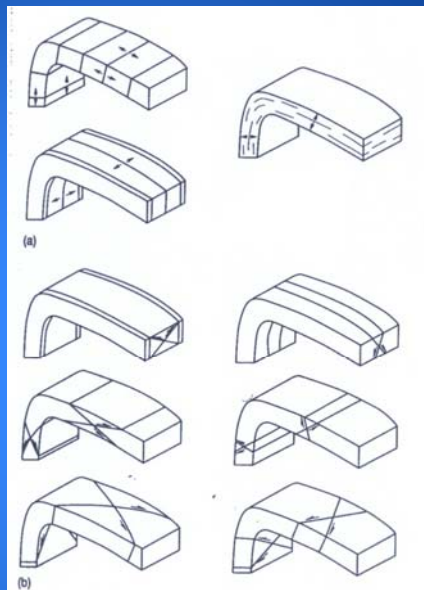
## Retracción térmica



## Relajación



## Relación de pliegues y diaclasas



**FIGURE 8-12** Fold-related joints and shear fractures. (a) Joints forming at different orientations in a fold. (b) Six possible shear-fracture orientations in a fold. (From *Journal of Structural Geology*, v. 7, P. L. Hancock, p. 437-457, © 1985, with kind permission from Elsevier Sciences, Ltd., Kidlington, United Kingdom.)

05/05/2016

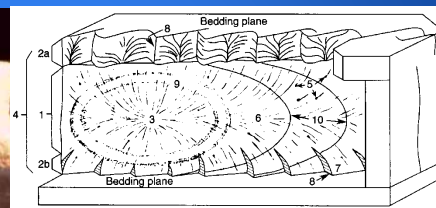
Henri Masquelin

47

## Diaclasas: Estructuras plumosas



Junta con pluma divergente

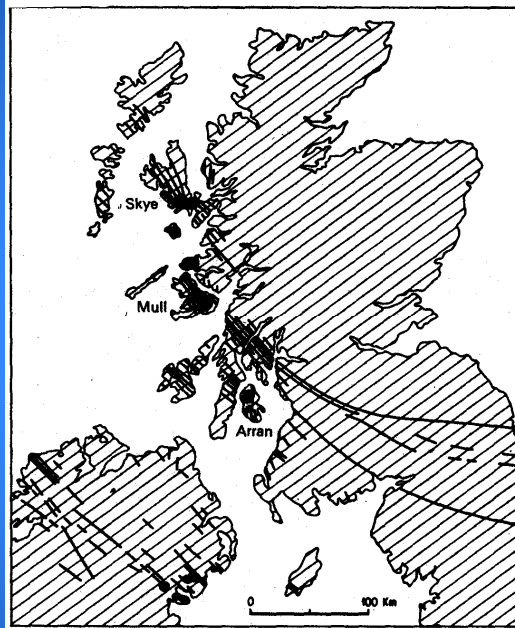


- Detalle de una junta plumosa, mostrando zonas características (cf. Kulander & Dean, 1985).



## Venas

- Haz radial de diques máficos de Mull (Escocia e Irlanda).
- Vinculado con una posible pluma mantélica cenozoica.
- Interacción entre fracturación por dilatación y por estiramiento.



## Fracturas extensionales

Fracturas extensionales recientes (Zagros, Irán)

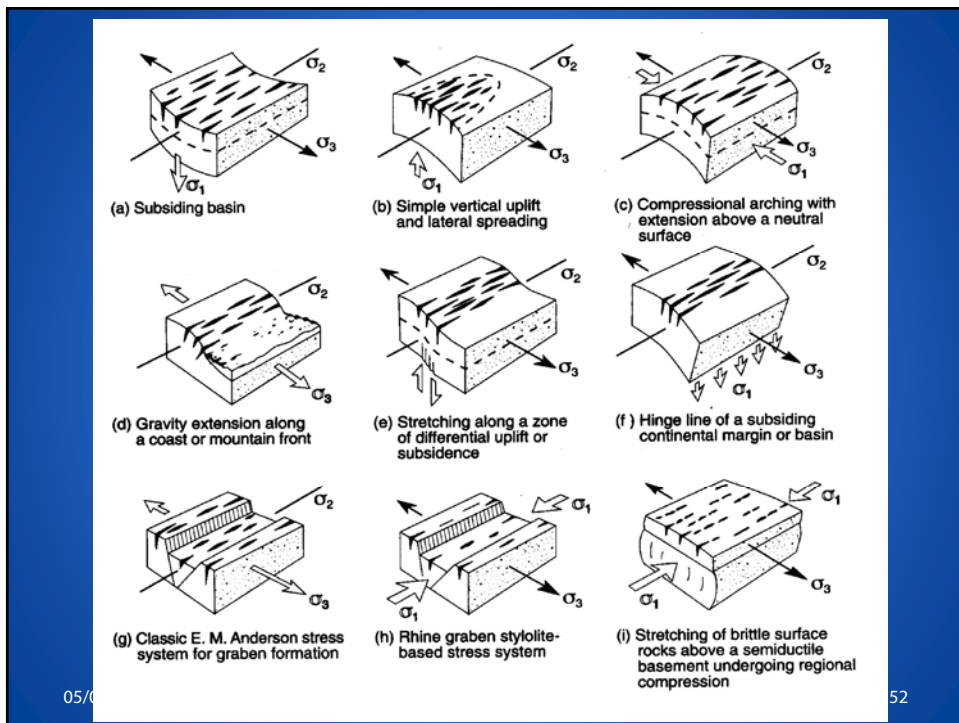


Fracturas extensionales (La Paloma, Uruguay)



Fracturas extensionales sigmoides y escalonadas (Devonshire, Inglaterra)

# Diques = Diaclasas extensionales



### DIACLASAS NO DILATACIONALES

Plana regular

diacnasa curva

Juntas Cerradas

discontinua

- (1) Estilolito por disolución
- (2) Junta plana regular
- (3) Junta curvoplana
- (4) diacnasa direccional
- (5) diacnasa diagonal
- (6) diacnasa de burguiento

### DIACLASAS DILATACIONALES

- (1) Reemplazamiento fibroso
- (2) Abertura libre combada con mineralizaciones y huecos
- (3) Reemplazamiento en mosaico regular
- (4) Karstica
- (5) Junta de extensión normal
- (6) Junta de extensión oblicua

05/05/2016
Henri Masquelin
53

### 4. Peces de fracturas

↑ TRANSCURRENCIA

↓ COMPRESIÓN

↓ EXTENSION

según Henry et al (1982)

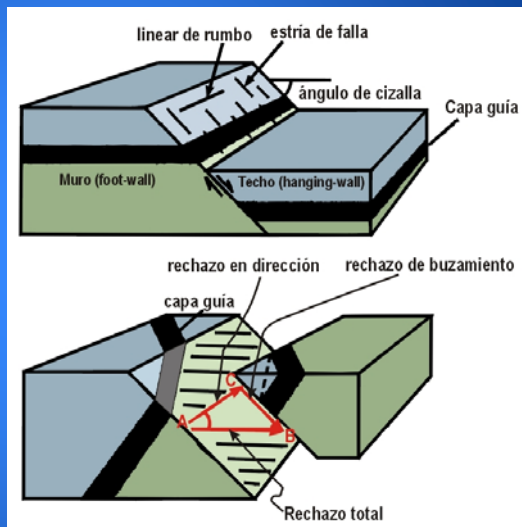
05/05/2016

54



## Componentes del rechazo

- **Falla:**
  - fractura con movimiento de cizalla.
- **Falla normal:**
  - Techo baja
- **Falla normal oblicua:**
  - Traslación de rumbo (AC)
  - Traslación de buzamiento (CB)
  - **Rechazos** medidos en el plano de falla.
  - **Rechazo total** = AB.

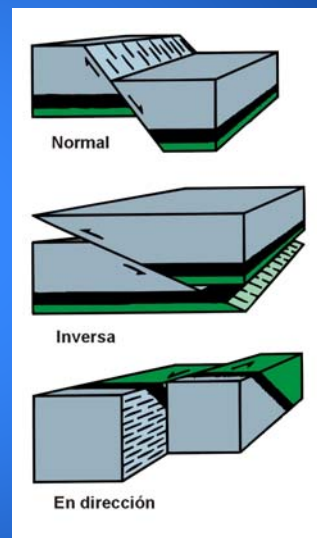


## Fallas conjugadas

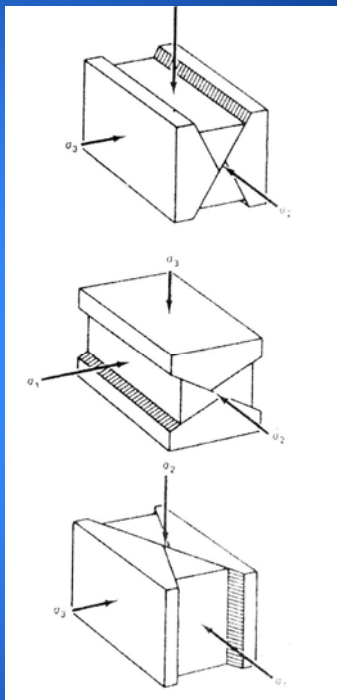


## Clasificación de Anderson

- Asume posición del elipsoide de esfuerzos.
- Uno de los planos principales de ese elipsoide permanece siempre paralelo a la superficie terrestre.



## Relación fallas conjugadas vs. esfuerzos



¿Normal o inversa?



¿Normal o inversa?

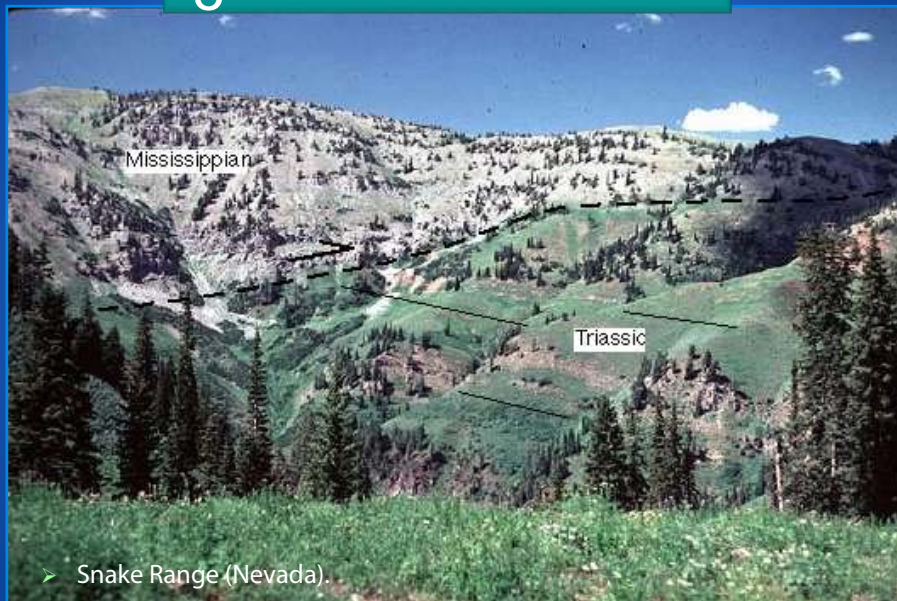


05/05/2016

Henri Masquelin

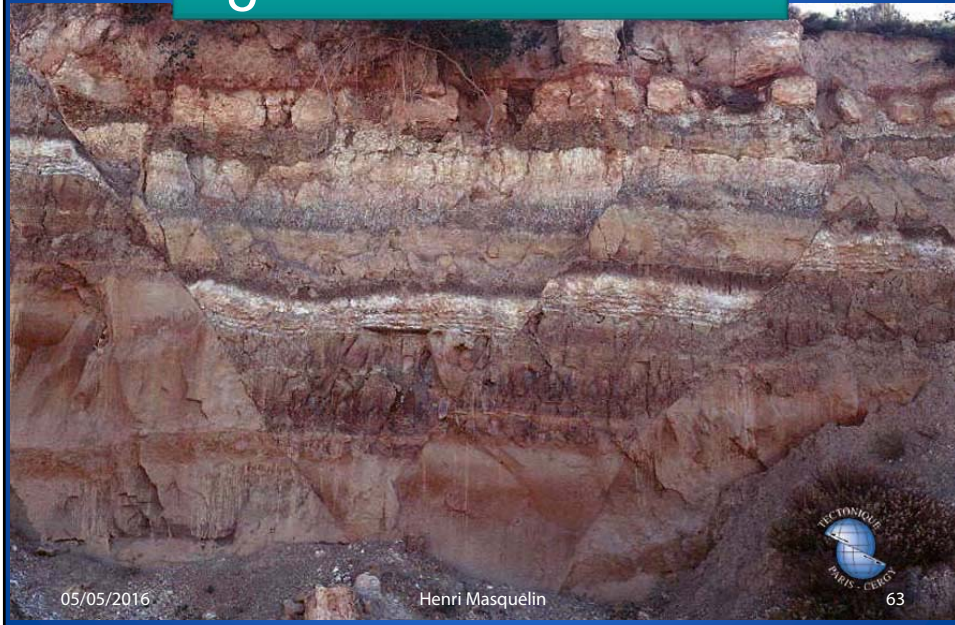
61

¿Normal o inversa?

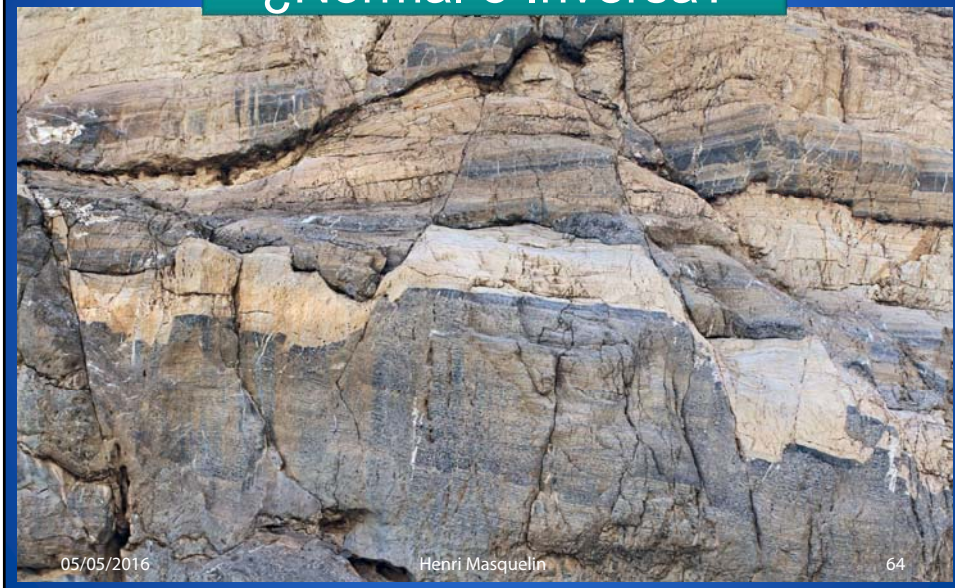


➤ Snake Range (Nevada).

## ¿Normal o inversa?



## Death Valley – Utah: ¿Normal o Inversa?





## Fallas normales de bajo ángulo: “*detachments*”

- Fallas lítricas del Snake Range (Nevada) aprovechan la existencia de cabalgamiento más antiguo ('Basins & Ranges')



## Falla transcurrente



05/05/2016

Henri Masquelin

67

## Fallas transcurrentes



➤ Falla transcurrente de San Andreas (California).

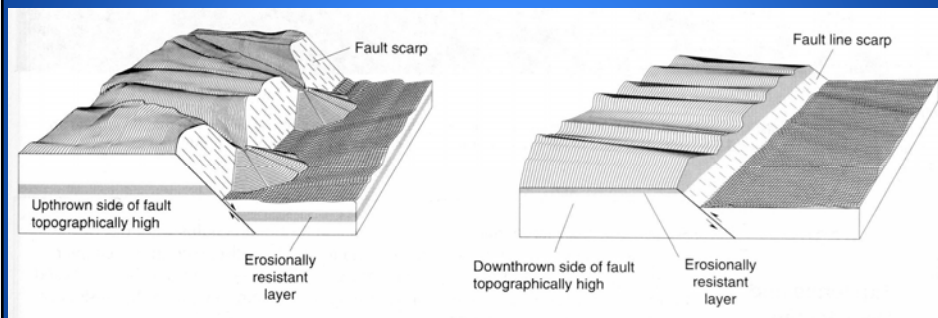




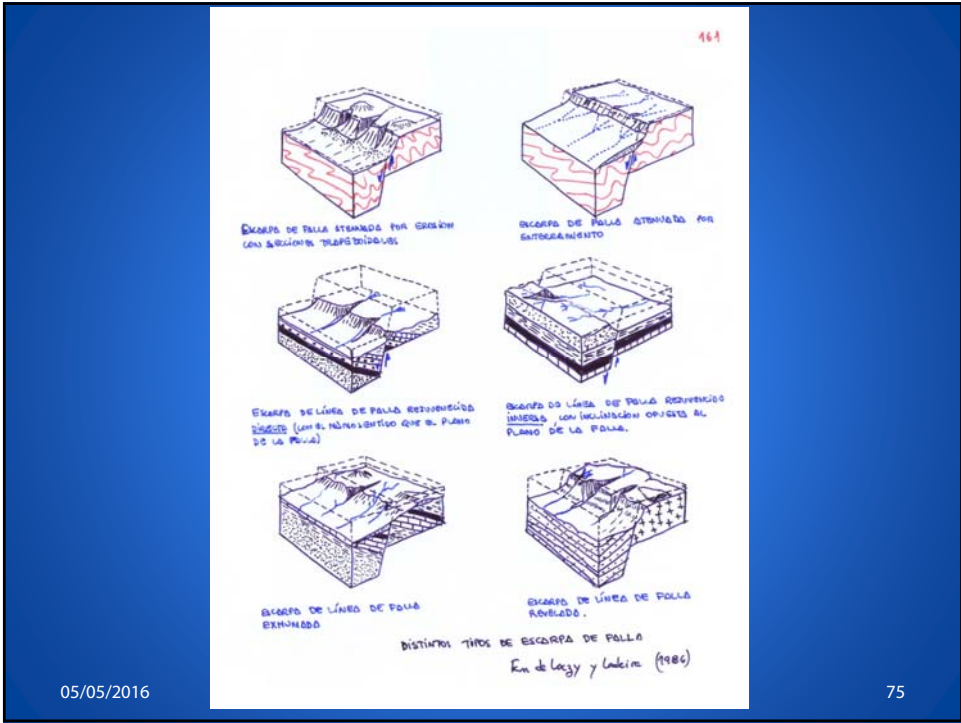
# Efecto topográfico de las fallas

Criterios de morfotectónica

## Efecto topográfico: Erosión y exhumación de bloques



a) Escarpa de falla: Nótese que el bloque subido de esta falla se encuentra topográficamente elevado; b) Bloque aparentemente subido cuando en realidad fue bajado pero mantenido topográficamente arriba debido a la resistencia erosiva de una capa resistente.



## Análisis estadístico de fracturas

# Representación Estereográfica

## STRUCTURAL GEOLOGY: FOLDS AND FRACTURES

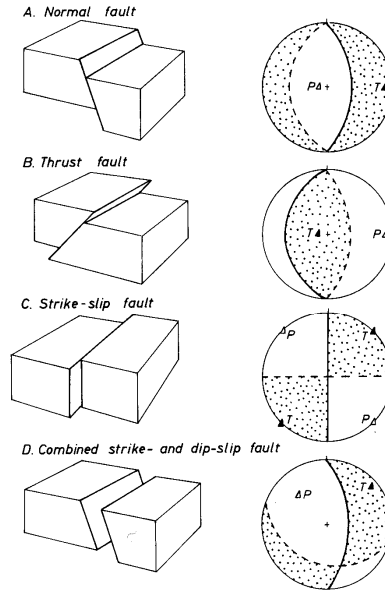


Figure 25.26. Fault plane solutions and their relationship to main types of faults.

# Procesamiento estadístico

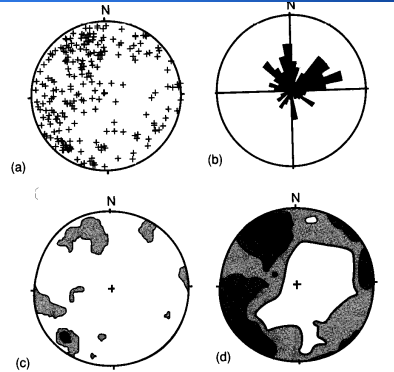
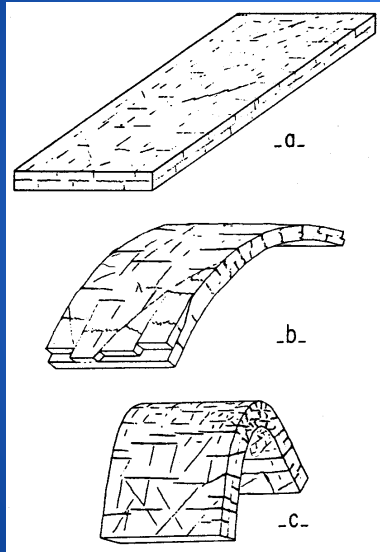
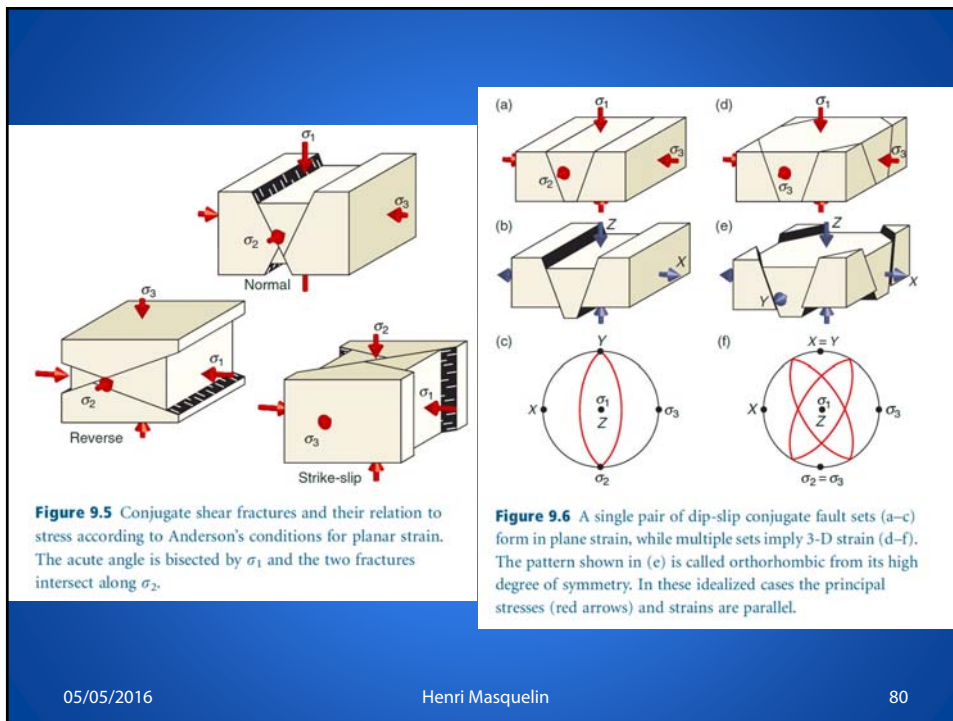


FIGURE 8-9 Lower-hemisphere, equal-area plots and rose diagrams of orientations of joints in the Blue Ridge Foothills near Pigeon Forge, Tennessee. (a) Point diagram of 256 poles to joints. (b) Rose diagram of strikes of joints. The circle diameter represents 10% of the population. (c) Percent per 1 percent area contour diagram of (a). (d) Kamb contour diagram of (a). Contour interval 2 sigma. (See Appendix 1 for plotting and contouring techniques.)

# Análisis cinemático de fallas



05/05/2016

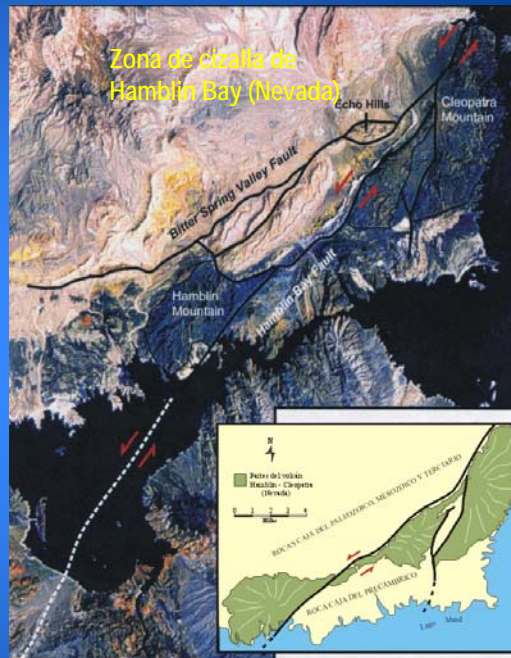
Henri Masquelin

80

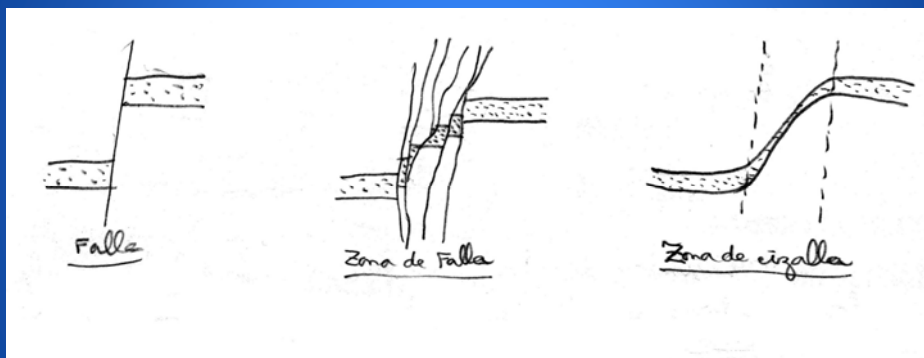


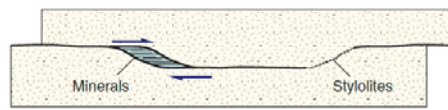
## Sentido de cizalla

- Reconocimiento de objeto que permite determinar **sentido de cizalla** y **cuantificar el desplazamiento**:
  - Volcán Hamblin / Cleopatra
  - Cortado al medio por una falla transcurrente

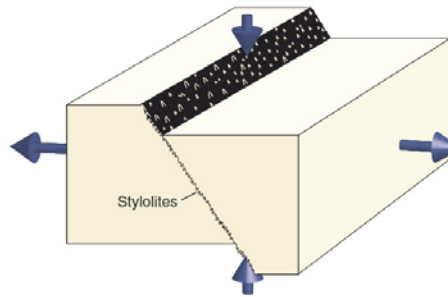


## Desplazamientos





**Figure 9.1** Irregularities along a fault create steps where mineral growth or shortening structures (stylolites) can form. The localization of such structures relative to the local fault geometry gives reliable information about the sense of slip.



**Figure 9.2** Faults with a component of shortening across the fault surface can result in pressure solution and stylolite formation in limestone and marble. Linear stylolitic structures sometimes form, called slickolites. Slickolites form a lineation that parallels the movement direction quite precisely.

05/05/2016

83

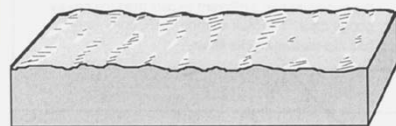
## Espejo de falla y estría

### Striated P-Surfaces

These features were first described by Petit (1987). The fault plane is only partially striated, and the striations only appear on the up-flow sides of asperities.

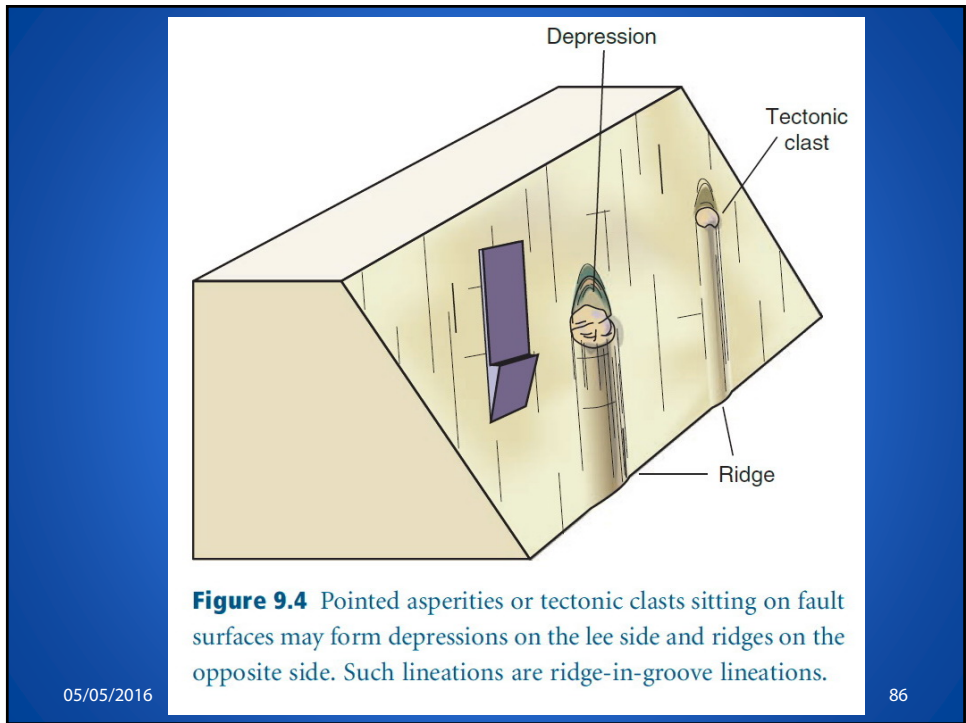
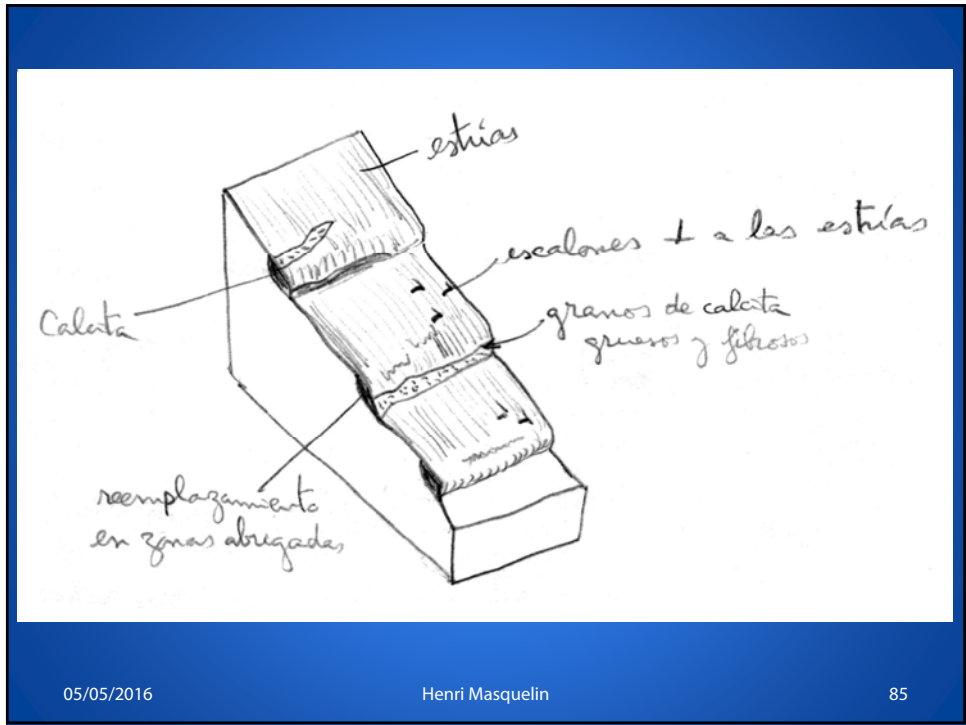


**"PT"-Type (top & middle):** ~ planar, non-striated surfaces dip gently into the wall rock. Petit (1987) calls these "T" surfaces because of lack of evidence for shear, but they commonly form at angles more appropriate for R shears. Striated P surfaces face the direction in which that block moved. Step steps developed locally at intersection between P and T. P surfaces may be relatively closely spaced (top) or much farther apart (middle).



**"PO"-Type (bottom):** T surfaces are missing entirely. Striated P surfaces face in direction of movement of the block in which they occur. Lee side of asperities are unstriated.

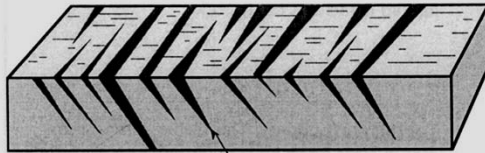
diagrams modified after Petit (1987)



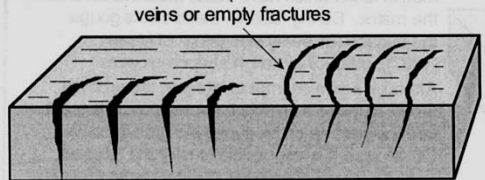
# Fracturas no estriadas

## Unstriated Fractures ("T fractures")

Although "T" refers to "tension" it is a mistake to consider these as tensile fractures. They commonly dip in the direction of movement of the upper (missing) block and may be filled with veins or unfilled.



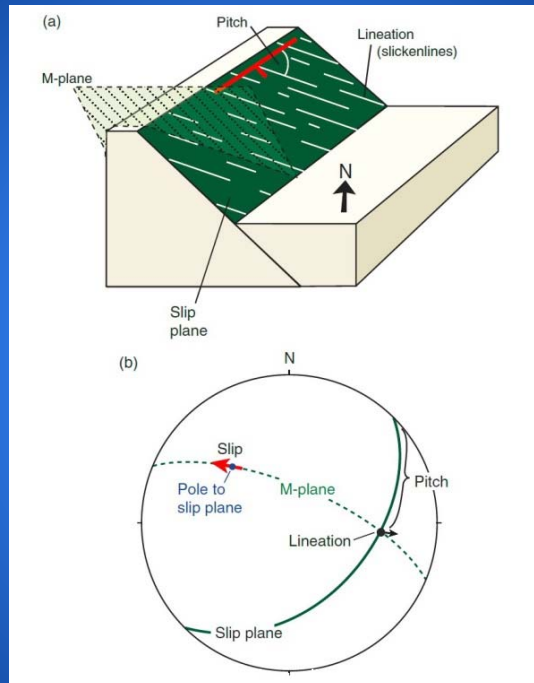
**"Tensile Fractures" (top):** If truly tensile in origin and formed during the faulting event, these should initiate at 45° to the fault plane and then rotate to higher angles with wall rock deformation. Many naturally occurring examples are found with angles between 30° and 90°. They are referred to as "comb fractures" by Hancock and Barka (1987).



**Crescent Marks (bottom)** Commonly concave in the direction of movement of the upper (missing) block. They virtually always occur in sets and are usually oriented at a high angle to the fault surface. They are equivalent to the "crescentic fractures" formed at the base of glaciers.

diagrams modified after Petit (1987)

[sense of shear is top (missing) block to the right in all the diagrams on this page]



05/05/2016

88

