



4. Reología de las rocas

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Reología

- Estudio de las propiedades físicas de los materiales **sólidos, líquidos y gaseosos**.
 - Deriva del griego "*rheo*" que significa "*que fluye*"
 - Filósofo Heráclito decía: "*Panta Rhei*" ("*todo fluye*") al referirse a que todo está en constante cambio.
 - Cuando las rocas a **temperatura elevada** fluyen **por debajo del punto de fusión** (no son magma) estas acumulan deformación progresiva sin que se produzcan fracturas.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Reodo

- Sustancia que puede **fluir** deformándose por debajo de su temperatura de fusión (no es estrictamente un sólido): T_ε / T_f
- Analogías mecánicas:
 - **Comparación** con los elementos mecánicos de comportamiento ideal.
 - **Ecuaciones constitutivas** relacionando esfuerzo con deformación.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Definición: Reología

- Estudio de la **deformación y flujo** de sustancias fluidas cuando sometidas a un campo de esfuerzos externo.
- Parte de la **mecánica de medios continuos** cuya doctrina fue iniciada por Bingham (1929) para encontrar **ecuaciones constitutivas** que permitan modelar el comportamiento de los materiales.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Método de la reología

- A través de la observación y el conocimiento de las leyes del comportamiento físico teórico, se desarrolla una **relación constitutiva** o **modelo matemático** que permite obtener las **funciones materiales** que caracterizan una sustancia.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Propiedades reológicas

- **Viscosidad** (coeficientes reológicos).
- **Elasticidad** (sustancias almacenan energía).
- **Relajación** (cambian sus propiedades a través del tiempo).
- **Memoria reológica.**

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

En términos absolutos

- **Cualquier sustancia** puede ser tratada como un fluido.
- Las **rocas** pueden ser consideradas como **fluido** a lo largo de un **tiempo geológico lo suficientemente grande** para que estas puedan acomodar la forma de manera continua (**sin pérdida de cohesión interna**).



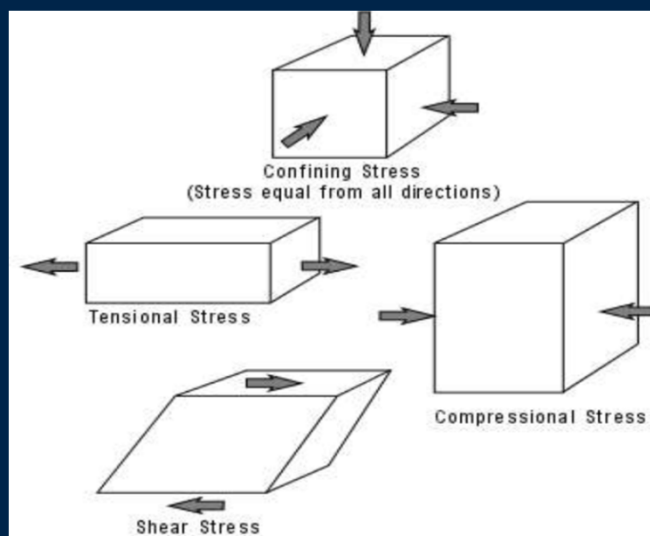
"Relojes Blandos o la persistencia de la memoria"

Salvador Dalí (1931).

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Tipos de esfuerzos



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

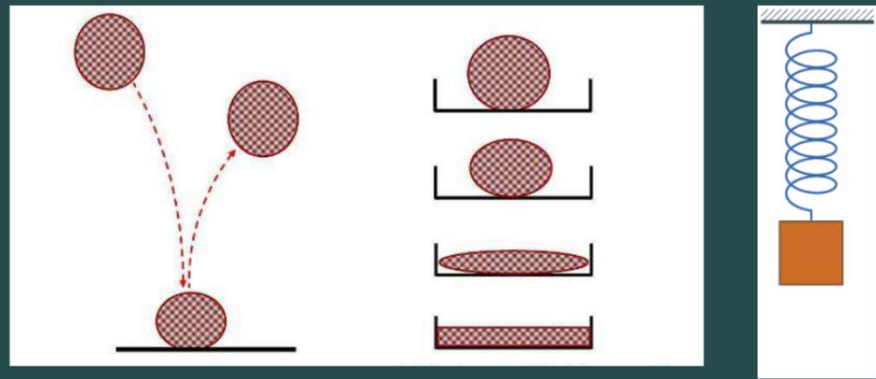
Tipos de comportamiento ideal

- **Elástico**
 - Cuerpo de Hooke
- **Viscoso**
 - Cuerpo de Newton
- **Plástico**
 - Cuerpo de St Venant

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Deformación elástica



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

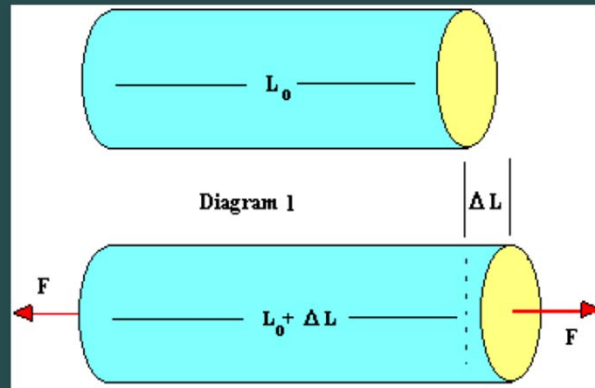
Sólido elástico

$$\tau = E \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$$

$$\tau = F / A$$

τ = tensión o stress

E = modulo de Young



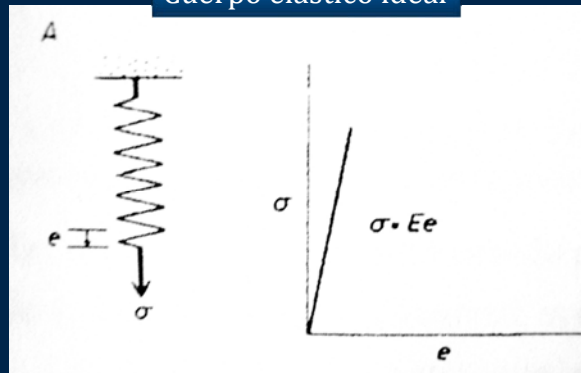
31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Cuerpo de Hooke

Cuerpo elástico ideal

- Resorte al que se le aplica un esfuerzo σ para producir una deformación e no permanente.



Línea recta expresa que hay una variación constante y proporcional entre el esfuerzo y la deformación: **comportamiento elástico**

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Propiedades elásticas

- Deformación elástica es:
 - Instantánea
 - Proporcional al esfuerzo
 - Al cese del esfuerzo, el cuerpo retoma su forma inicial, la deformación desaparece.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Tipos de elasticidad

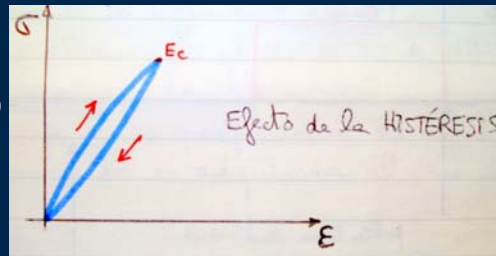
- Elástico lineal (ideal):
 - ϵ proporcional al esfuerzo.
- Elástico perfecto:
 - Misma curva de incremento de deformación que de retorno.
- Elástico con histéresis:
 - Curva de retorno tiene un retardo para alcanzar la forma inicial debido a la fatiga del material.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Histéresis

- Cuerpos elásticos no ideales experimentan un cierto retardo en retornar a la forma inicial luego de cesado el esfuerzo.
- Se denomina histéresis.



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

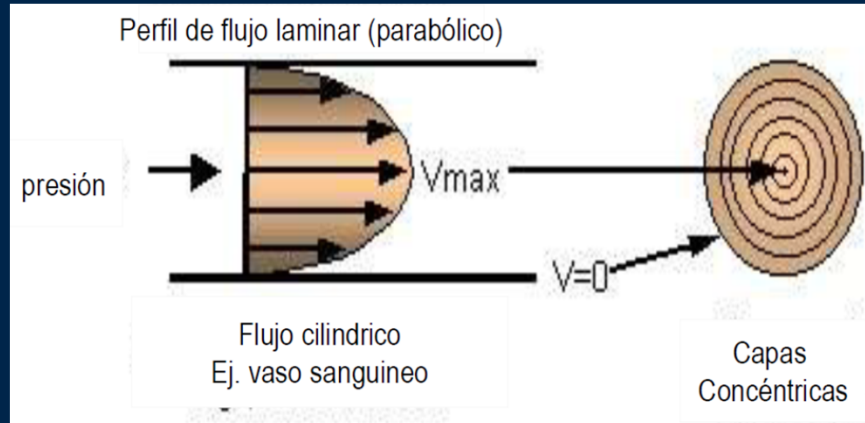
Por encima del límite elástico...

- ¿Qué ocurre si aplicamos cada vez más esfuerzo a una roca elástica?
- La muestra:
 - Va a romperse...
 - Va a cesar de deformarse elásticamente
 - Puede continuar deformándose de manera permanente (más rápido que el incremento de esfuerzo)

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Deformación viscosa

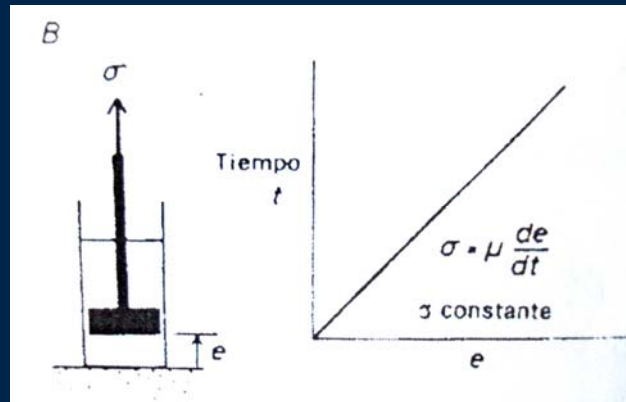


31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Cuerpo de Newton

- **Pistón** conteniendo aceite al que se le aplica un **esfuerzo σ** y en el que se produce una **deformación e permanente**.



Cuerpo viscoso ideal

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Propiedades viscosas

➤ Deformación:

- **Inmediata** pero luego **progresiva**
- **Proporcional al esfuerzo**
- **Adquirida** al cese del esfuerzo
- Su acumulación depende de la **duración**

31/03/2017

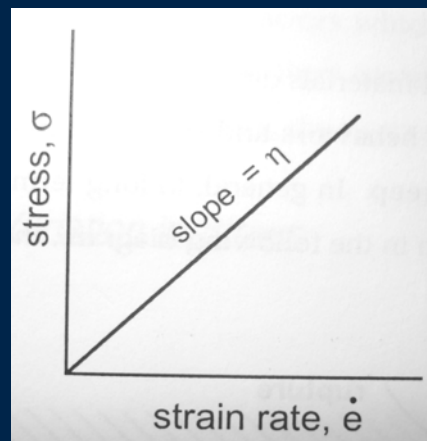
Dr. Henri Masquelin

Viscosidad

➤ Tasa de deformación:

- Proporcional al esfuerzo
- Inversamente proporcional al coeficiente de viscosidad η .
- Caso de **flujo newtoniano**.

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$



La pendiente de la curva es la viscosidad "eta": es la medida de la resistencia al flujo uniforme y no turbulento

31/03/2017

Un material viscoso

- **Alta viscosidad** → flujo muy lento.
- **Baja viscosidad** → flujo rápido.
- Si la curva es una recta el flujo es **Newtoniano**.
- De lo contrario es **no Newtoniano**.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Viscosidad para fluidos comunes

Sustancia	Viscosidad @ 20 °C (mPa.s)
Aire	0,01
Agua	1
Querosén	10
Crudo 25 °API	100
Glicerina	1000
Miel	10.000
Crudo 8 °API	500.000 @ 20 °C 3.000 @ 60 °C
Asfalto	10 ¹¹
Vidrio	10 ⁴³

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Deformación plástica



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

COMPORTAMIENTO PLÁSTICO: Los materiales no se deforman en absoluto hasta que el esfuerzo aplicado alcanza un cierto valor. Una vez alcanzado ese valor o **esfuerzo de cesión**, el cuerpo se deforma de manera continua hasta que el esfuerzo sea retirado o disminuya, en cuyo caso la deformación alcanzada permanece, es decir, el cuerpo no se recupera en absoluto.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k \quad (k: \text{constante para material perfectamente plástico})$$

El cálculo de la deformación plástica es el más complicado de realizar en las rocas debido a la falta de relación proporcional entre esfuerzo y deformación



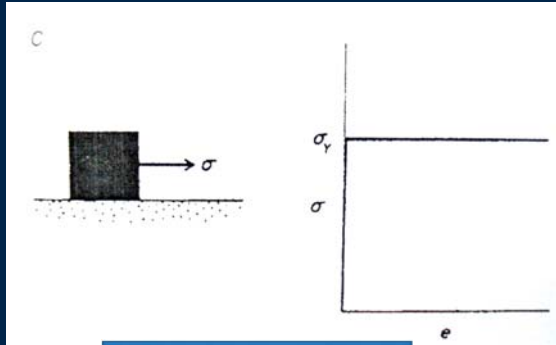
El material plástico perfecto fluye sólo después de que cierto límite de esfuerzo es alcanzado (esfuerzo de cesión)

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Cuerpo de St Venant

- Ladrillo arrastrado sobre una superficie sometido a un esfuerzo σ para producir un desplazamiento (deformación) e a partir de un cierto **valor crítico de cesión**.



Cuerpo plástico ideal

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

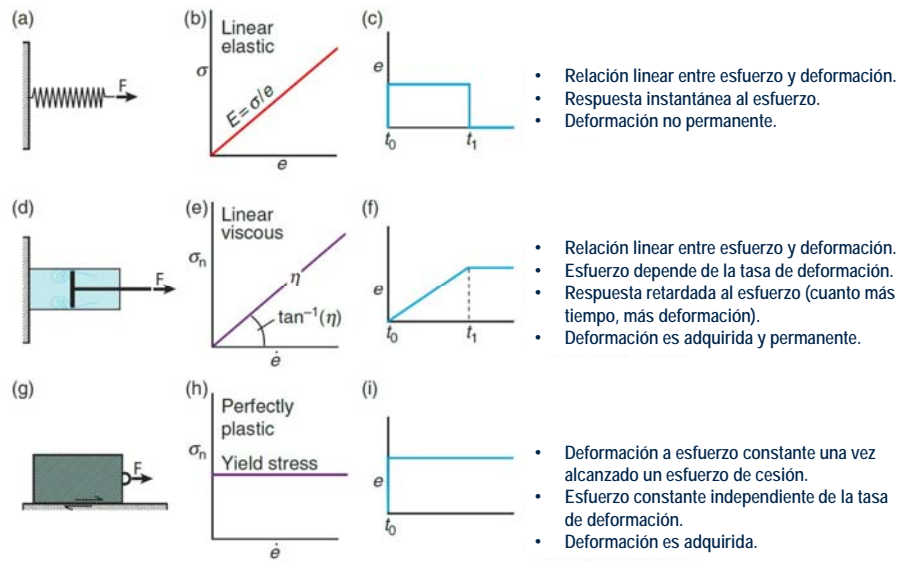
Propiedades plásticas

- Deformación:
 - No ocurre nada hasta que el esfuerzo alcanza un **cierto valor** (de **cesión** que depende del **coeficiente de rozamiento entre los materiales**)
 - Es **progresiva** a partir de haber alcanzado el esfuerzo de cesión.
 - **Continúa** pese a que se mantenga el esfuerzo constante en ese valor.
 - Es **adquirida** al cese del esfuerzo.

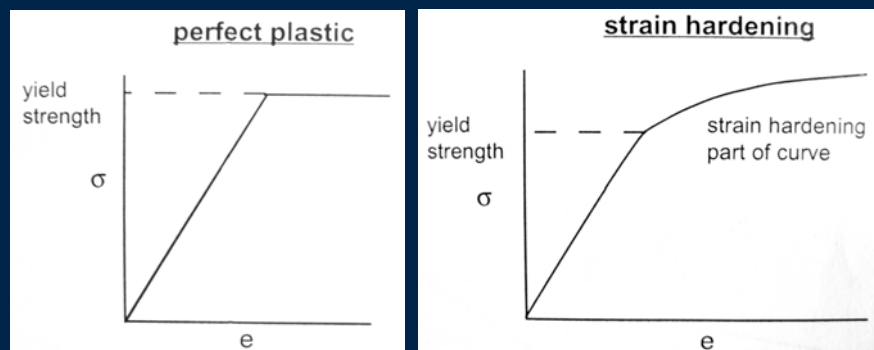
31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

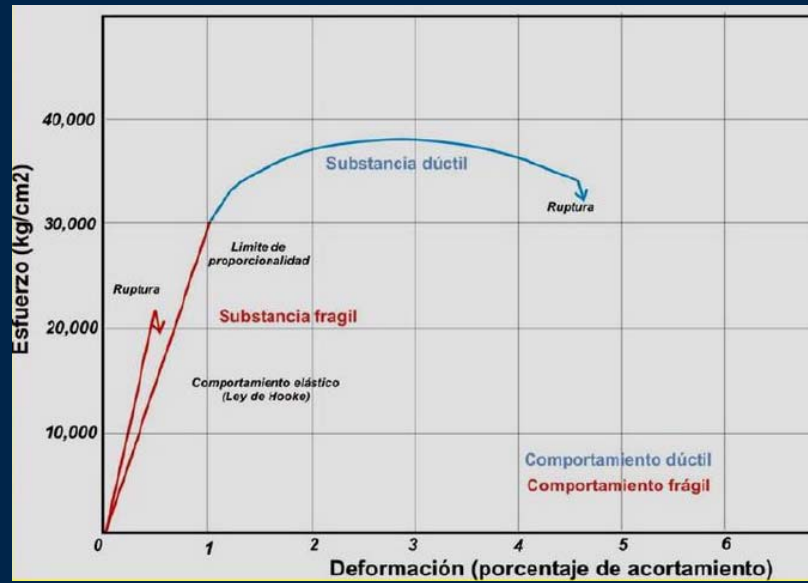
Curvas tiempo vs. deformación



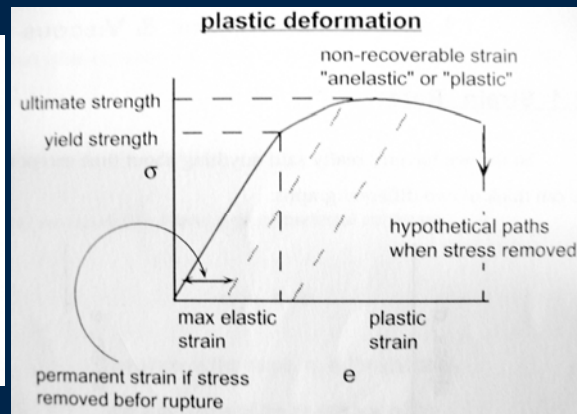
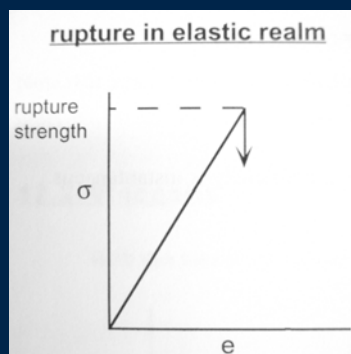
Dos tipos de deformación permanente



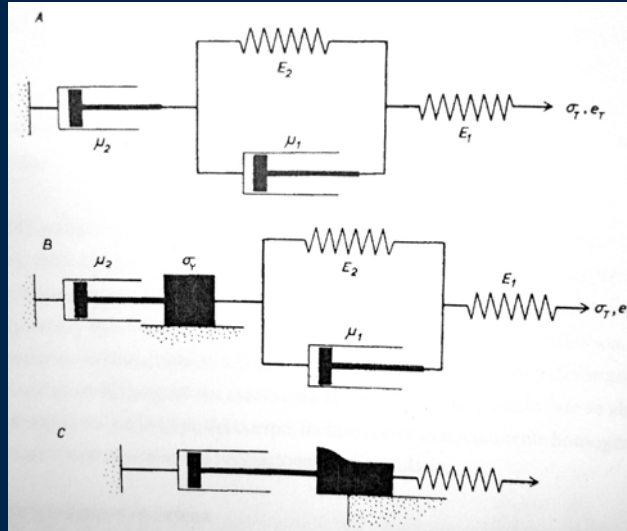
Esfuerzo vs. deformación



Pasado el límite elástico



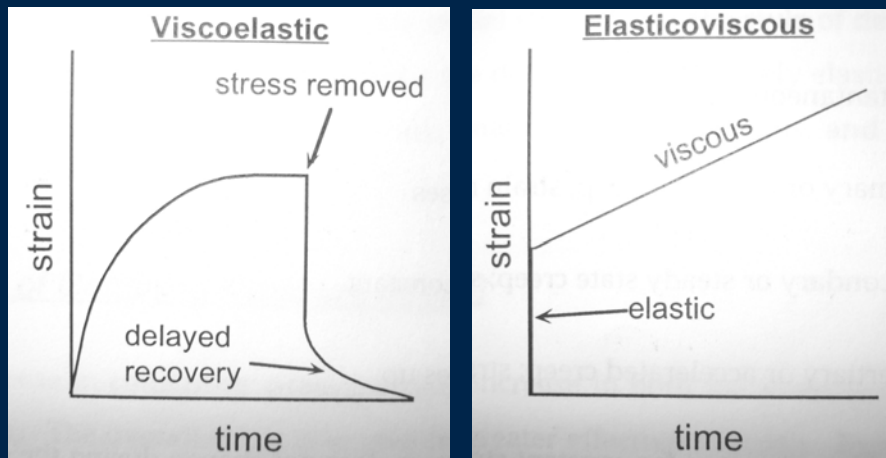
Cuerpos ideales combinados



31/03/2017

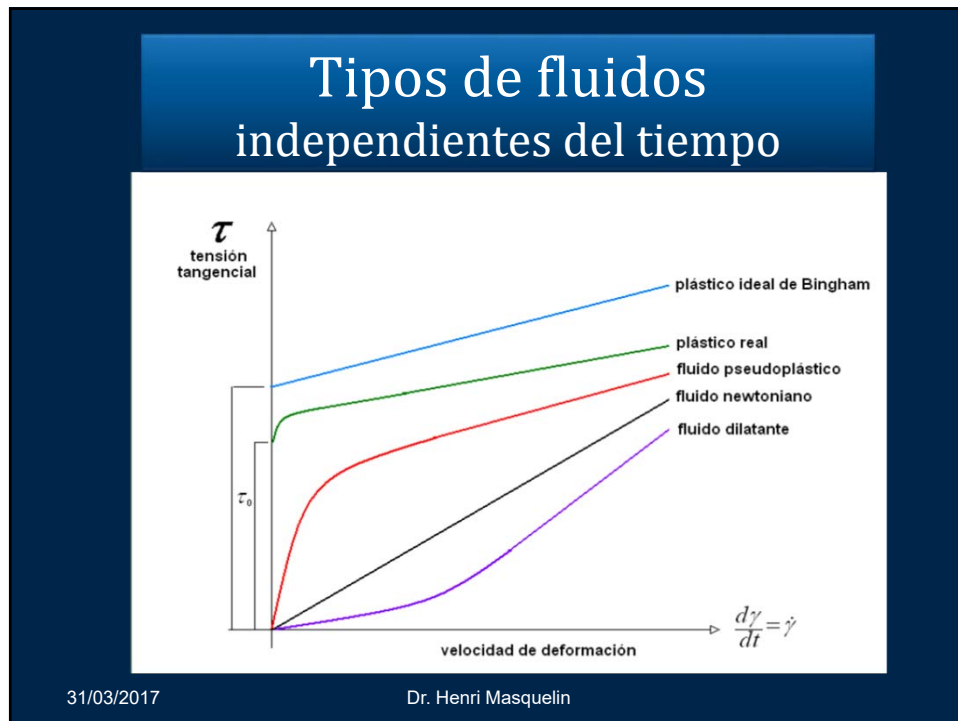
Dr. Henri Masquelin

Comportamientos combinados



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin



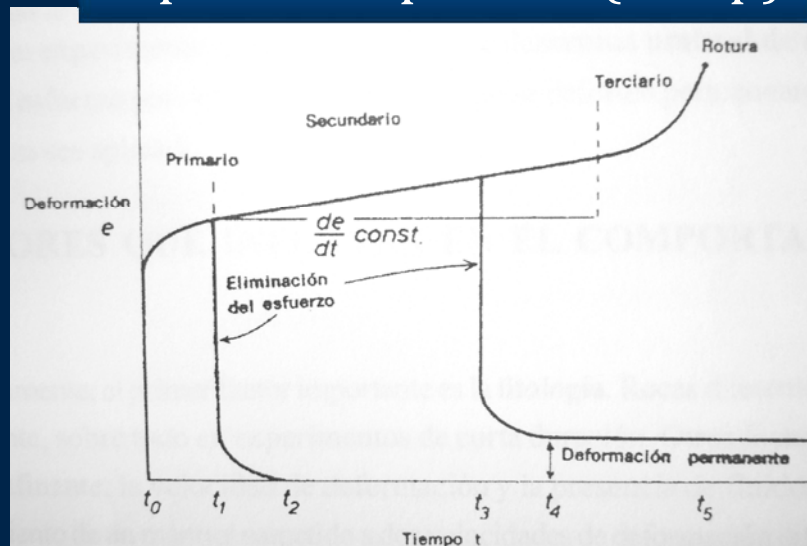
Definición de “Creep”

- El “*creep*” (*reptación*) es la deformación plástica de un material que está sujeta a un esfuerzo constante y persistente mientras este material se encuentra en una **alta temperatura homóloga** (T_H).
- T_H es el cociente entre la temperatura en la que se encuentra el material (T) y su **temperatura de fusión** (T_F) (en °Kelvin).

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Tipos de Reptación (creep)



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

 σ constante

Partes de la gráfica

- 0 – Deformación elástica **instantánea**
- I – reptación primaria o **transitoria** (tasa de strain **decrece**)
- II – reptación secundaria o **estacionaria** (tasa de strain es **constante**)
- III – reptación terciaria o **acelerada** (tasa de strain **varia**):
 - si disminuye → **ablandamiento de strain**
 - si aumenta → **endurecimiento de strain**

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin



Factores que afectan el comportamiento reológico

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

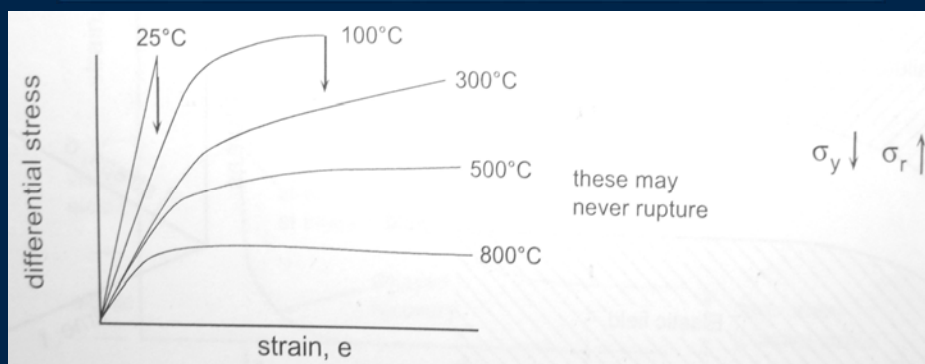
Factores físicos que influyen en el comportamiento

- Temperatura
- Tasa de deformación
- Presión confinante
- Variación del esfuerzo diferencial
- Presencia de fluidos de impregnación
- Anisotropía previa

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Influencia de la temperatura



- Al aumentar la temperatura se reduce el **esfuerzo de cesión** o de elasticidad y se incrementa el esfuerzo de rotura.
- Al aumentar T se ensancha el **campo de dominio plástico**.

31/03/2017

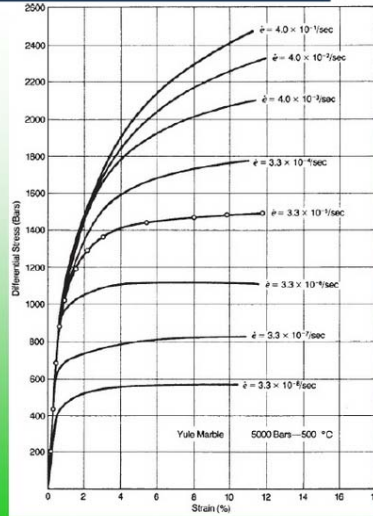
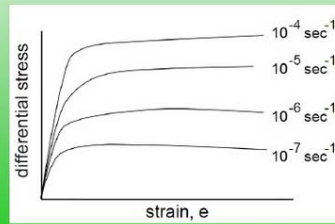
Dr. Henri Masquelin

Influencia de la tasa de deformación (velocidad)

TIEMPO/VELOCIDAD:

Al decrecer la tasa de deformación, se reduce el esfuerzo de cesión.

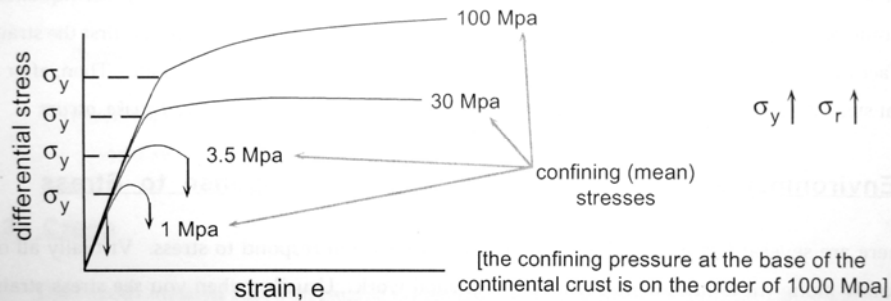
A mayor tasa de deformación la roca se comporta más fuerte, es decir mayores esfuerzos de cesión y de ruptura



3

p.e., el dato no lo hace el proyector, sino la velocidad con que se lee. Deformación de oralesos. Un granito sometido a una deformación rápida, transmite la energía, pero no se rompe (terremoto). Si el mismo granito, se somete a un esfuerzo bajo, pero continuo (largo tiempo) se rompe (se deforma con los sismos)

Influencia de la presión de confinamiento

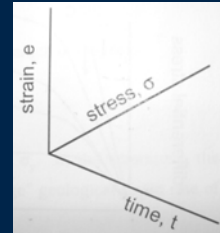
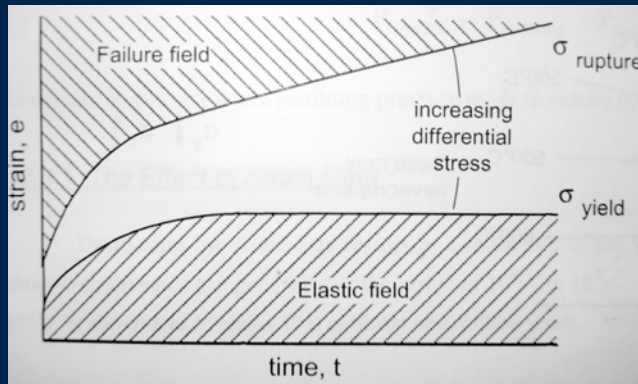


- Aumenta la **resistencia efectiva** de la roca.
- A mayor profundidad el **esfuerzo diferencial es menor**.
- Las **fracturas** predominan cerca de la superficie y se **enrarecen en profundidad**.

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Efecto de la variación del esfuerzo



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

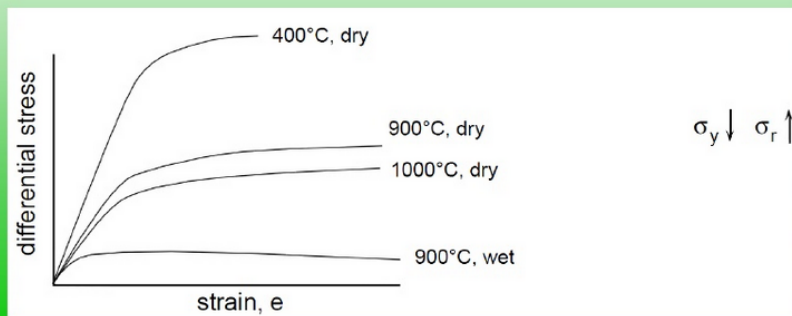
Influencia de presencia de fluidos

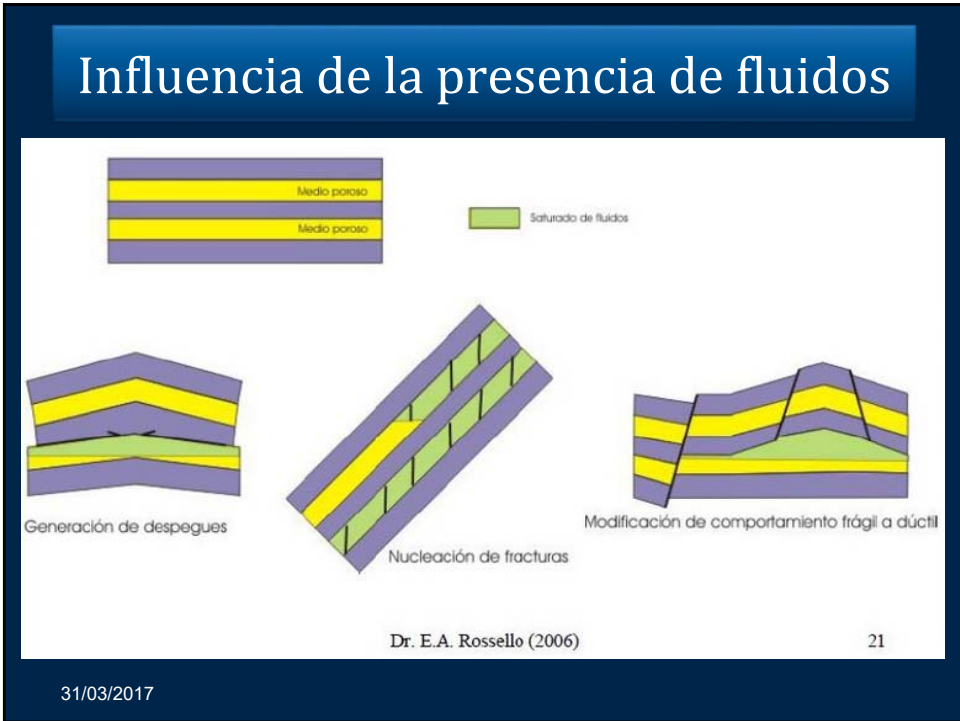
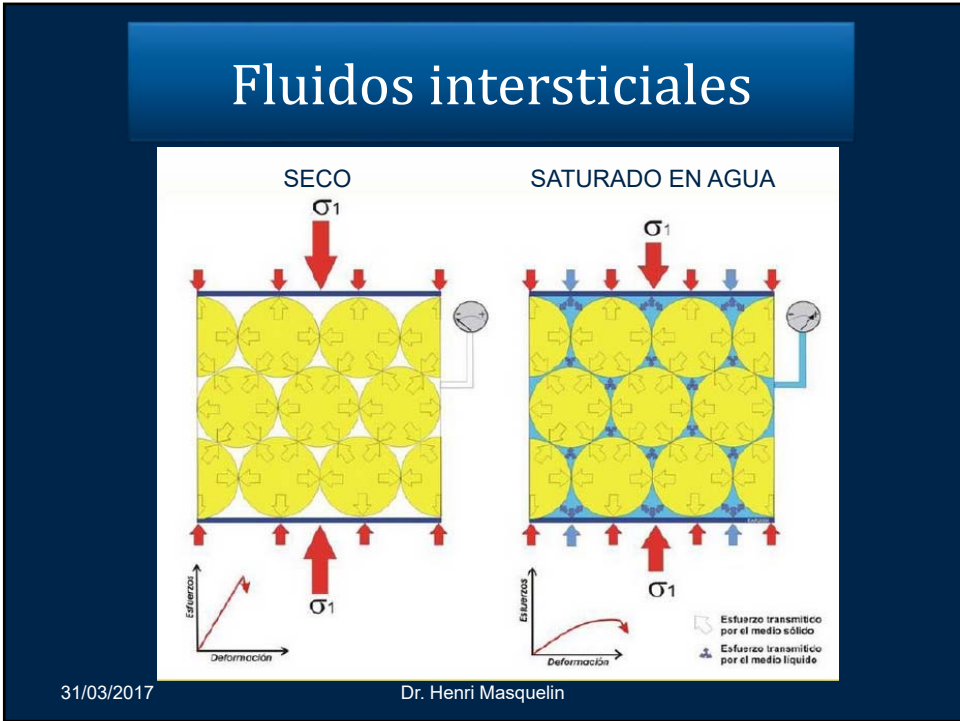
En escala cristalina, los fluidos debilitan los enlaces moleculares, produciendo un efecto similar al de temperatura. Si aumenta la tasa de deformación y se adiciona agua, las rocas se hacen 5 a 10 veces más débiles. Con la adición de agua el esfuerzo de cesión disminuye y el de ruptura aumenta.

En los poros de las rocas: $Presión\ Efectiva = Presión\ Confinante - Presión\ Fluidos$

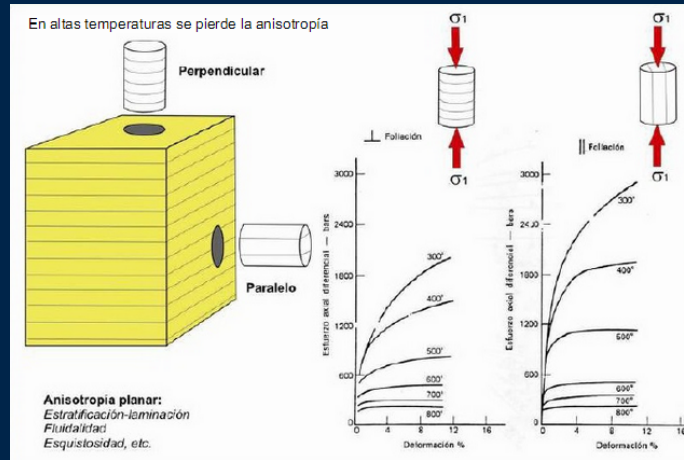
Si la presión efectiva es alta, la roca es relativamente fuerte y dúctil. Si la presión efectiva disminuye la roca tendrá menos resistencia y ductibilidad.

Se requiere menos esfuerzo para romper la resistencia del material ya que se transmite por los fluidos.





Influencia de la anisotropía previa

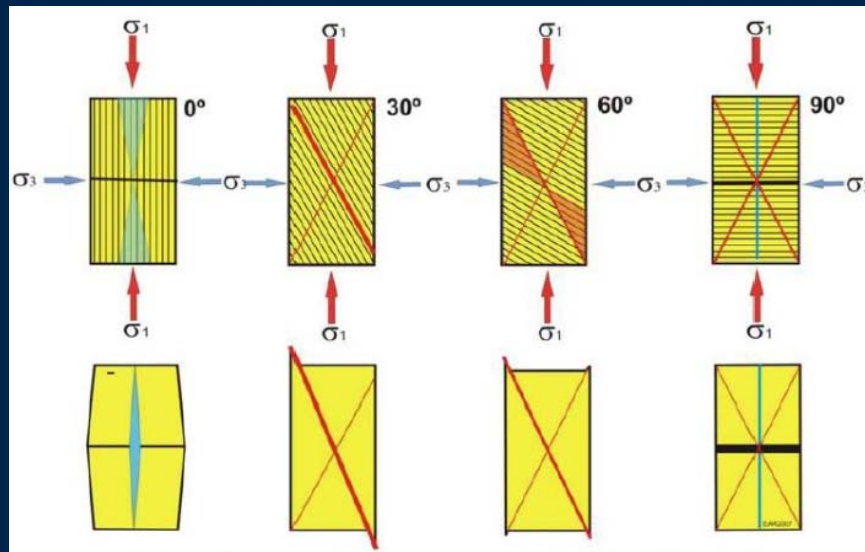


- **Deformación frágil:** Compartimentación → **Mayor influencia...**
- **Deformación dúctil:** Se afecta el cuerpo en su totalidad → **Menor influencia** de los planos de debilidad previos (p.ej. estratificación, fallas)

31/03/2017

Dr. Henri Masquelín

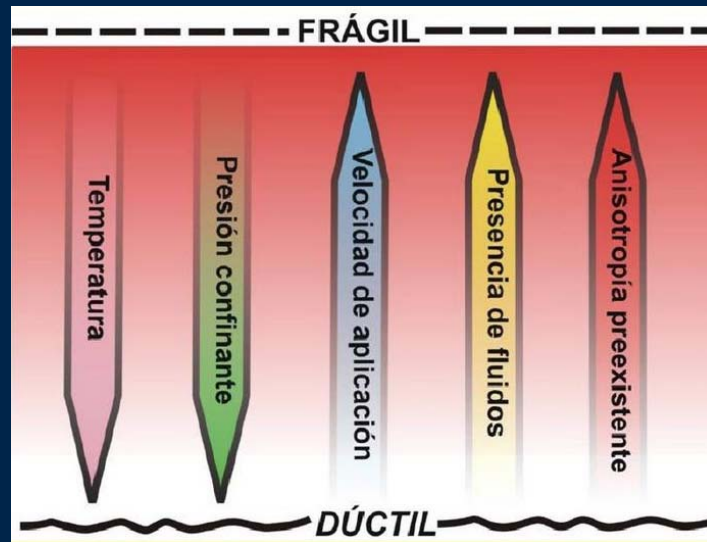
Influencia de una anisotropía planar



31/03/2017

Dr. Henri Masquelín

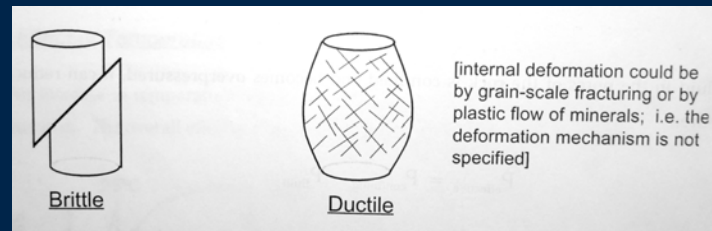
Tendencia de los factores



31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

Frágil vs. dúctil: Un tema de escala



- Frágil:
 - Si la **rotura** ocurre durante la **deformación elástica**.
 - Produce pérdida de cohesión estructural.
- Dúctil:
 - Material que puede sufrir cambios de forma sin romper
 - Es independiente del mecanismo por el cual cambia de forma

31/03/2017

Dr. Henri Masquelin

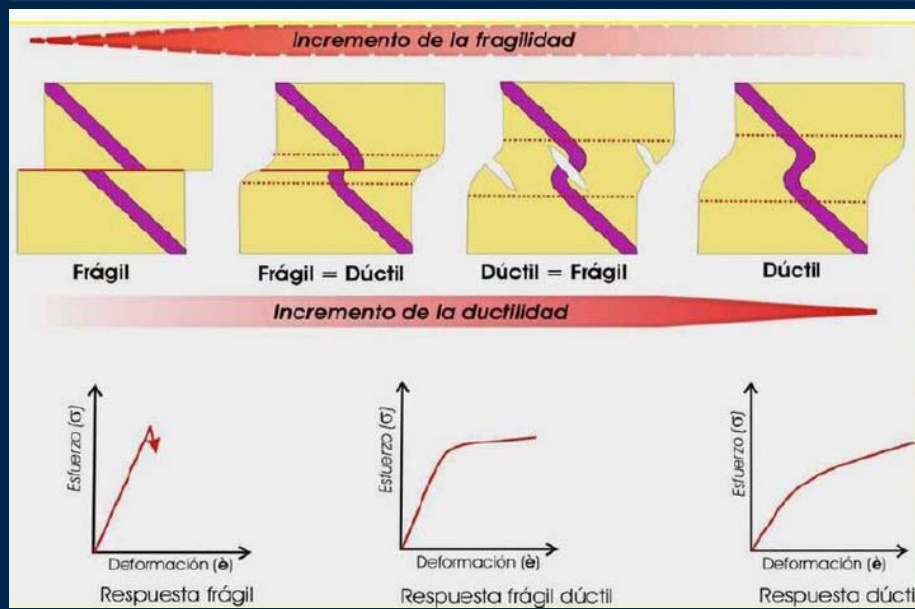
Cataclástico vs. cristal-plástico

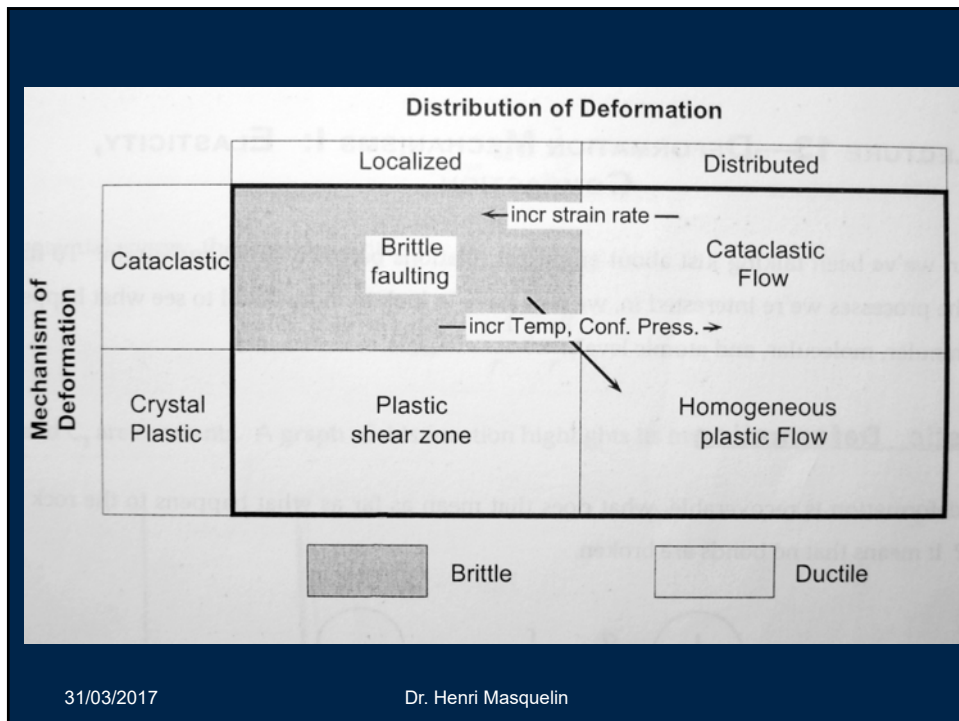
- **Concepto de Cataclisis:**
 - Deformación producida por **fracturación** y rotación de granos y/o fragmentos (agregados de granos).
 - Mecanismo específico: **deslizamiento friccional**. Puede resultar tanto en deformación frágil como dúctil.
- **Concepto de Plasticidad Cristalina:**
 - **Flujo de granos minerales:** sin fracturar ni romper. Existe una variedad de mecanismos.

31/03/2017

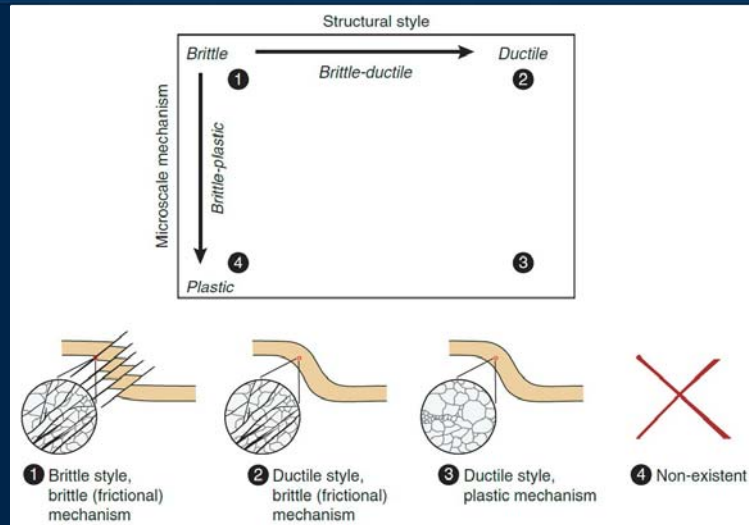
Dr. Henri Masquelin

Deformación frágil – deformación dúctil

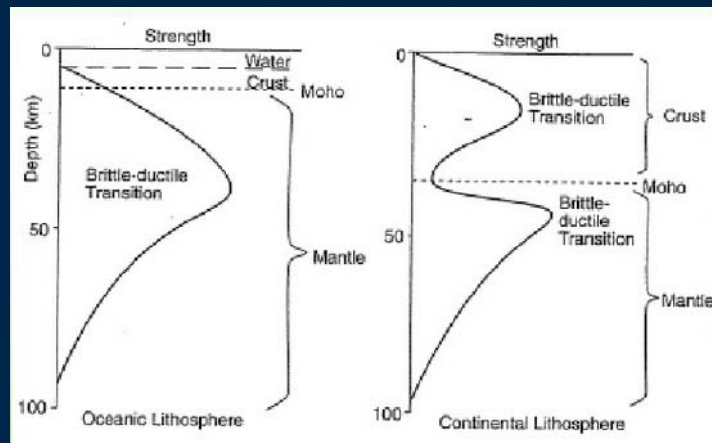




Relación entre estilo estructural y mecanismos de microescala

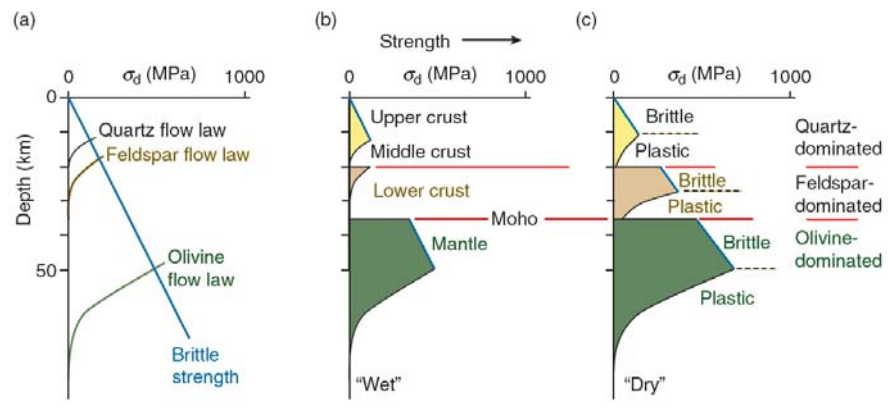


Transición F-D para cortezas continental y oceánica



La corteza oceánica acomoda mayor deformación dúctil que la continental

Transición frágil-dúctil litosférica



Estratificación reológica basada en combinación de las leyes de fricción frágil y flujo plástico derivadas de experimentos en cuarcita, diabasa y dunita. La transición dúctil-frágil ocurre cuando las curvas respectivas de esas leyes se intersectan. Perfil dependiente de la mineralogía y tipos de roca. Rocas **secas** son considerablemente más resistentes (aguantan mayores esfuerzos diferenciales).

Resumen

- Existen **comportamientos reológicos ideales** que relacionan **esfuerzo, deformación y tiempo**.
- Rocas no tienen comportamientos ideales sino una **combinación** de comportamientos.
- Hay un **conjunto de factores** que determinan la reología de un material en el medio físico, la resultante determinará el comportamiento: las rocas constituyen un **sistema complejo multivariable**.
- El efecto de **T** y **P** se opone al de la **tasa de aplicación del esfuerzo**, la **presencia de fluidos** y la **anisotropía preexistente**.
- La **litósfera** tiene un comportamiento tendiente al aumento de la rigidez hasta 40-45 km (Moho), luego una disminución gradual hasta los 100 km; en los continentes, el Moho está marcado como **zona de transición reológica**.