

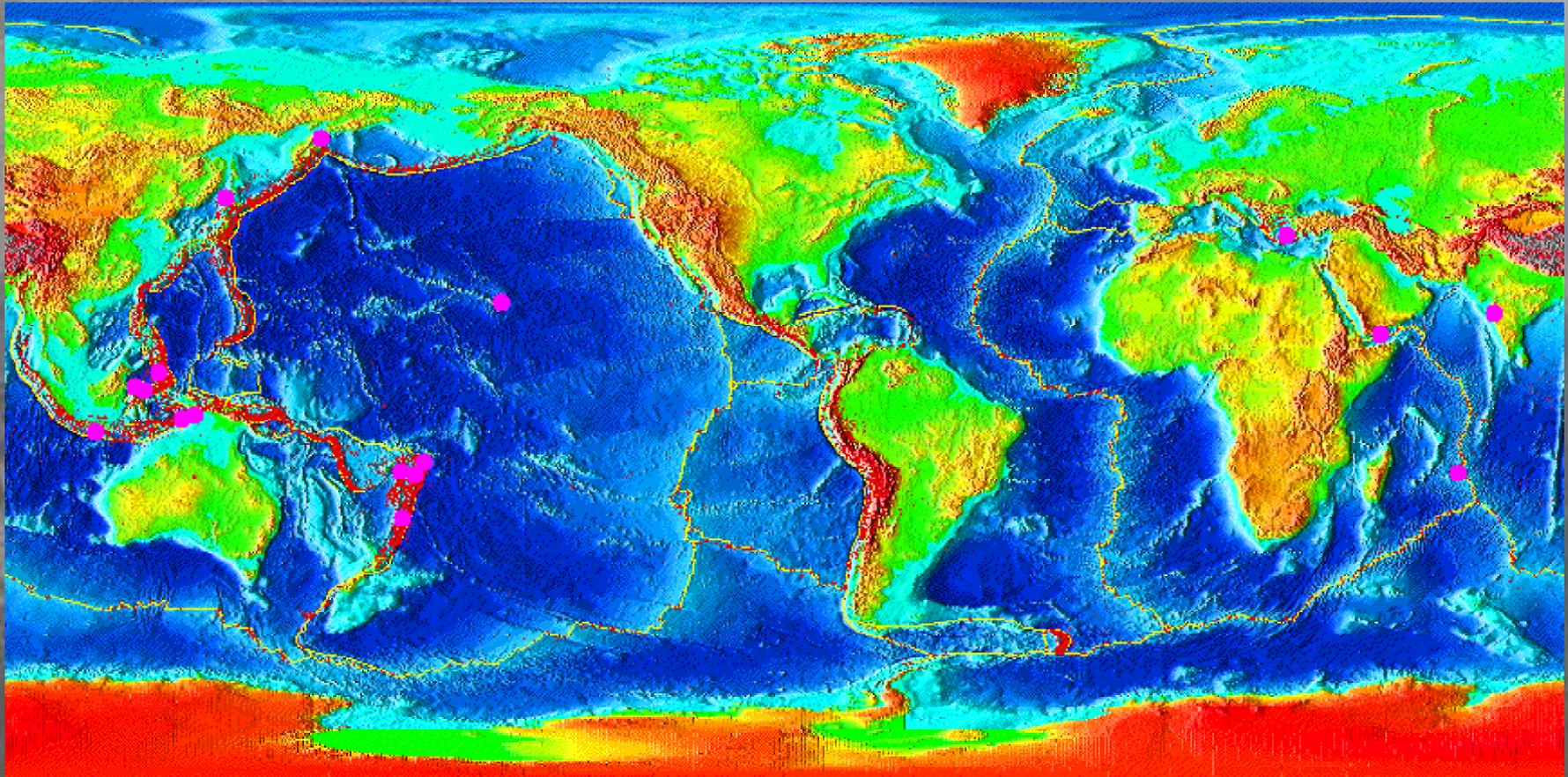
# GEODINAMICA II

## MODULO 2: ESFUERZO Y DEFORMACION

- ESFUERZO
- DEFORMACION
- RELACIONES ESFUERZO DEFORMACION
- ELASTICIDAD
- RELACIONES ESFUERZO TASA DE DEFORMACION
- DEFORMACION FRAGIL
- DEFORMACION DUCTIL
- REOLOGIA DE LA LITOSFERA

# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

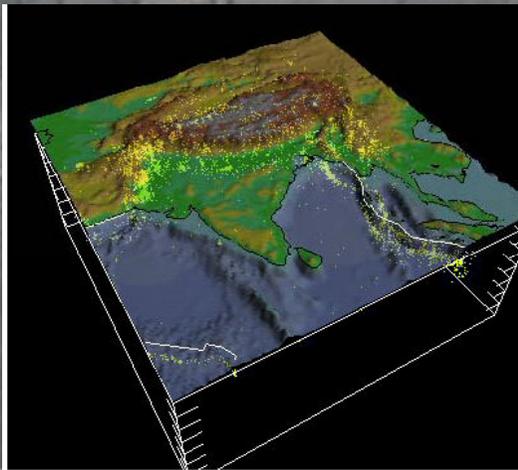
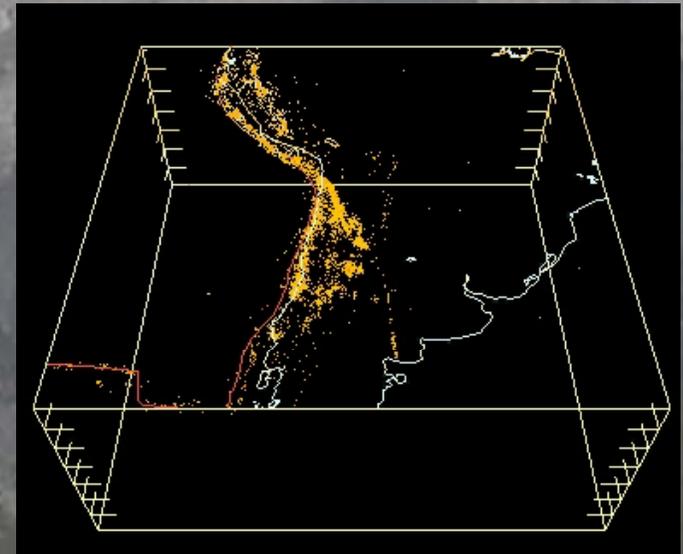
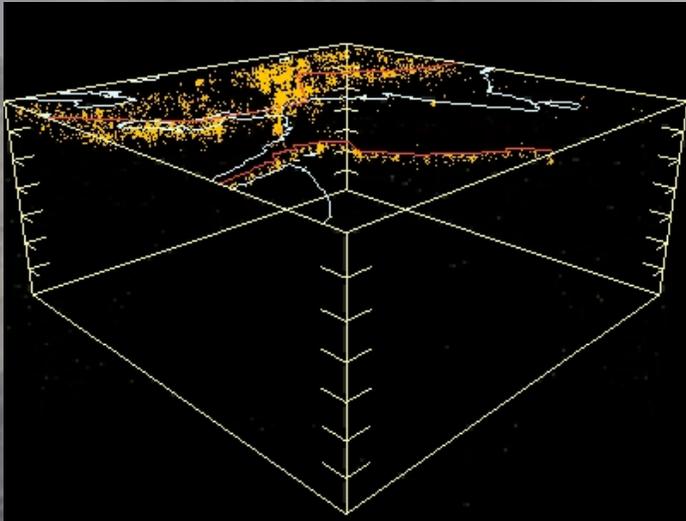
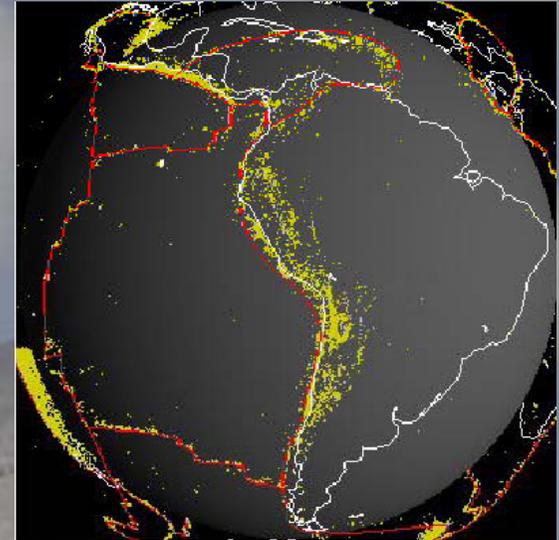
SISMICIDAD GLOBAL: GRAN DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN PLANTA PERO RESTRINGIDO EN PROFUNDIDAD Y ALTA TASA DE DEFORMACIÓN



# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

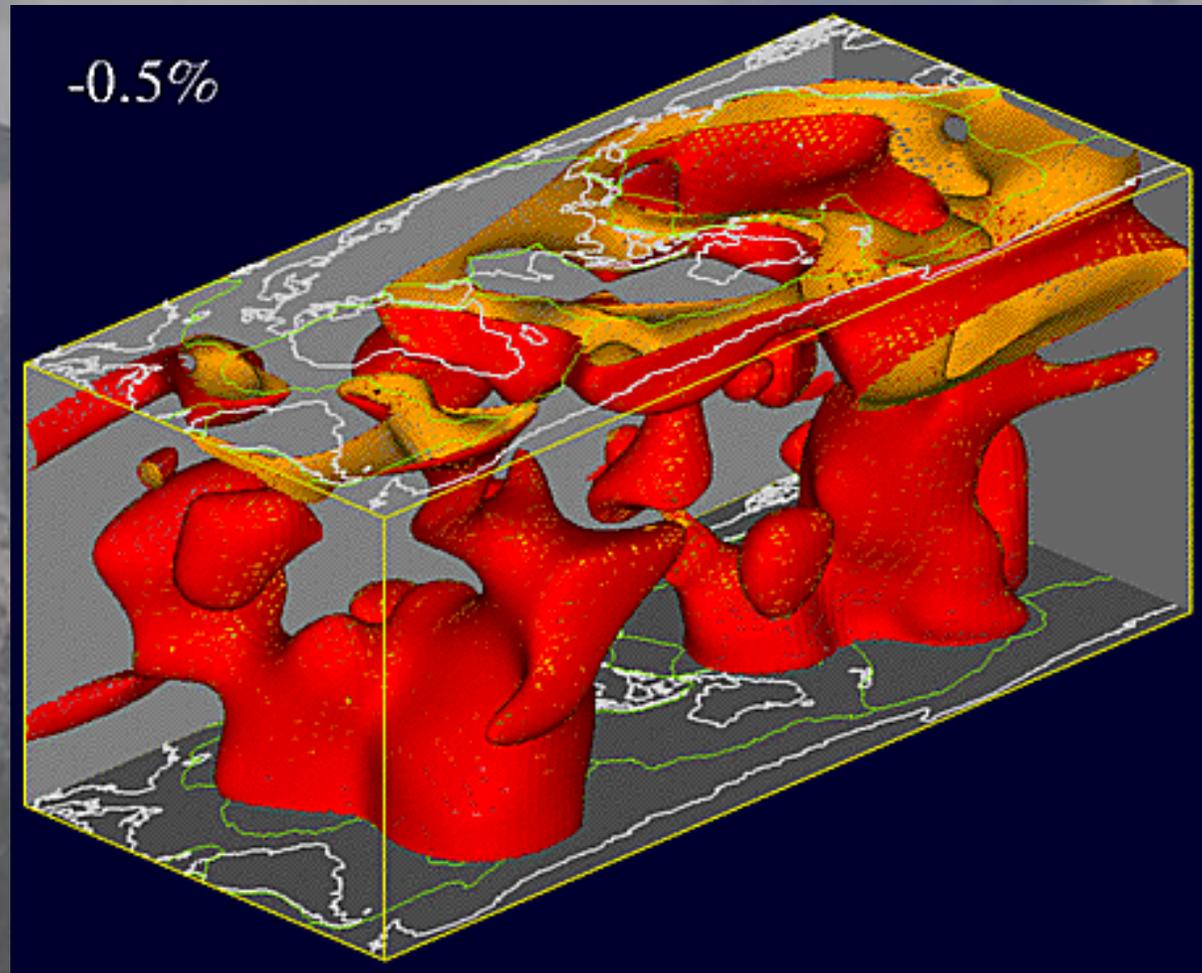
SISMICIDAD GLOBAL:  
Himalayas

Sudamérica



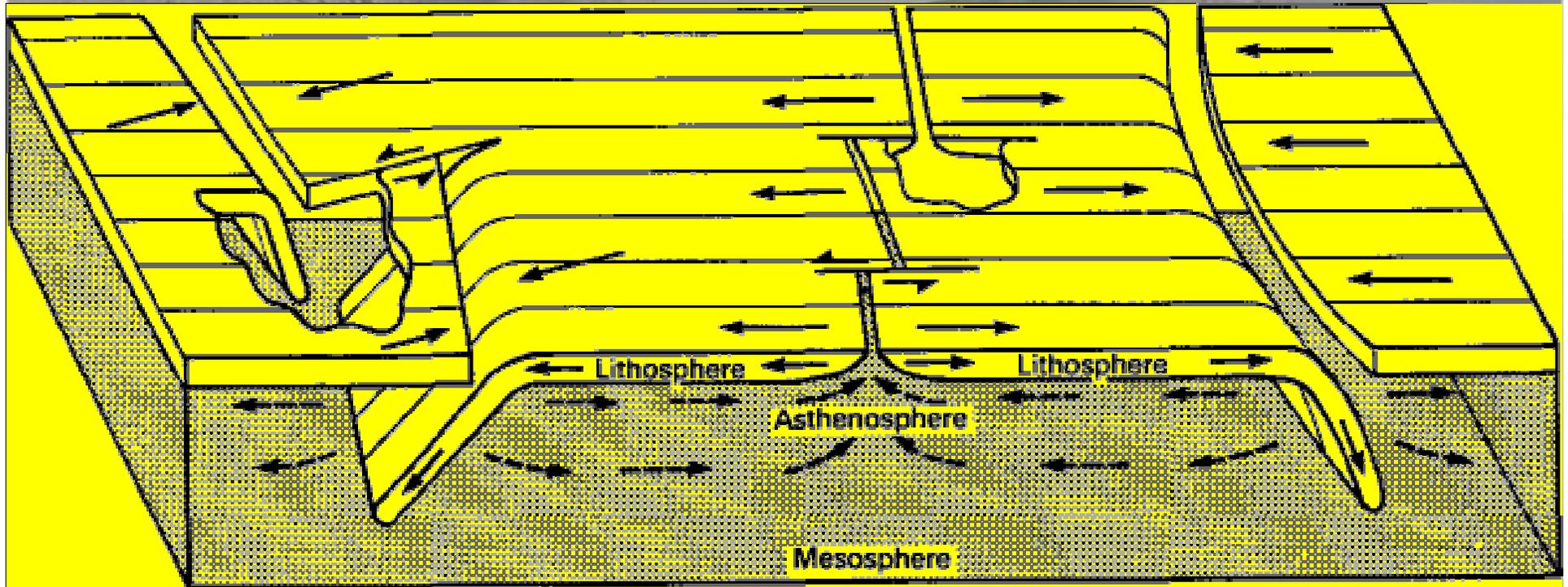
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## CONVECCIÓN EN EL MANTO: DISTRIBUCION 3-D EN LA TIERRA Y TASAS DEFORMACIÓN MODERADAS



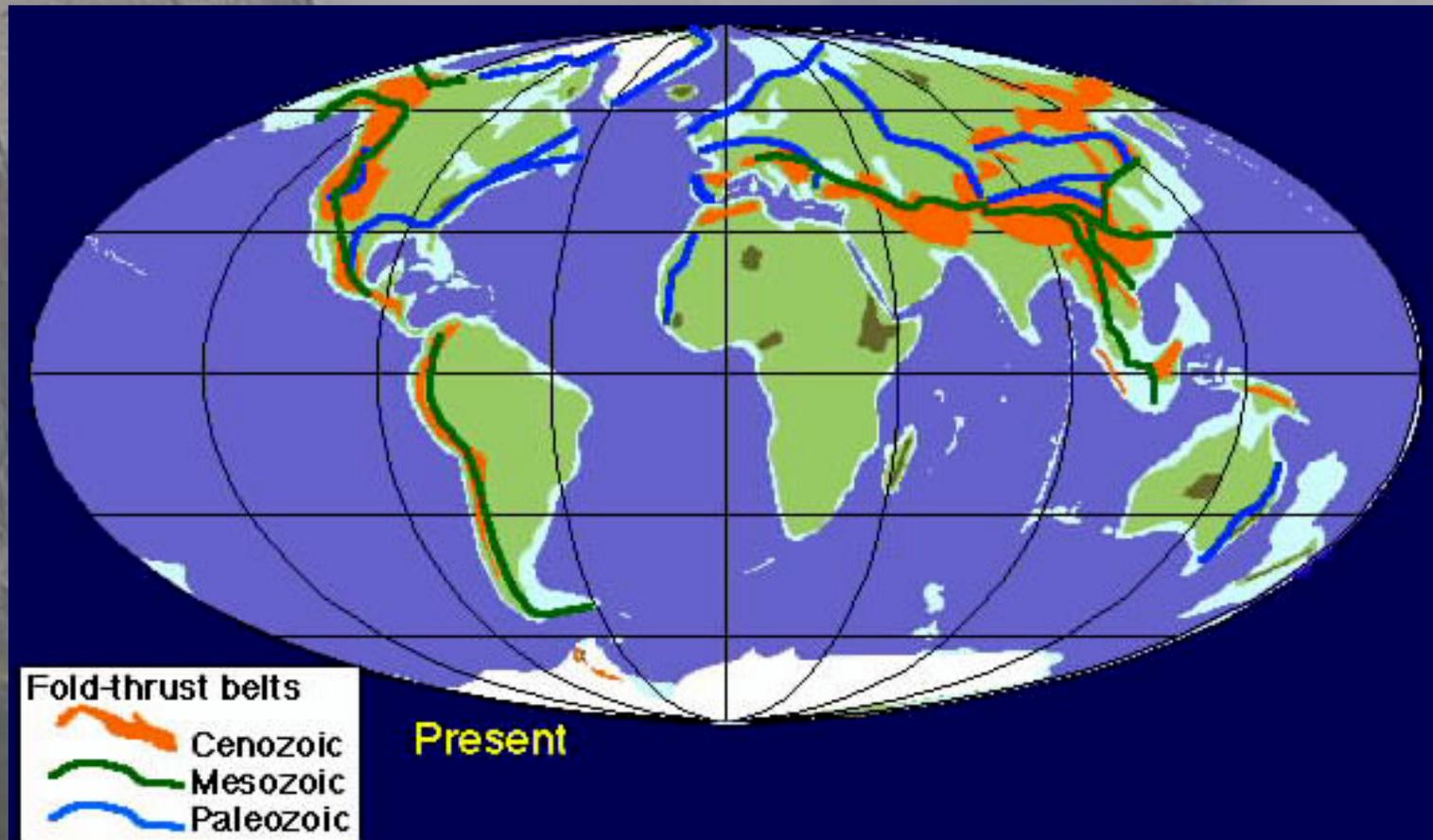
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

TECTONICA DE PLACAS: DEFORMACION  
RESTRINGIDA A LA LITOSFERA Y EN ESCALAS  
DE TIEMPO GEOLÓGICO



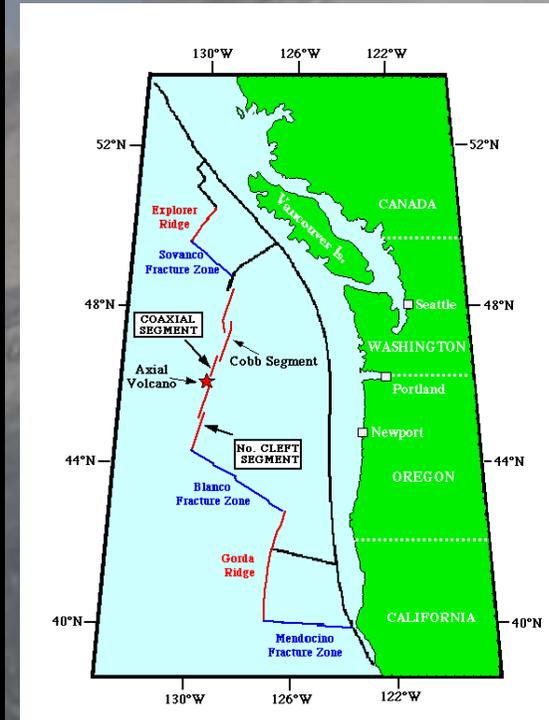
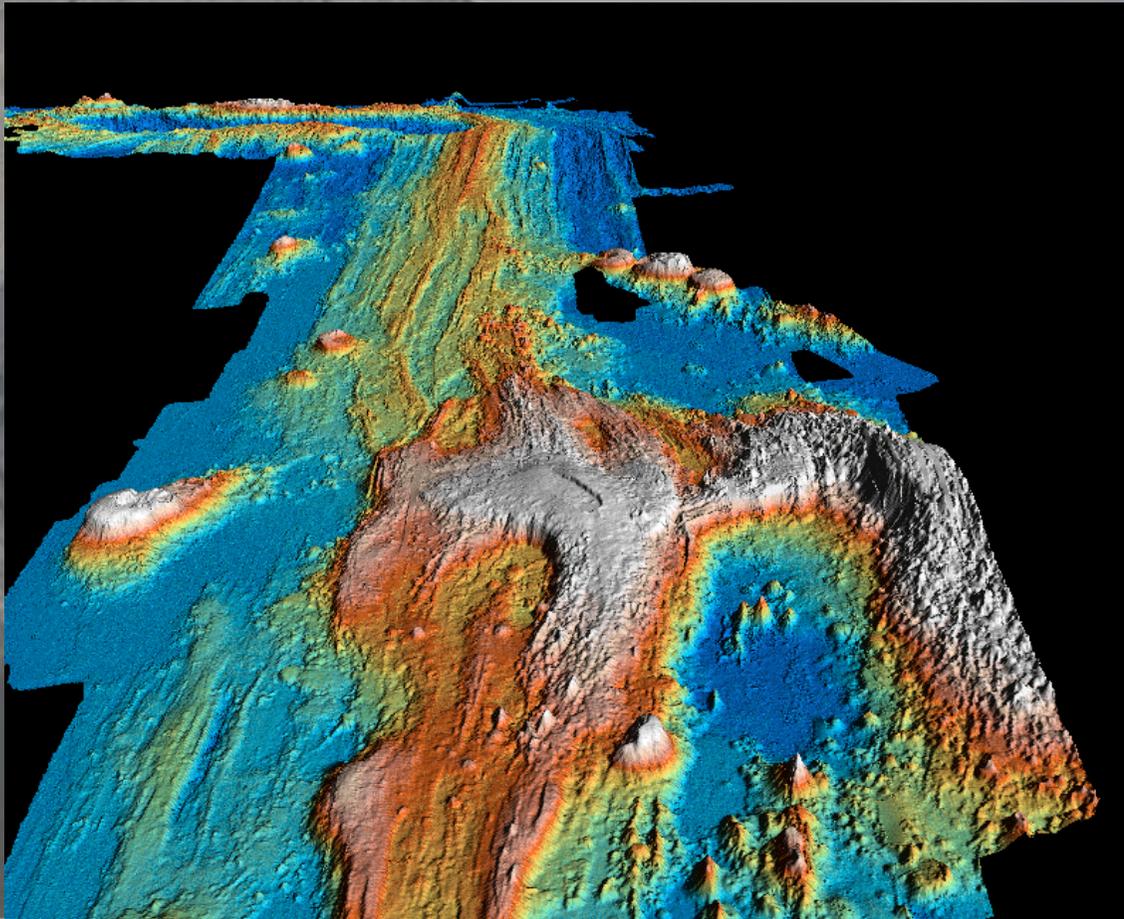
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

CINTURONES OROGENICOS: RESTRINGIDOS A BORDES DE PLACAS CONVERGENTES, TASAS DE DEFORMACIÓN EN TIEMPOS GEOLOGICOS



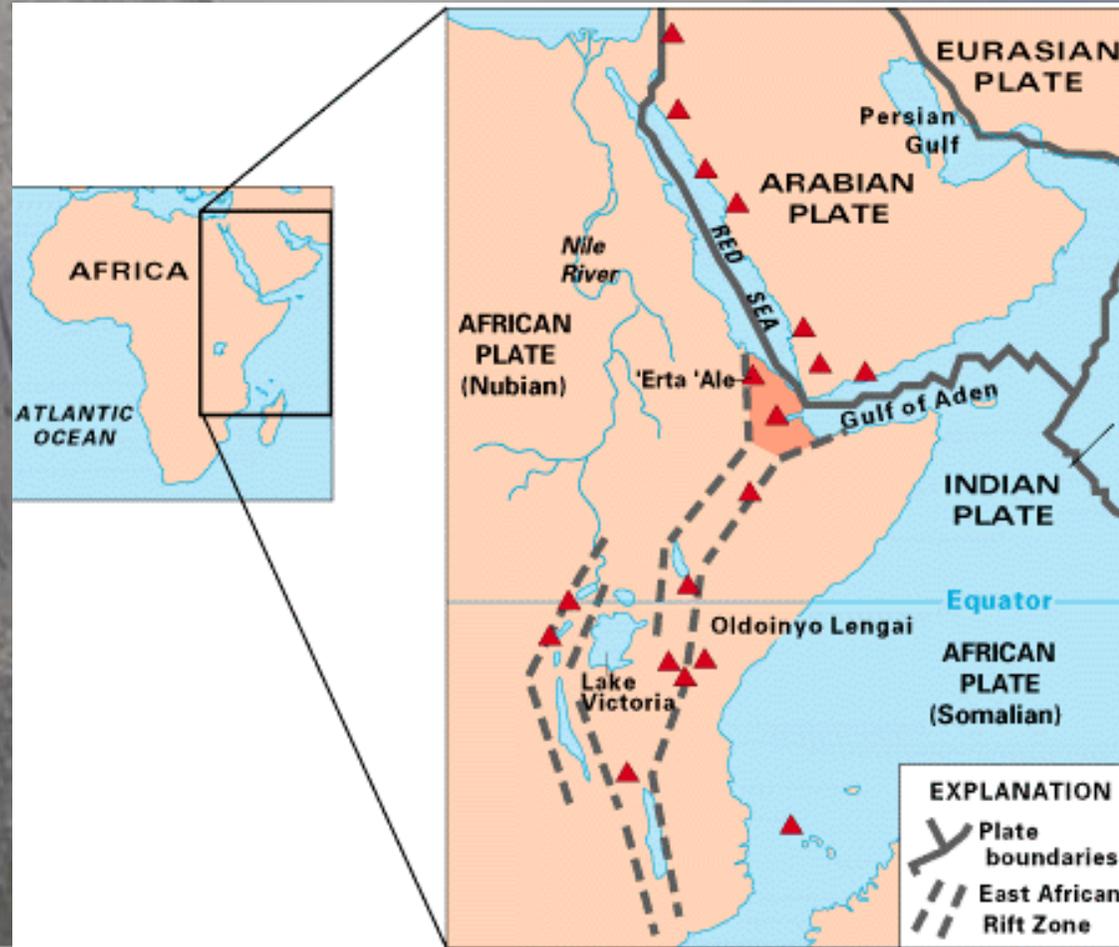
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## DORSALES OCEANICAS: ACRECION DE CORTEZA OCEANICA EN ESCALAS 1-D Y TIEMPOS DE TECTONICA DE PLACAS



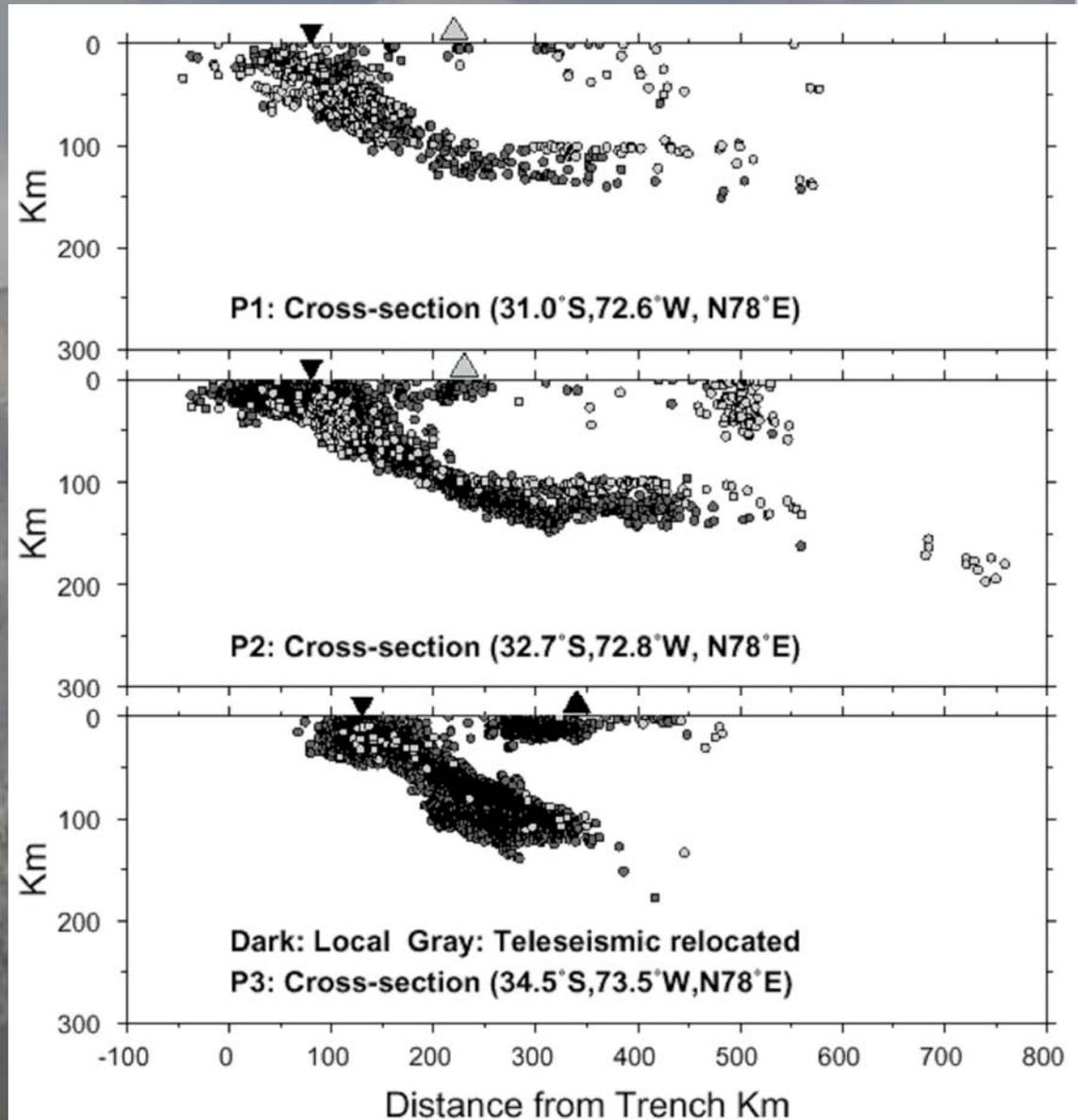
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## RIFT CONTINENTALES: ACRECION DE CORTEZA OCEANICA EN ESCALAS 1-D Y TIEMPOS DE TECTONICA DE PLACAS



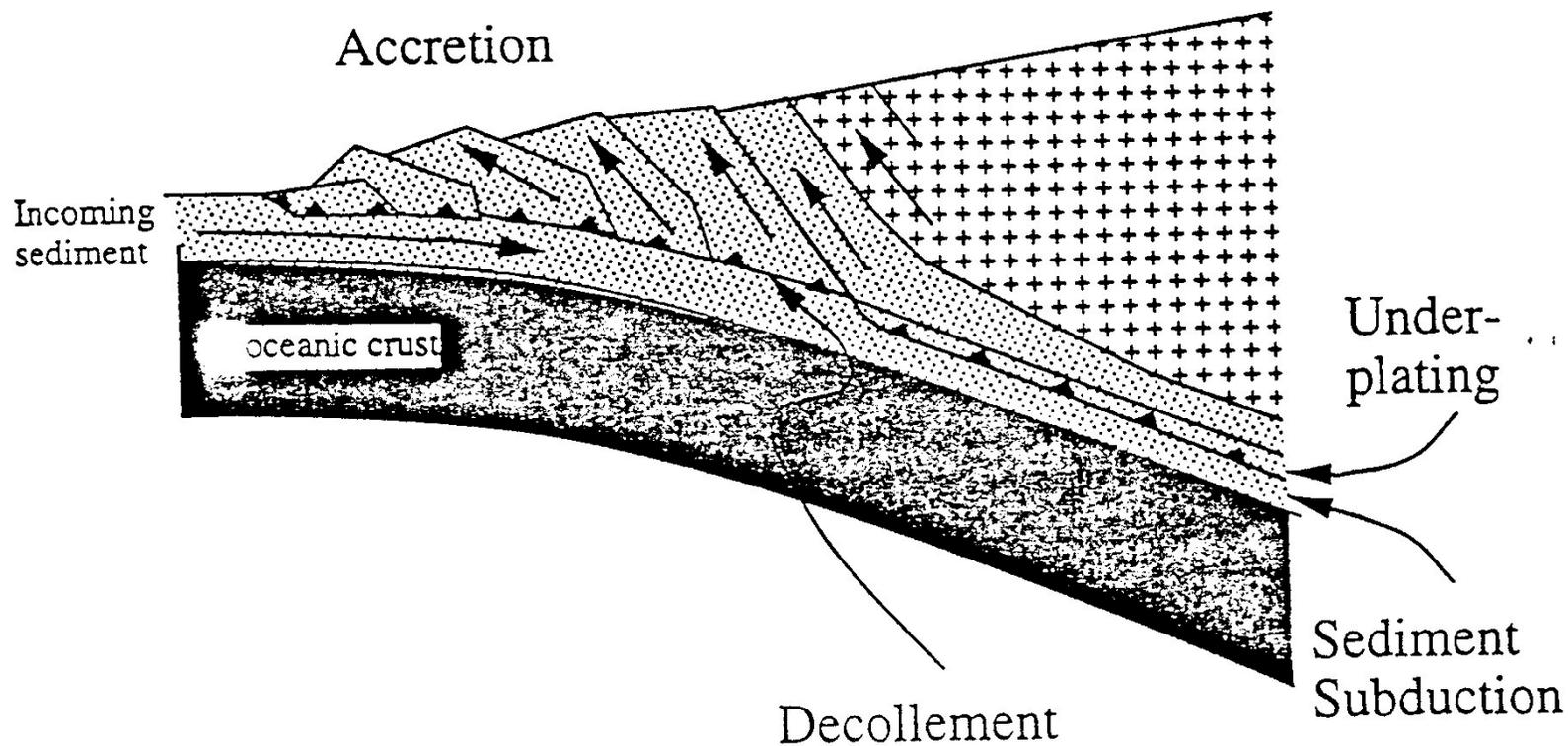
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

**SISMICIDAD EN  
SUBDUCCION  
(CHILE):  
RESTINGIDO A  
MARGENES  
CONVERGENTES  
ALTAS TASAS DE  
DEFORMACION**



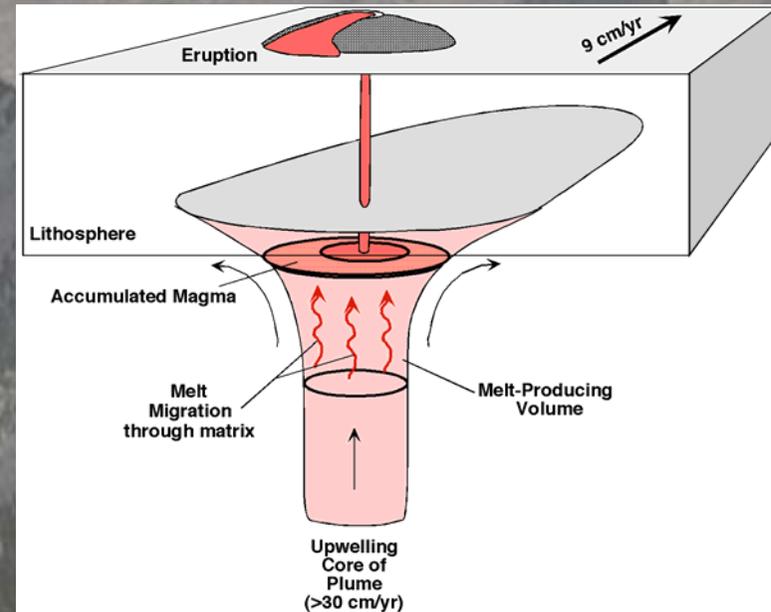
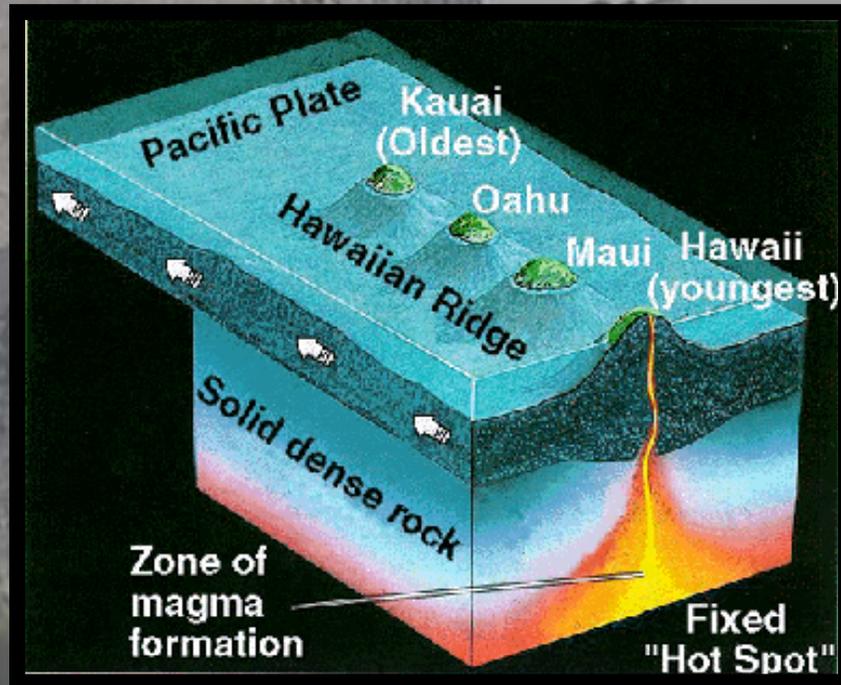
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## PRISMAS DE ACRECION: EN EL RANGO GEOLOGICO ALTO Y CON CONDICIONES DE BORDE LATERALES Y BASALES



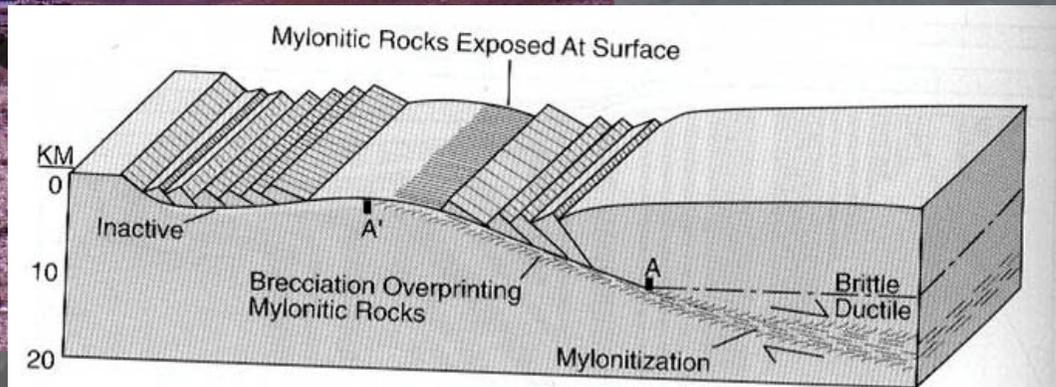
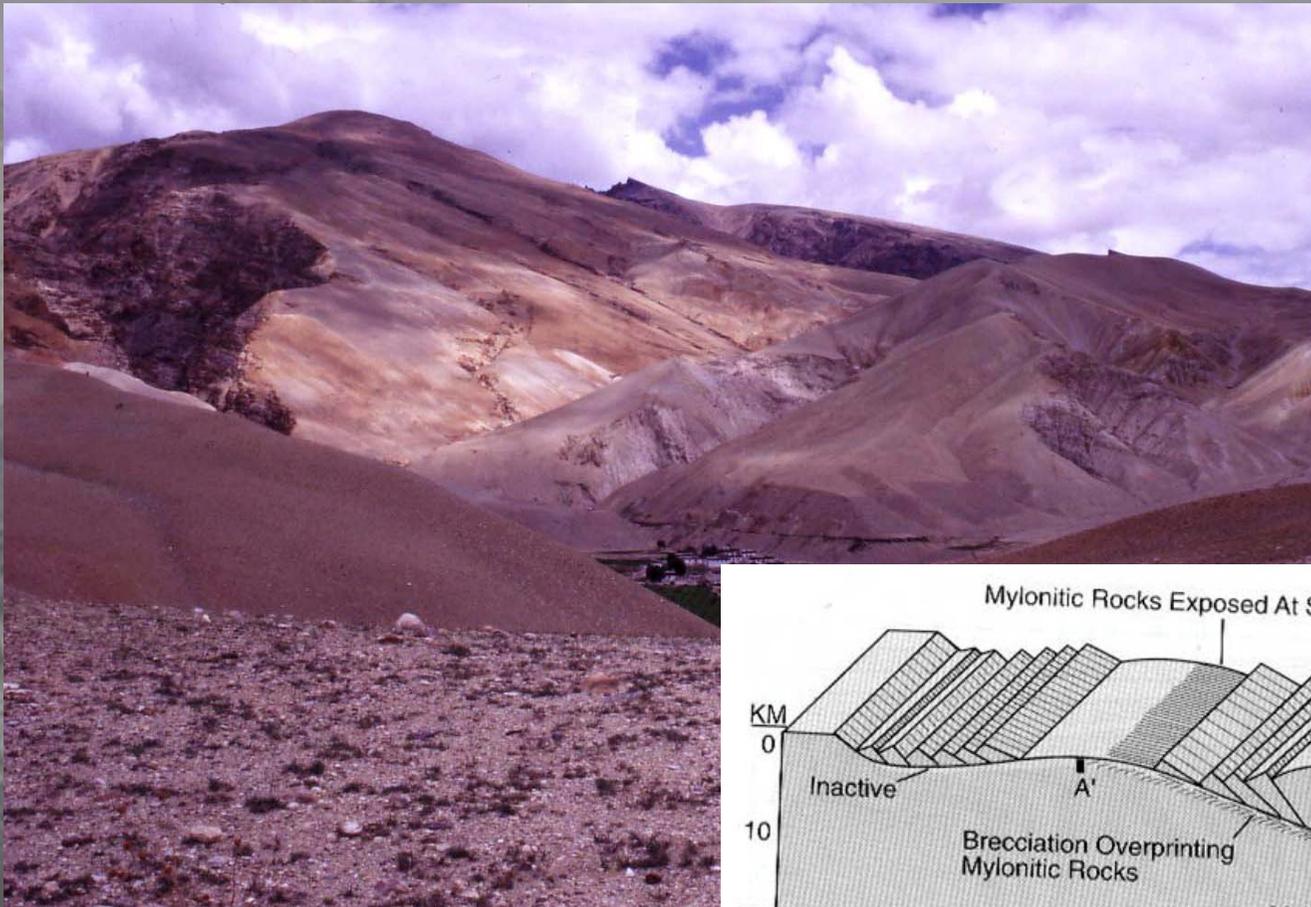
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## HOT-SPOTS: ACRECION EPISODICA DE MATERIAL MAGMÁTICO EN ZONAS PUNTUALES A TASAS DE TECTONICA DE PLACAS



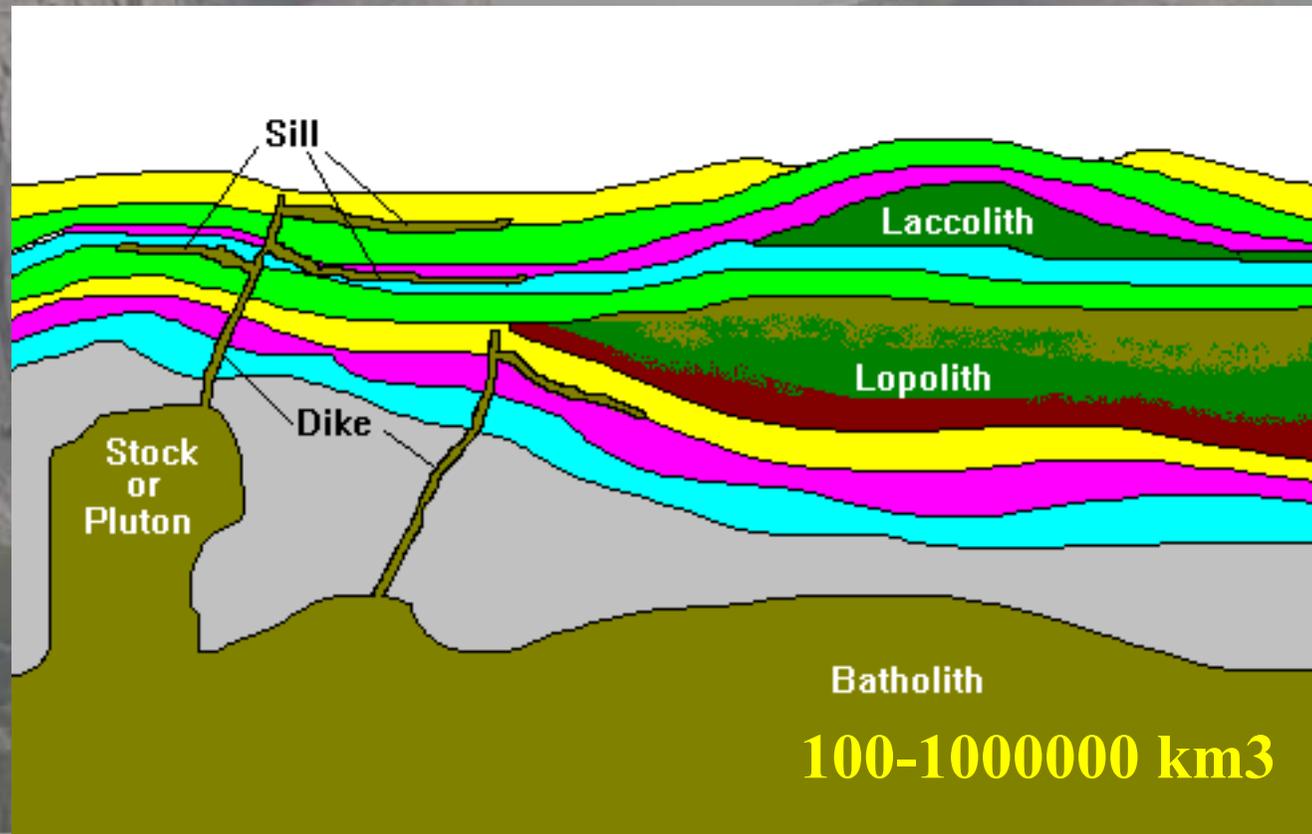
# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## CORE-COMPLEX: TRANSICION FALLAMIENTO FRAGIL-DUCTIL EN CORTEZA



# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

EMPLAZAMIENTO DE INTRUSIVOS EN CORTEZA:  
A TASAS BAJAS EN CORTEZA DUCTIL Y ALTA  
EN LA CORTEZA SUPERIOR



# ESCALAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL

## FALLAMIENTO FRAGIL EN CORTEZA SUPERIOR POST PLEGAMIENTO

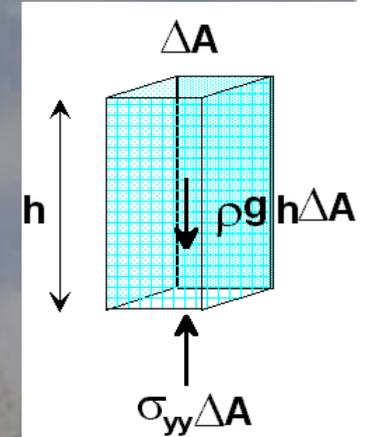


# ESFUERZO

## DEFINICION:

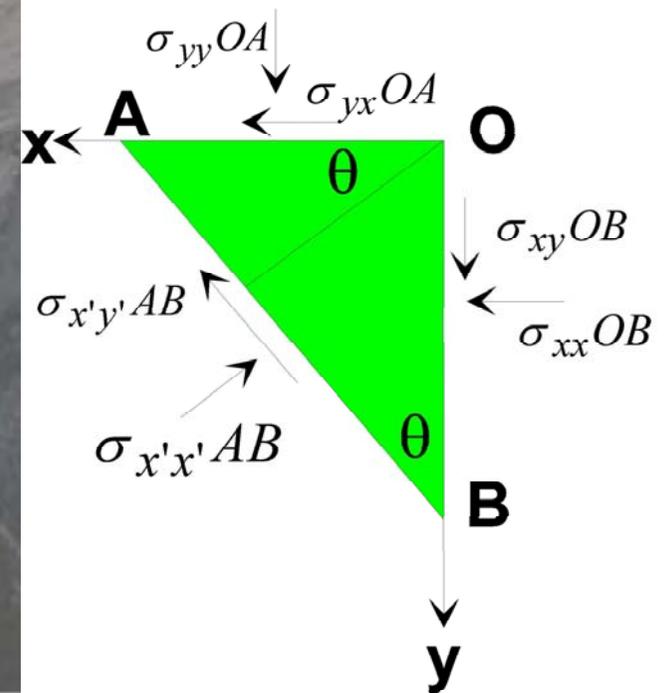
FUERZA/UNIDAD DE SUPERFICIE  
 POR EJEMPLO ESFUERZO DE  
 COLUMNA LITOSTATICA

En un cuerpo 2-D en equilibrio, el esfuerzo en una determina superficie se puede expresar en función de los esfuerzos en un sistema ortogonal.



$$\sigma_{x'x'} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + \sigma_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{x'y'} = 0.5(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin 2\theta + \sigma_{xy} \cos 2\theta$$

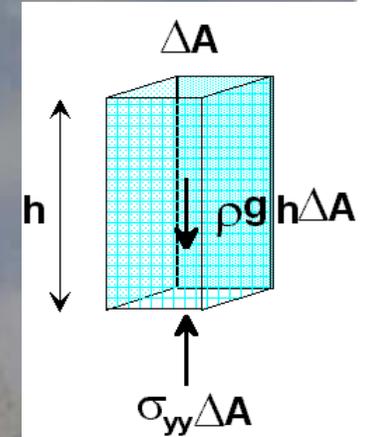


# ESFUERZO

## DEFINICION:

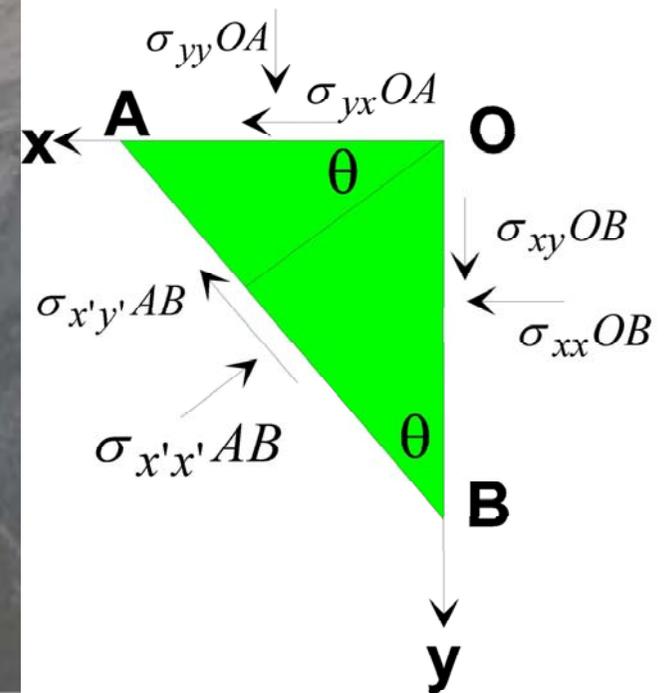
FUERZA/UNIDAD DE SUPERFICIE  
POR EJEMPLO ESFUERZO DE  
COLUMNA LITOSTATICA

En un cuerpo 2-D en equilibrio, el esfuerzo en una determina superficie se puede expresar en función de los esfuerzos en un sistema ortogonal.



$$\sigma_{x'x'} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \sin^2 \theta + \sigma_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_{x'y'} = 0.5(\sigma_{yy} - \sigma_{xx}) \sin 2\theta + \sigma_{xy} \cos 2\theta$$



# ESFUERZO

Siempre es posible encontrar un ángulo  $\theta$  para el cual el esfuerzo de cizalle es nulo, bajo estas condiciones el esfuerzo normal al plano definido por este ángulo corresponde a un esfuerzo principal. De tal forma que imponiendo esta condición de cizalle nulo se determinan los esfuerzos principales como

$$\sigma_{1,2} = 0.5(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \pm \left\{ \left( \sigma_{xx} - \sigma_{yy} \right)^2 + 4\sigma_{xy}^2 \right\}^{1/2}$$

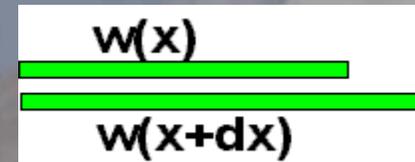
La orientación de los esfuerzos principales y su amplitud permiten definir en forma absoluta el estado de esfuerzo en un cuerpo sólido

# DEFORMACION

En un cuerpo sometido a un campo de esfuerzos, la deformación se define como la razón entre el tamaño final e inicial:

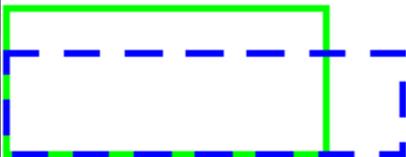
$$w(x + dx) = w(x) + \frac{\partial w}{\partial x} dx$$

$$\Rightarrow \text{"strain"} = \varepsilon = \frac{w(x + dx) - w(x)}{dx} = \frac{\partial w}{\partial x}$$



En dos (y tres) dimensiones la deformación se compone de una componente paralela al esfuerzo y otra tangencial que involucra una deformación de cizalle.

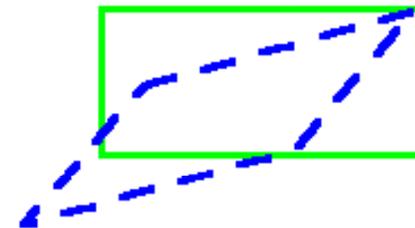
deformación  
sin cizalle



deformación  
cizalle simple



deformación  
cizalle puro



# DEFORMACION

En la deformación sin cizalle:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial w_x}{\partial x}; \varepsilon_{yy} = \frac{\partial w_y}{\partial y}$$

Para la deformación con cizalle:  
(rotación del sólido c/r al eje y,  
y eje x, respectivamente)

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right)$$

Cizalle puro:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial w_x}{\partial y}$$

Cizalle simple:

$$\varepsilon_{xy} = 0.5 \frac{\partial w_x}{\partial y}$$

# DEFORMACION

Al igual que la descomposición del esfuerzo, la deformación en un plano arbitrario se puede descomponer como:

$$\varepsilon_{x'x'} = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta$$

$$\varepsilon_{x'y'} = 0.5(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \sin 2\theta + \varepsilon_{xy} \cos 2\theta$$

# DEFORMACION

En 3 dimensiones la deformación se expresa como:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right] & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right] \\ \text{sim} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right] \\ \text{sim} & \text{sim} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

Expresando la deformación como una componente isotrópica:

$$\varepsilon_{ij}^o = \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} = \frac{1}{3} \theta \delta_{ij} = \frac{1}{3} [\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Y otra deviatorica:

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^o$$

# DEFORMACION

Es importante considerar que no es suficiente tener componentes fuera de la diagonal nulas en el tensor de deformación para tener deformación puramente volumétrica. Esta condición de deformación deviatorica nula solo se cumple cuando todas las componentes del tensor deviatorico son nulas. Esta condición solo es posible si los 3 términos de la deformación normal son iguales:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{3}[\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}] = \varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$$

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

Para esfuerzos pequeños la deformación es proporcional al esfuerzo (medio isotrópico, en caso contrario la relación considera un tensor de 9x9 elementos con 36 parámetros independientes):

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

Donde  $\lambda$  y  $\mu$  son los parámetros de Lamé que caracterizan las propiedades elásticas del medio. Por ejemplo:

$$\sigma_{11} = \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{11}$$

$$\sigma_{12} = 2\mu \varepsilon_{12}$$

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

Esta relación esfuerzo-deformación elástica (“stress-strain”) se puede escribir también en forma inversa:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{2\mu} - \frac{\lambda\sigma_{kk}\delta_{ij}}{2\mu(3\lambda + 2\mu)}$$

Definiendo  $\nu$  y  $E$  (razón de Poisson y módulo de Young respectivamente), como la razón entre la deformación en dirección vertical y horizontal, y la razón entre el esfuerzo y deformación horizontal (considerando deformación uniaxial)

$$\sigma_{11} \neq 0; \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 :$$

$$\frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)}$$

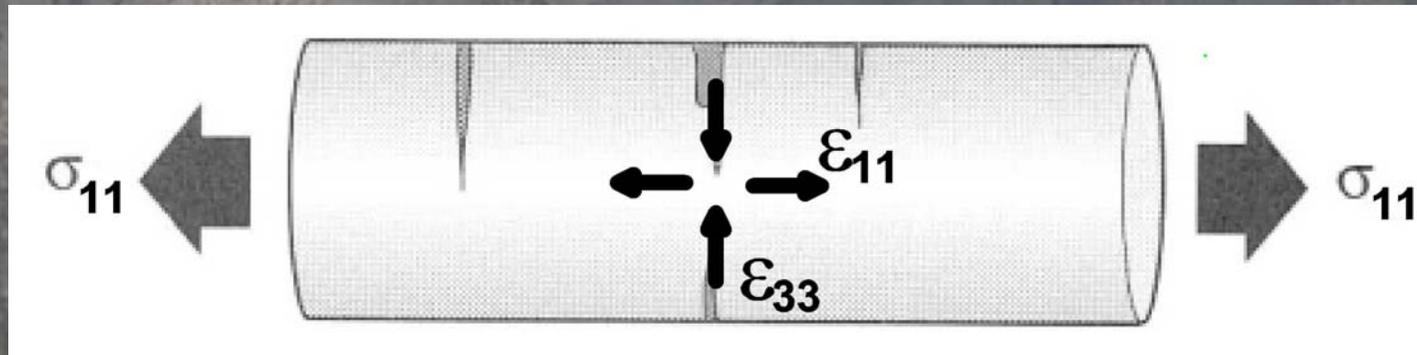
$$-\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} = \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

De tal forma que la relación deformación-esfuerzo, escrita en términos de  $\nu$  y  $E$ , se expresa como:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[ (1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij} \right]$$

Se utiliza  $\nu$  y  $E$ , dado que se trata de parámetros de fácil medición en un experimento de extensión uniaxial :



# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

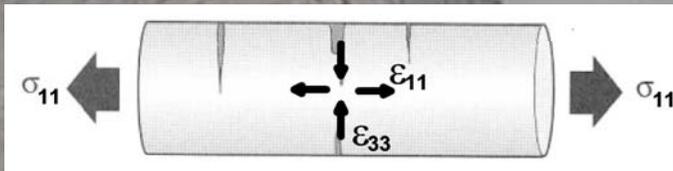
Estos parámetros que caracterizan la respuesta elástica del medio presentan los siguientes valores en distintos tipos litológicos.

Tipo de roca	E [ $\times 10^{11}$ Pa]	$\nu$
Arenisca	0.1-0.6	0.2-0.3
Lutita	0.6-0.8	0.25-0.3
Gneiss	0.04-0.7	0.04-0.15
Basalto	0.6-0.8	0.25
Granito	0.4-0.7	0.1-0.25
Gabro	0.6-1.0	0.15-0.2
Anortosita	0.83	0.25

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

Casos simples:

- esfuerzo uniaxial



$$\left[ \begin{array}{l} \sigma_{22} = \sigma_{33} = 0 \\ \Rightarrow \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{E} \sigma_{11} = -\nu \varepsilon_{11} \end{array} \right]$$

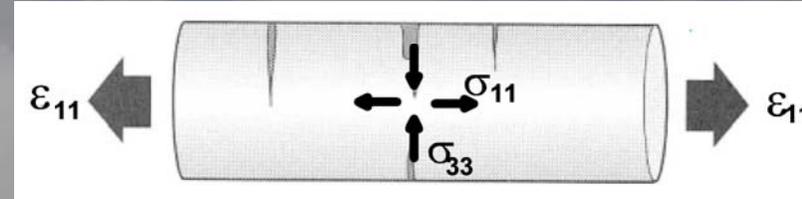
El esfuerzo uniaxial tiene por consecuencia la ley de Hook en el cual se observa una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la misma dirección:

$$\sigma_{11} = E \varepsilon_{11}$$

El signo opuesto en la deformación de las direcciones perpendiculares a la dirección del esfuerzo indican que para una contracción uniaxial se produce una dilatación en las otras direcciones.

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

- deformación uniaxial



$$\left[ \begin{array}{l} \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = 0 \\ \Rightarrow \sigma_{22} = \sigma_{33} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{11} = \frac{\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} E \varepsilon_{11} \end{array} \right]$$

Bajo estas condiciones la relación stress-strain difiere del caso anterior:

$$\sigma_1 = \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} E \varepsilon_1$$

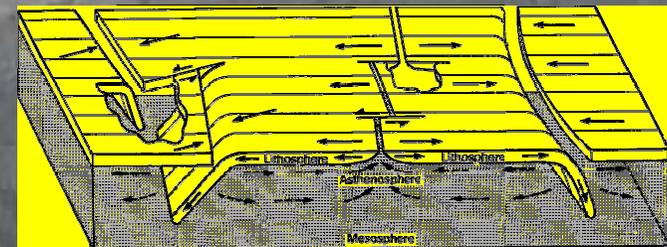
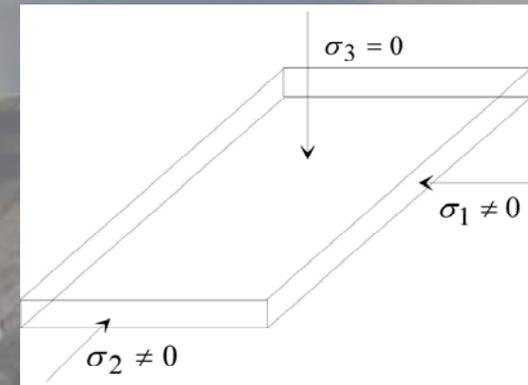
Para una razón de poisson de 0.25 la deformación uniaxial en este caso es un 20% inferior que en el caso anterior producto de la restricción de acomodar la deformación en un solo eje

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

- Esfuerzo plano

Condición que se cumple cuando existe una componente de esfuerzo que es nula

$$\left[ \begin{array}{l} \sigma_{11} \neq 0; \sigma_{22} \neq 0; \sigma_{33} = 0 \\ \Rightarrow \varepsilon_{11} = \frac{1}{E}(\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}); \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{E}(\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}) \\ \varepsilon_{33} = \frac{-\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \end{array} \right]$$



esfuerzo plano (o “plane stress”) es apropiado para caracterizar la deformación elástica en la litósfera.

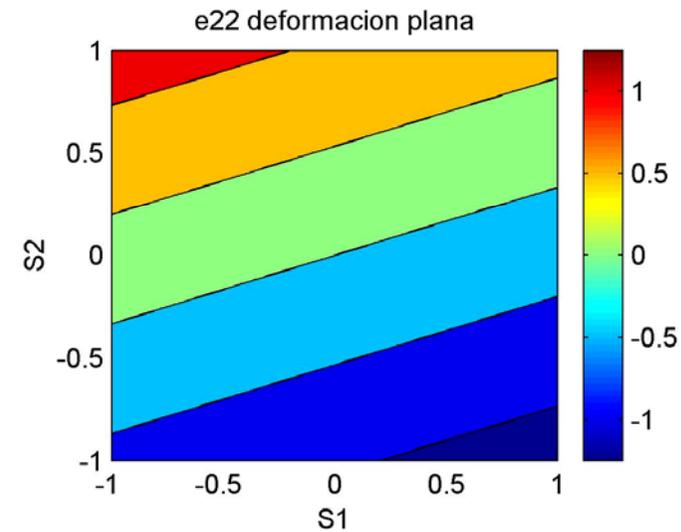
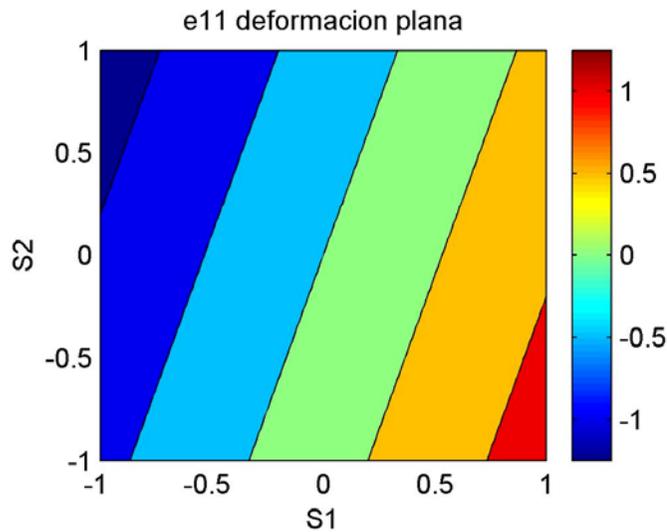
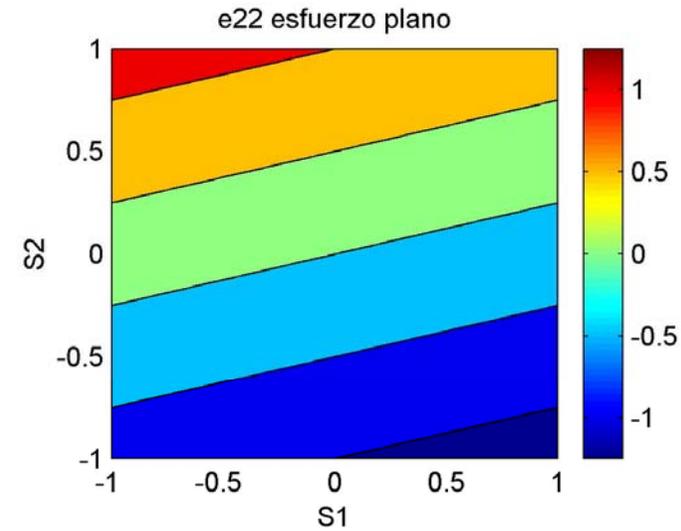
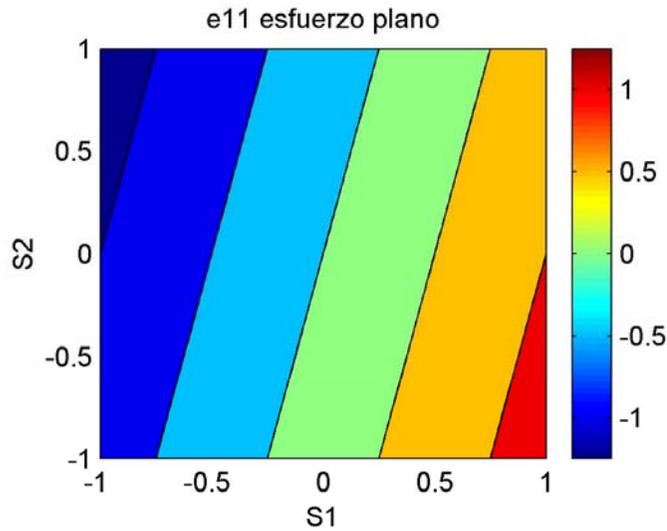
# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)

- **Deformación plana:**

En este caso se cumple que una componente de la deformación es nula

$$\left[ \begin{array}{l} \varepsilon_{11} \neq 0; \varepsilon_{22} \neq 0; \varepsilon_{33} = 0 \\ \Rightarrow \sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}); \\ \varepsilon_{11} = \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_{11}(1-\nu) - \nu\sigma_{22}) \\ \varepsilon_{22} = \frac{(1+\nu)}{E}(\sigma_{22}(1-\nu) - \nu\sigma_{11}) \end{array} \right]$$

# RELACION ESFUERZO DEFORMACION (medios elásticos)



# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Los medios que muestran un comportamiento del tipo flujo bajo esfuerzos deviatoricos se encuentran en el extremo opuesto de la deformación elástica y compromete una deformación permanente en el tiempo.

En condiciones reologicas de flujo, la unidad cinemática básica es la variación de la velocidad en el espacio: tasa de deformación

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right]$$

La condición de “sólido” o “fluido” en términos reologicos queda definido por su comportamiento bajo un stress deviatorico.

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Solido => deformación elástica

Fluido => deformación permanente

En medios Newtonianos hay una dependencia lineal entre el esfuerzo y la deformación:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + C'_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Al igual que en la ley de Hook, las condiciones de simetría e isotropía reducen los parámetros de esta ecuación a dos:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \lambda'\theta'\delta_{ij} + 2\eta\varepsilon_{kl}$$

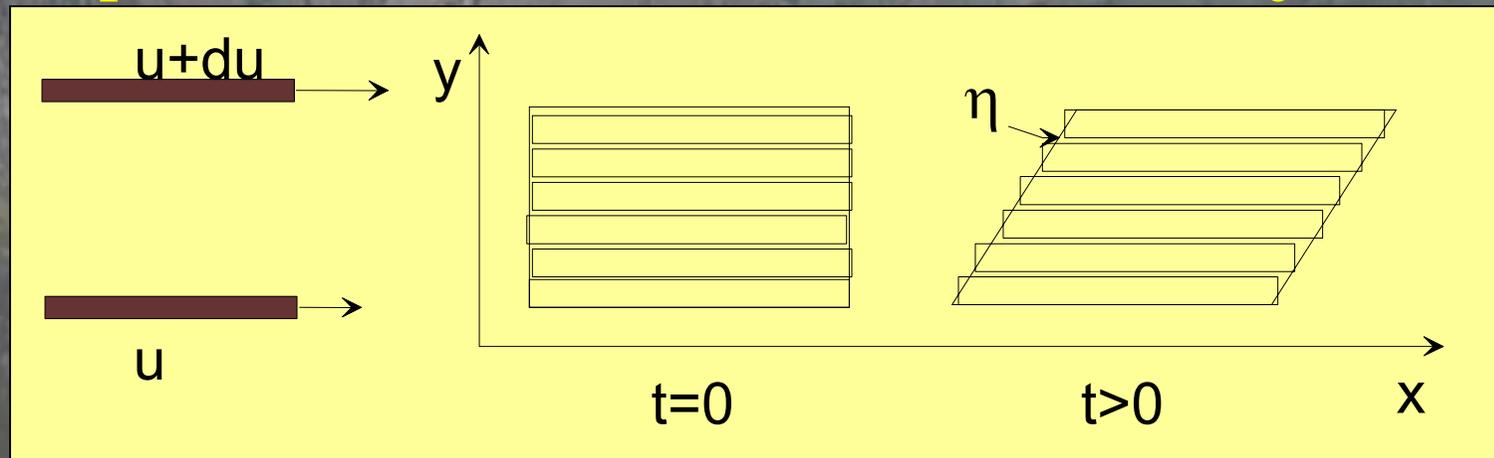
$$\text{con: } \theta' = \varepsilon_{kk} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}; \quad P = \text{presion de fluidos}$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Sumando en la relación anterior los esfuerzos normales:

$$\sigma_{ii} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = -3P + 3\lambda'\theta' + 2\eta\theta' = -3P$$
$$\Rightarrow [3\lambda' + 2\eta]\theta' = 0 \Rightarrow [3\lambda' + 2\eta] = 0; \quad \lambda' = -\frac{2}{3}\eta$$

Entonces la relación esfuerzo tasa de deformación puede escribirse en términos de un parámetro único que corresponde a la viscosidad o resistencia al flujo:



# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Material	Viscosidad [Pas]
Aire (15 °C)	$2 \times 10^{-5}$
Agua (15 °C)	$11 \times 10^{-3}$
Mercurio (15 °C)	$1.6 \times 10^{-3}$
Alcohol (15 °C)	$1.3 \times 10^{-3}$
Aceite (15 °C)	0.1
Glicerina (15 °C)	2
Litósfera	$10^{21}-10^{23}$
Astenósfera	$10^{19}-10^{21}$
Manto	$10^{22}$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Expresando entonces la relación esfuerzo deformación en términos de la viscosidad:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} - \frac{2}{3}\eta\theta\cdot\delta_{ij} + 2\eta\varepsilon_{kl}$$

Si la viscosidad es nula, entonces el esfuerzo es igual a la presión de fluidos:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij}$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NEWTONIANO)

Si el medio es incompresible:

$$\Rightarrow \theta \dot{=} 0; \text{ entonces :}$$

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\eta\dot{\varepsilon}_{kl}$$

En términos del esfuerzo deviatorico:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + P\delta_{ij} = 2\eta\dot{\varepsilon}_{kl}$$

Veremos en el próximo capítulo que esta ley constitutiva permite resolver la ecuación de movimiento:

$$\frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial x_j} + \rho X_i = \rho a_i$$

En los siguientes términos:

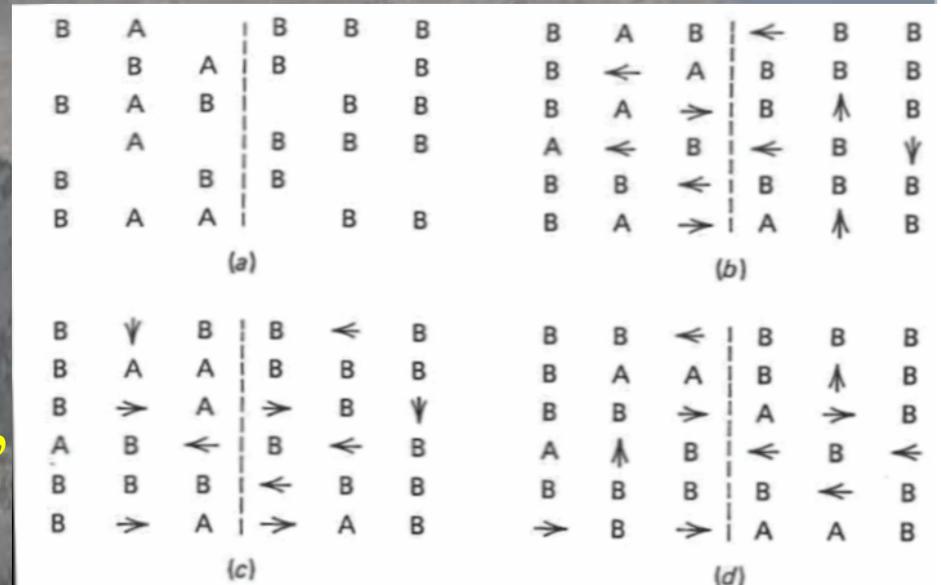
$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \eta \nabla^2 v_i + \rho X_i = \rho a_i$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (Reología a escala microscópica)

El proceso de deformación viscosa (“creep”) ocurre a escala atómica de acuerdo a mecanismos de difusión y dislocación.

Creep de difusión: Sometida la red cristalina a un dado esfuerzo los átomos se difunden al interior y también sobre las fronteras del grano.

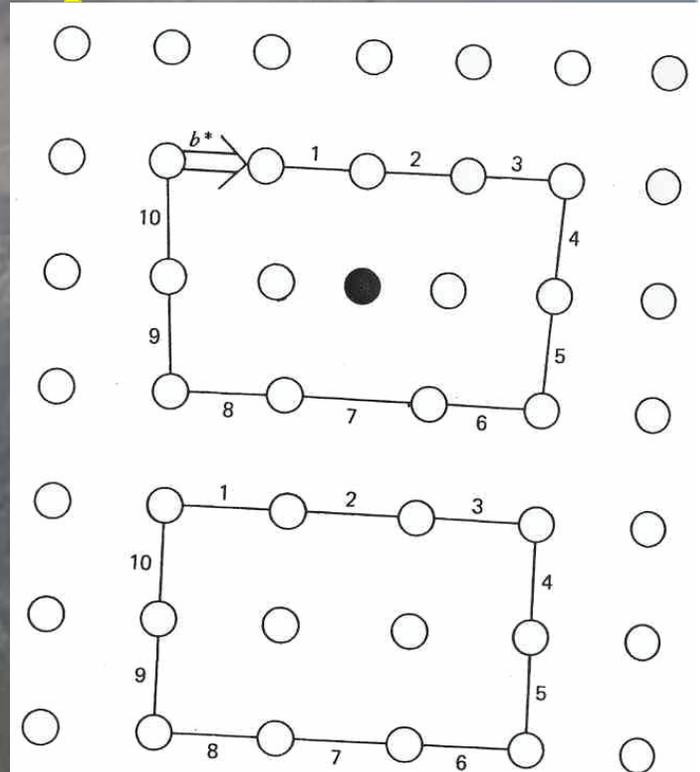
Al inicio (a) existen vacancias y todas las especies menores (A) están a la izquierda de línea segmentada, luego de un tiempo los átomos migran a las vacancias de la red cristalina (b), y eventualmente terminan distribuidos en forma aleatoria (c y d).



# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (Reología a escala microscópica)

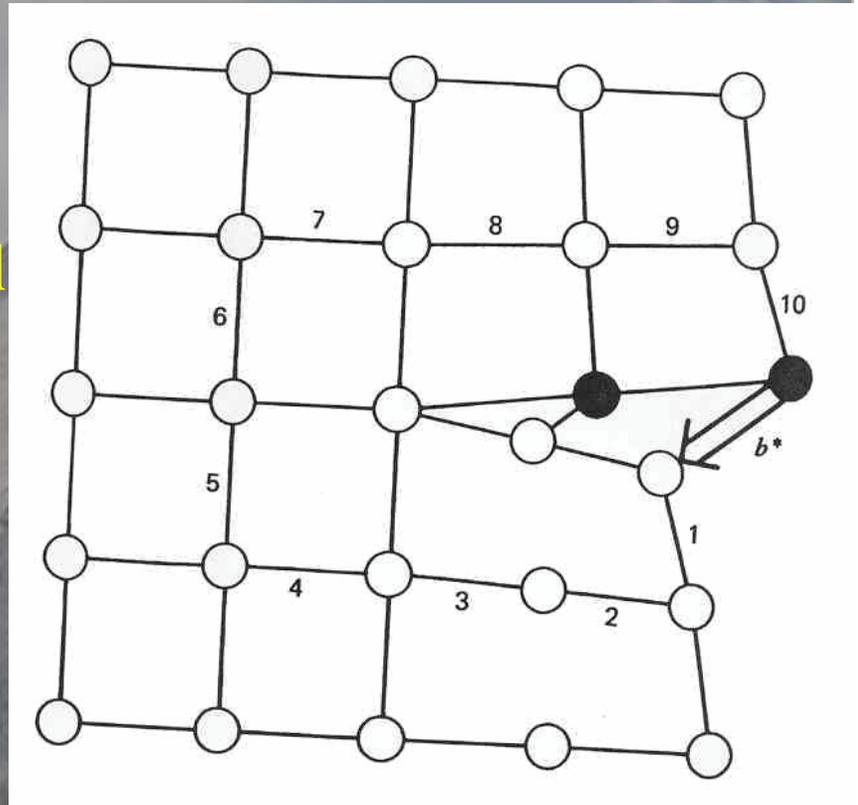
Creep de dislocación: A diferencia del mecanismo anterior el proceso de flujo sub-sólido ocurre en este caso como producto de la migración de dislocaciones asociadas a imperfecciones que ocurren en dos formas básicas (borde (“edge”) y torsión (“screw”)), que al superponerse pueden explicar formas más complejas.

Creep de dislocación de borde: la dislocación ocurre en un plano perpendicular a la red cristalina y se representa por el círculo negro. Esta dislocación produce compresión en la parte superior y tensión en la inferior. Esta tensión induce la deformación de la red cristalina con imperfecciones en el plano perpendicular a la dislocación.



# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (Reología a escala microscópica)

Creep de dislocación de torsión: en este caso la dislocación y la deformación ocurren en un mismo plano que es perpendicular a la red cristalina mostrada en la figura, siguiendo un sentido espiral en los planos superiores al plano cristalino mostrado en la figura



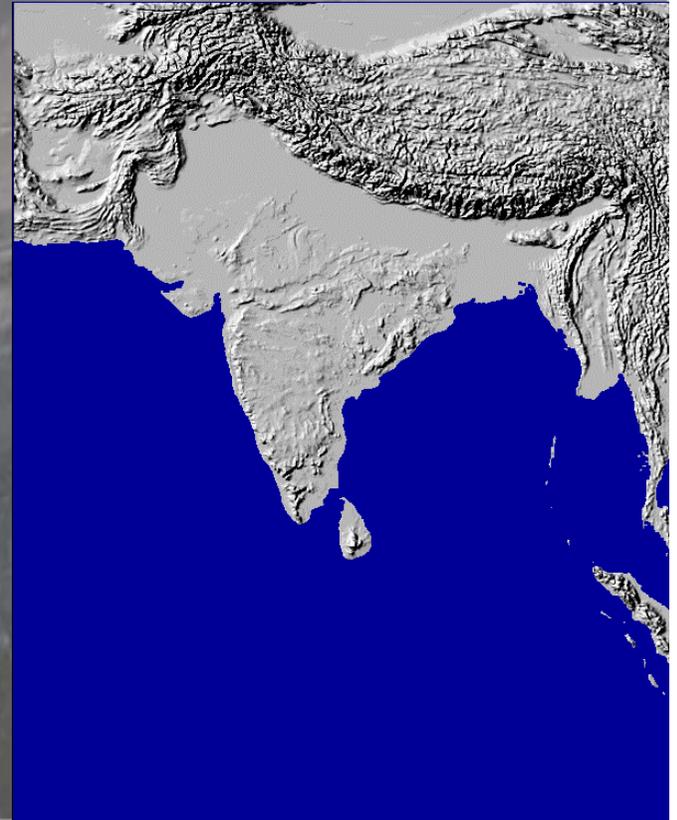
# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

En muchos materiales de interés geológico, la relación esfuerzo deformación es no lineal (por ejemplo en los Himalayas en donde la deformación tiende a concentrarse en la zona de colisión de India sobre el Tibet):

Asumiendo una deformación uniaxial, en la cual la única componente distinta de cero es el esfuerzo de cizalle:

$$\dot{\varepsilon}_s = A \sigma_s^n$$

Donde  $A$  es un parámetro que depende de la presión, temperatura, y el tipo de material, y  $n$  es un número, generalmente entero que depende del tipo de material (ej, olivino,  $n=3$ )



# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

La expresión general de la ley de potencias debe utilizar una relación que ligue los invariantes de la tasa de esfuerzo y el esfuerzo deviatorico, dado que la ley de flujos no depende de la presión de fluidos.

De acuerdo a la representación en valores principales, los invariantes de primer y segundo orden del esfuerzo y tasa de deformación deviatorico son:

$$I_1' = \sigma'_{11} + \sigma'_{22} + \sigma'_{33} = 0$$

$$E_1' = \varepsilon'_{11} + \varepsilon'_{22} + \varepsilon'_{33} = 0$$

$$I_2' = -\left[\sigma'_{11} \sigma'_{22} + \sigma'_{22} \sigma'_{33} + \sigma'_{33} \sigma'_{11}\right] + \sigma'^2_{12} + \sigma'^2_{13} + \sigma'^2_{23}$$

$$E_2' = -\left[\varepsilon'_{11} \varepsilon'_{22} + \varepsilon'_{22} \varepsilon'_{33} + \varepsilon'_{33} \varepsilon'_{11}\right] + \varepsilon'^2_{12} + \varepsilon'^2_{13} + \varepsilon'^2_{23}$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

Utilizando ambos invariantes, se puede reescribir el segundo invariante como:

$$I_2' = -\frac{1}{2} \left[ \sigma_{11}'^2 + \sigma_{22}'^2 + \sigma_{33}'^2 \right] + \sigma_{12}'^2 + \sigma_{23}'^2 + \sigma_{31}'^2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'$$

$$E_2' = -\frac{1}{2} \left[ \varepsilon_{11}'^2 + \varepsilon_{22}'^2 + \varepsilon_{33}'^2 \right] + \varepsilon_{12}'^2 + \varepsilon_{23}'^2 + \varepsilon_{31}'^2$$

$$= \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}' \varepsilon_{ij}'$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

Dado que la tasa de esfuerzo deviatorico se puede escribir como:

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \underbrace{\theta}_{\dot{\theta}} \delta_{ij} = \varepsilon_{ij} \Rightarrow E_2' = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij}$$

Utilizando el segundo invariante del esfuerzo deviatorico y la tasa de deformación, se define el esfuerzo y la tasa de deformación efectiva como:

$$\sigma'_E = \left[ \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right]^{1/2} ; \varepsilon'_E = \left[ \frac{1}{2} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \right]^{1/2}$$

De tal forma que la ley constitutiva no lineal se puede expresar en términos de invariantes como:

$$\varepsilon'_E = A \sigma'^n_E$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

Si expresamos una relación de proporcionalidad entre cada componente de la tasa de deformación y el esfuerzo en una dada dirección:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \lambda \sigma'_{ij}$$

Donde ahora  $\lambda$  no es una constante sino que una función que dependiente del esfuerzo y en consecuencia la posición. Si el medio es isótropo, entonces podemos expresar la ley constitutiva no lineal en términos de  $\lambda$ :

$$\dot{\varepsilon}_D = \lambda \sigma'_D$$

# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

Pero sabemos que:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_D &= A \sigma_D'^n \Rightarrow \lambda = A \sigma_D'^{n-1} \\ \Rightarrow \varepsilon_{ij}' &= A \sigma_D'^{n-1} \sigma'_{ij} \quad \text{o} \quad \sigma'_{ij} = \varepsilon_{ij}' / [A \sigma_D'^{n-1}]\end{aligned}$$

Entonces la viscosidad efectiva no es solo una función que depende de la temperatura, presión y tipo de material, sino que además depende de la tasa de deformación o el esfuerzo, por consiguiente de la posición. La constante de proporción en esta relación no lineal es función de la temperatura (absoluta), en consecuencia se puede reescribir la relación anterior como (ley de Dorn):

$$\dot{\varepsilon}_D = A_o \sigma_D'^n \exp(-E / RT)$$

con E: energía de activación;

T: temperatura absoluta; R: cte. de gases

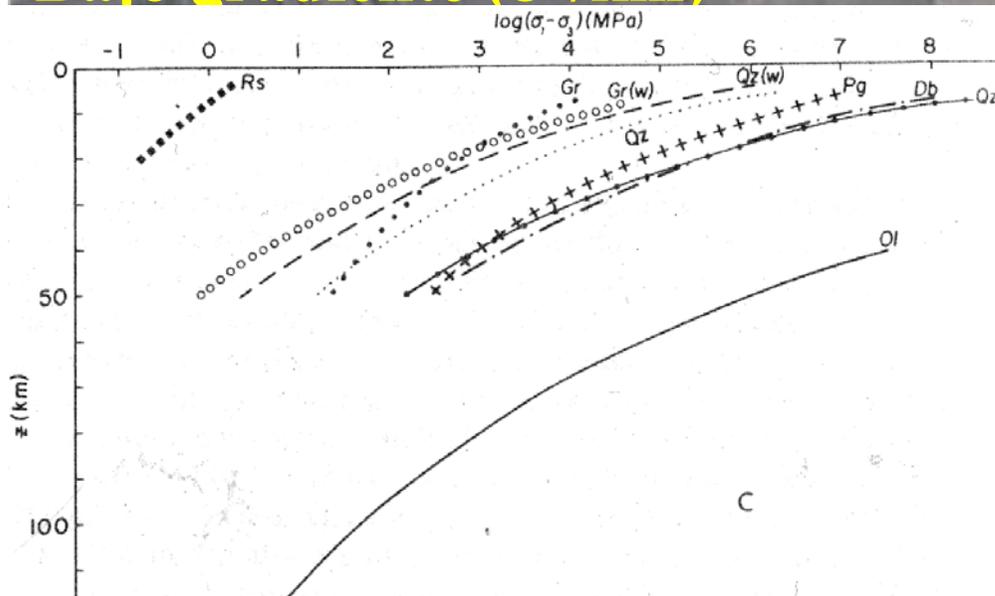
# RELACION ESFUERZO TASA DE DEFORMACION (FLUJO NO LINEAL: LEY DE POTENCIAS)

La temperatura aumenta cuasi-linealmente con la profundidad en consecuencia la resistencia a la deformación decae exponencialmente con la profundidad.

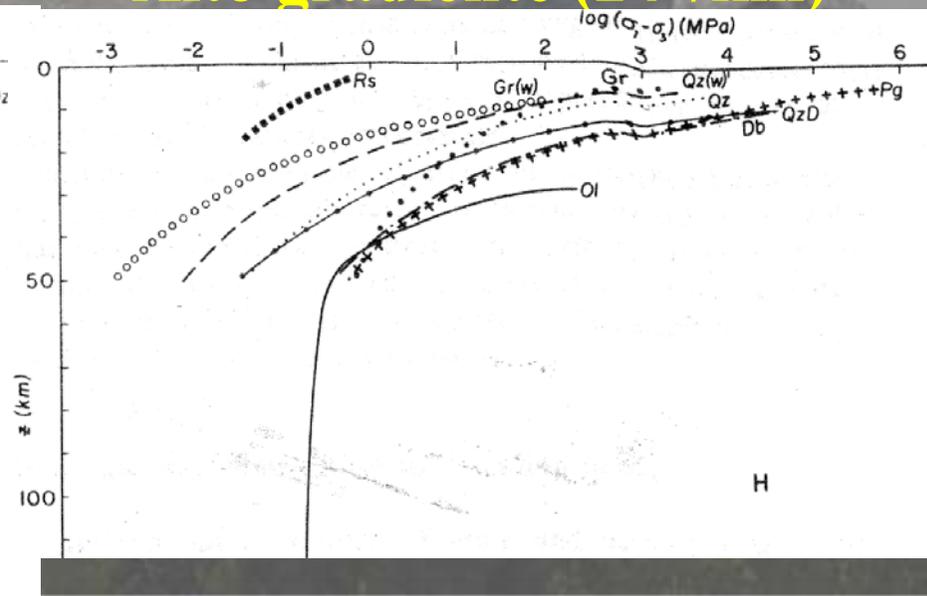
$$\dot{\epsilon}_D = A_o \sigma_D^n \exp(-E / RT)$$

Material	A (GPa <sup>-n</sup> s <sup>-1</sup> )	n	E (kJ mol <sup>-1</sup> )
rocksalt	5.0 × 10 <sup>16</sup>	5.3	102
granite	5.0	3.2	123
granite (wet)	10 <sup>2</sup>	1.9	137
quartzite	10 <sup>2</sup>	2.4	156
quartzite (wet)	2.0 × 10 <sup>3</sup>	2.3	154
albite rock	1.3 × 10 <sup>6</sup>	3.9	234
anorthosite	1.3 × 10 <sup>6</sup>	3.2	238
quartz diorite	2.0 × 10 <sup>4</sup>	2.4	219
diabase	3.2 × 10 <sup>6</sup>	3.4	260

Bajo gradiente (8°/km)



Alto gradiente (24°/km)



# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

Como ya hemos dicho, la reología es función de factores propios del material como así también condiciones externas, tales como presión, temperatura, etc. Previamente hemos estudiado los dos comportamientos extremos que corresponde a dos ambientes geológicos determinados.

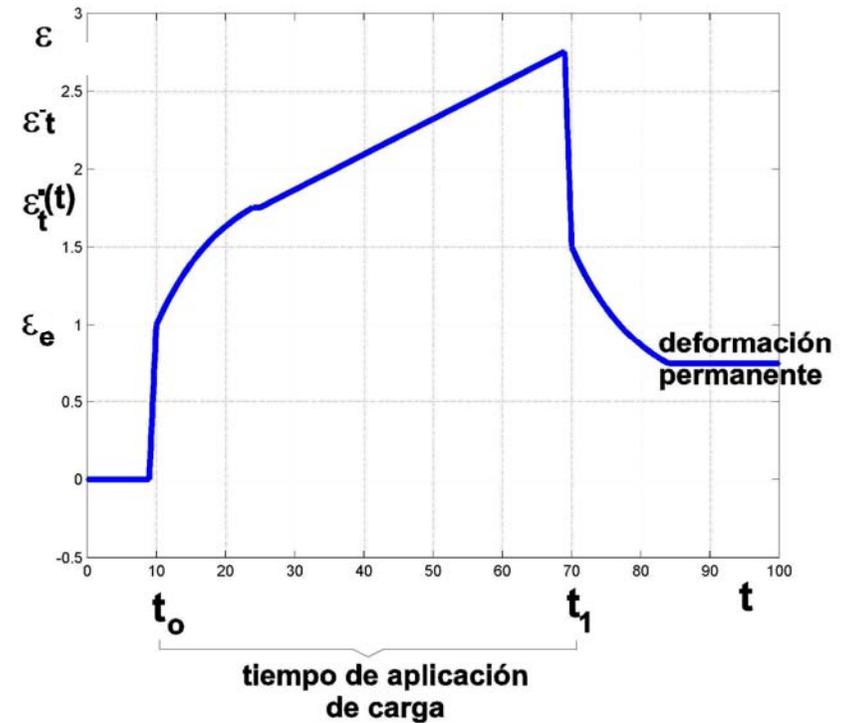
Respuesta elástica: asociada a fuerzas de corta duración, baja temperatura y presión (ambientes en general someros);

Respuesta dúctil: de alta temperatura y presión, y esfuerzos permanentes (eg. Litósfera – manto)

Entre estos procesos extremos hay una amplia gama de comportamientos que dependen del tiempo en el cual se aplican los esfuerzos y se preservan las propiedades del material sujeto a deformación.

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

Una situación general para ejemplificar cualitativamente esta situación es la siguiente (caso de esfuerzo constante por un dado intervalo de tiempo  $t_0$  -  $t_1$ )



$$\epsilon = \underbrace{\epsilon_e}_{\text{elástico instantáneo al inicio y fin de carga}} + \underbrace{\epsilon_t(t)}_{\text{deformación permanente en función del tiempo, con crecimiento decreciente en el tiempo}} + \underbrace{\epsilon \cdot t}_{\text{deformación permanente para una tasa de deformación constante}}$$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

Este comportamiento generalizado se puede desagregar en tres comportamientos distintivos en los cuales los estilos de deformación extrema: elástica y viscosa se representan como un resorte y amortiguador, respectivamente:



$\mu_k$



$\eta_k$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

1) Comportamiento Kelvin (arreglo paralelo, suma de esfuerzos)

$$\sigma = 2\mu_k \varepsilon + 2\eta_k \varepsilon'$$



La solución de esta ecuación diferencial en  $\varepsilon$  es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{2\mu_k} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\mu_k}{\eta_k} t\right) \right)$$

Para  $t \rightarrow \infty$   
Def. Elastica

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{2\mu_k}$$

Para  $t \rightarrow 0$   
def. Viscosa  
o elastica  
retardada

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{2\eta_k} t$$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

1) Comportamiento Kelvin (arreglo paralelo, suma de esfuerzos)

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_o}{2\mu_k} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\mu_k}{\eta_k} t\right) \right)$$



Si la carga se desactiva en un determinado instante:

$$\mu_k \varepsilon = -\eta_k \varepsilon'$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_o \exp\left(-\frac{\mu_k}{\eta_k} t\right)$$

$\Rightarrow$  decaimiento asintótico a cero

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

2) Comportamiento Maxwell (arreglo en serie, suma de respuestas de deformación elástica y viscosa)



$$\sigma = 2\mu_M \varepsilon \ ; \ \sigma = 2\eta_M \dot{\varepsilon}$$

La suma de las tasas de deformación se obtiene diferenciando c/r al tiempo la deformación elástica

$$\underbrace{\varepsilon_{elastica}^{\dot{}} = \frac{\dot{\sigma}}{2\mu_M} \quad \varepsilon_{viscosa}^{\dot{}} = \frac{\sigma}{2\eta_M}}_{\varepsilon_{total}^{\dot{}} = \frac{\dot{\sigma}}{2\mu_M} + \frac{\sigma}{2\eta_M}}$$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

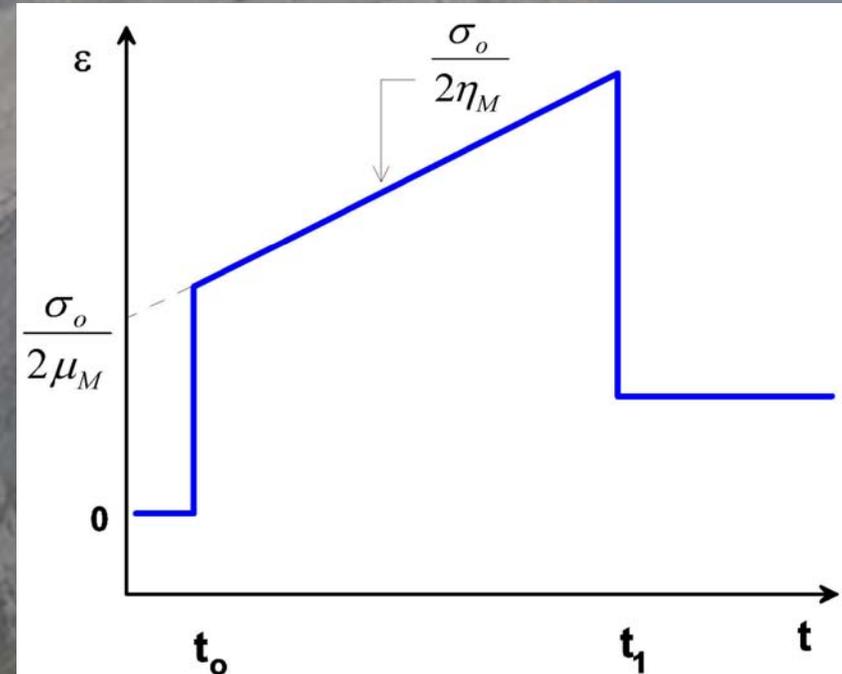
2) Comportamiento Maxwell (arreglo en serie, suma de respuestas de deformación elástica y viscosa)

$$\dot{\varepsilon}_{total} = \frac{\dot{\sigma}}{2\mu_M} + \frac{\sigma}{2\eta_M}$$



La solución de esta ecuación diferencial para un esfuerzo constante  $\sigma_0$  es:

$$\varepsilon_{total} = \frac{\sigma_0}{2\mu_M} + \frac{\sigma_0}{2\eta_M} t$$



# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

- 2) Comportamiento Maxwell (arreglo en serie, suma de respuestas de deformación elástica y viscosa)



La solución de la ecuación diferencial para una deformación constante es:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\mu_M}{\eta_M} t\right)$$

es decir una deformación constante exige una relajación de los esfuerzos exponencial, con una constante de relajación igual a:

$$\frac{\eta_M}{\mu_M}$$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

## 3) Comportamiento Burgers (arreglo en serie y paralelo)

Una generalización de los modelos anteriores, que consiste en unir en forma serial un comportamiento tipo Kelvin (paralelo) y Maxwell (serial):



En este caso la relación esfuerzo deformación se expresa como:

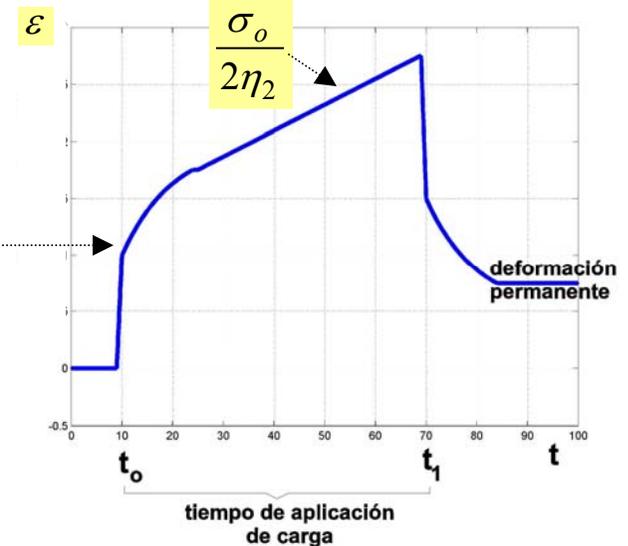
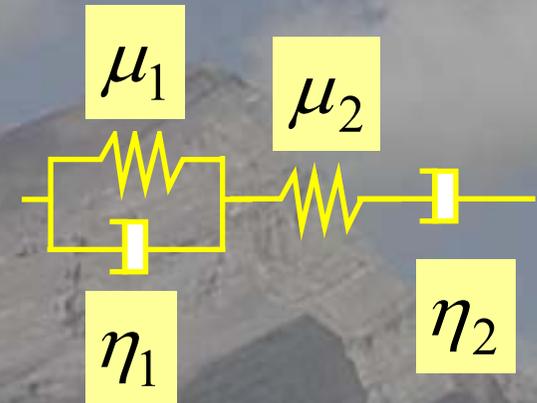
$$2\eta_1 \varepsilon'' + 2\mu_1 \varepsilon' = \frac{\eta_1}{\mu_2} \sigma'' + \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} + \frac{\mu_1}{\mu_2} + 1 \right) \sigma' + \frac{\mu_1}{\eta_2} \sigma$$

# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

## 3) Comportamiento Burgers (arreglo en serie y paralelo)

Para un esfuerzo constante esta ecuación diferencial tiene por solución:

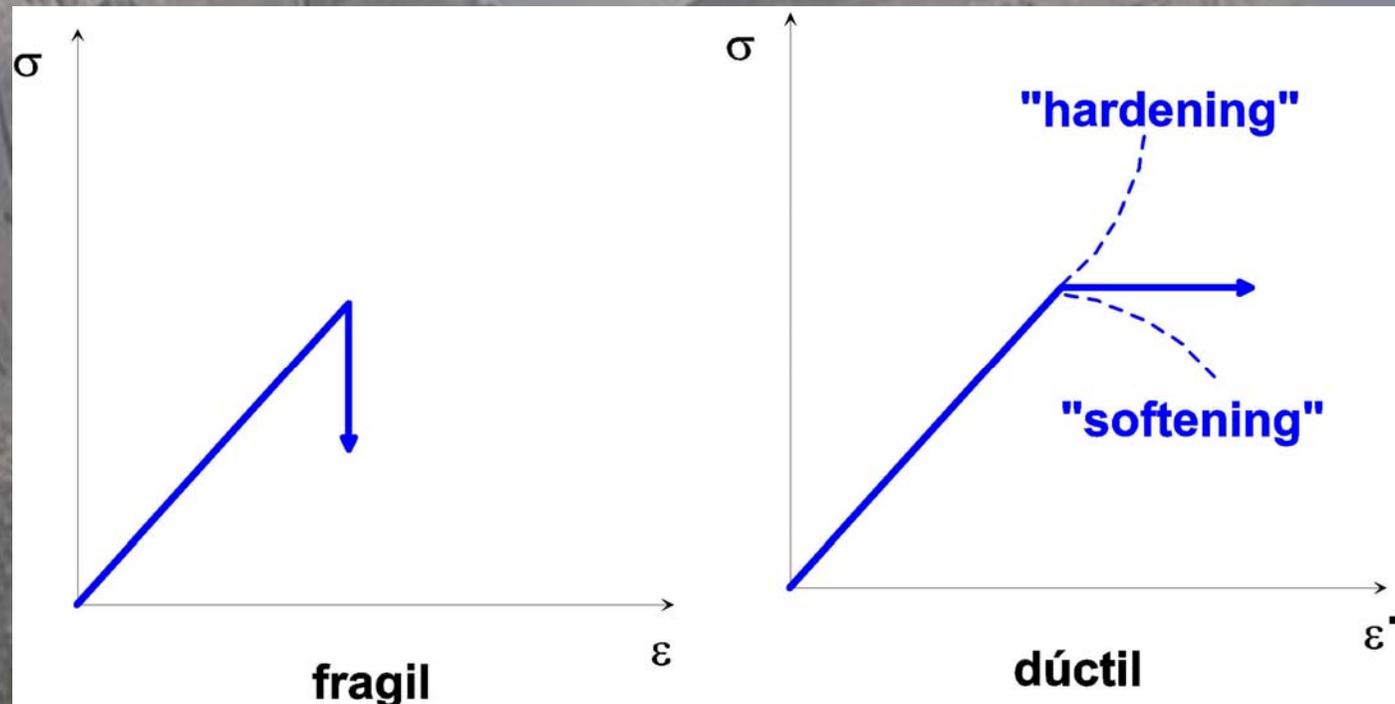
$$\varepsilon = \underbrace{\frac{\sigma_o}{2\mu_2} + \frac{\sigma_o}{2\eta_2} t}_{\text{Kelvin}} + \underbrace{\frac{\sigma_o}{2\mu_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\mu_1}{\eta_1} t\right) \right]}_{\text{Maxwell}}$$



# EFECTOS TEMPORALES EN LA DEFORMACIÓN

## 4) Esfuerzo crítico:

Cuando un cuerpo sometido a esfuerzo supera el límite que es capaz de resistir sin deformación permanente, el material se falla en forma frágil o dúctil, adquiriendo una condición irreversible.



# DEFORMACIÓN FRAGIL

En ambientes de baja temperatura y presión, las rocas se deforman en forma frágil si el esfuerzo es suficientemente grande. Las escalas del fallamiento tienen dimensión fractal, cubriendo varios ordenes de magnitud en tamaño de la falla y el desplazamiento asociado.

El desplazamiento en las fallas ocurre cuando la energía elástica acumulada supera el nivel crítico de la resistencia en el plano de falla. Este comportamiento se conoce como “stick-slip”. Cuando la falla esta soldada (“stick”) se acumula energía elástica hasta que se supera un determinado umbral y luego se produce el deslizamiento (“slip”), y se repite el ciclo. Para fallas kilométricas los desplazamientos en cada terremoto pueden alcanzar metros a algunas decenas. Este fenómeno puede ser repetitivo por varios millones de años, alcanzando desplazamientos totales que son kilometricos.

# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Criterio de Mohr-Coulomb

Las condiciones de esfuerzo al momento del fracturamiento en una roca determina el criterio de resistencia a la deformación.

No existe una teoría rigurosa al respecto. Una primera aproximación al problema es el criterio de Coulomb que propone una relación lineal entre el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal en el plano de fractura:

$$|\tau| = \tau_o + \mu_i \sigma_n = \tau_o + \tan(\varphi) \sigma_n$$

Utilizando la representación de los esfuerzos en un determinado plano en función de los esfuerzos principales:

$$\sigma_n = 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) + 0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos 2\theta$$

$$\tau = -0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$$

Se puede representar el estado de esfuerzo y el criterio de fractura en un círculo de Mohr

# DEFORMACIÓN FRAGIL

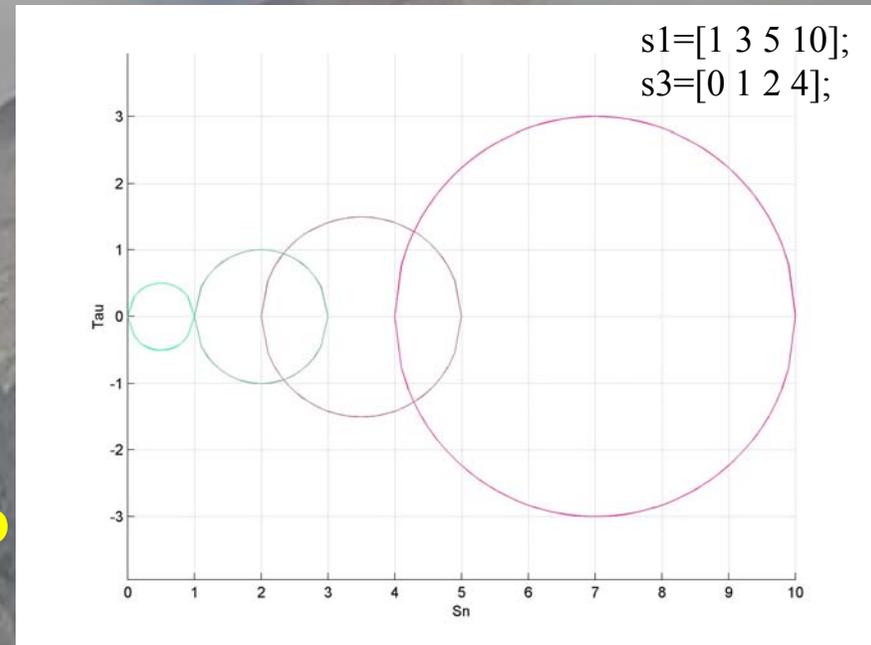
- Criterio de Mohr-Coulomb

$$\underbrace{[\sigma_n - 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)]^2}_{(x-x_o)^2} = \underbrace{[0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)]^2}_{r^2} \cdot \cos^2 2\theta$$

$$\underbrace{\tau^2}_{y^2} = \underbrace{[-0.5(\sigma_1 - \sigma_3)]^2}_{r^2} \sin^2 2\theta$$

Sumando ambas expresiones se obtiene la ecuación de un círculo centrado en el valor medio de los esfuerzos principales y cuyo radio es un medio de la respectiva diferencia:

$$[\sigma_n - 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)]^2 + \tau^2 = [0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)]^2$$



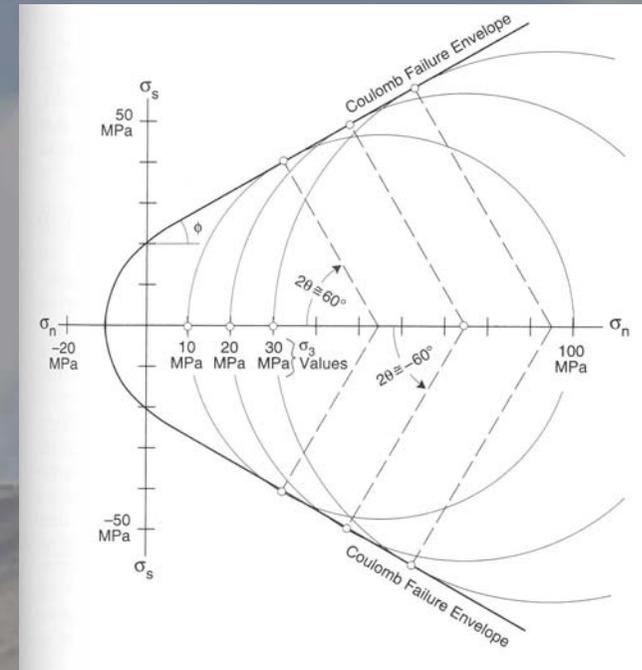
# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Criterio de Mohr-Coulomb

Reemplazando en la expresión anterior el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb:

$$\begin{aligned} & \left[ \sigma_n - 0.5 \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 + (\tau_o + \mu_i \sigma_n)^2 \\ & = \left[ 0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \right]^2 \end{aligned}$$

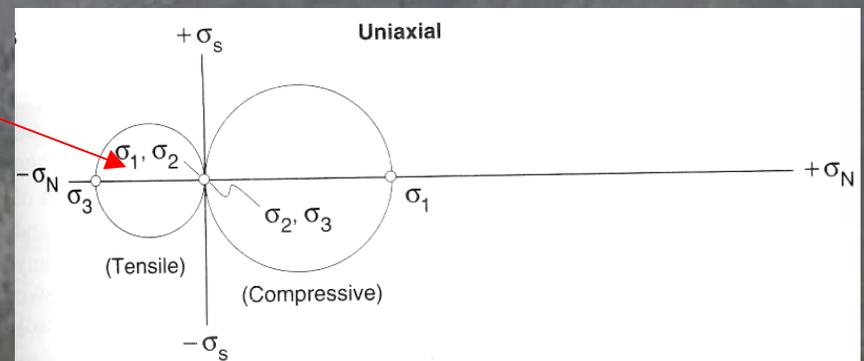
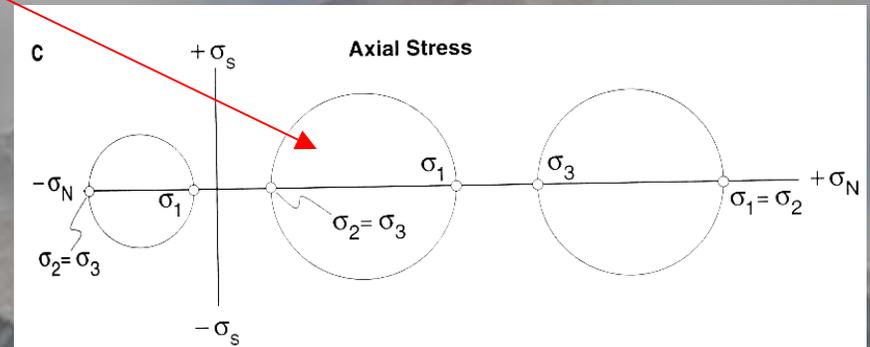
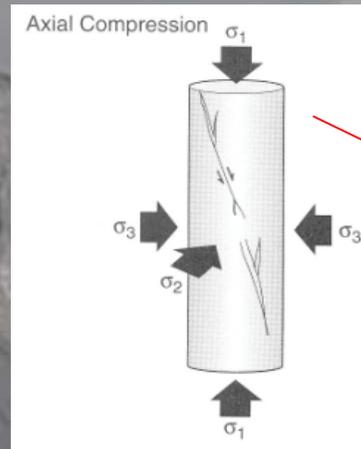
Permite determinar una familia de esfuerzos para los cuales se cumple la intersección del círculo de Mohr y el criterio de ruptura de Coulomb. El modelo predice dos fallas conjugadas, con un ángulo de ruptura que es aproximadamente  $30^\circ$  c/r al esfuerzo principal  $(\pi/4 - \phi/2)$ . Un resultado importante de este criterio de ruptura dice relación con el esfuerzo deviatorico necesario para producir ruptura en tensión: considerablemente menor que el requerido para compresión.



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Criterio de Mohr-Coulomb

## Aplicaciones especiales:

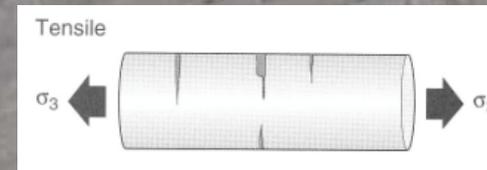


# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Criterio de Mohr-Coulomb

El criterio de Mohr-Coulomb esta definido exclusivamente para compresión, para un criterio mas general se debe incorporar un criterio de ruptura en extensión, por ejemplo que la ruptura en tensión ocurrirá en un plano perpendicular a la dirección del esfuerzo principal menor, cuando este exceda un esfuerzo  $T_o$ :

$$\sigma_3 = -T_o$$

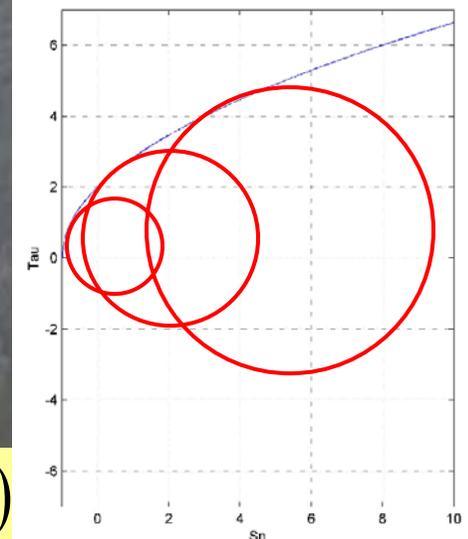


Otro criterio de ruptura utilizado es el de Griffith:

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8T_o(\sigma_1 + \sigma_3) &= 0; & \text{si } \sigma_1 > -3\sigma_3 \\ \sigma_3 = -T_o; & & \text{si } \sigma_1 < -3\sigma_3 \end{aligned}$$

Con la siguiente envolvente de Mohr:

$$\tau^2 = 4T_o(\sigma_n + T_o)$$



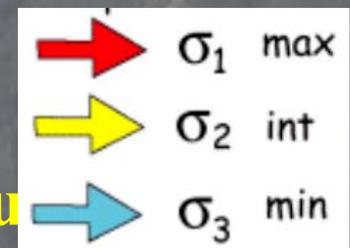
# DEFORMACIÓN FRAGIL

Clasificación de fallas:

Existen 3 tipos fundamentales de fallas que pueden ser caracterizadas en términos de los esfuerzos principales a los cuales están sometidos:

- Fallas Inversas
- Fallas Normales
- Fallas transcurrentes o de rumbo

Para esta caracterización se asume que los esfuerzos principales corresponden a los ejes coordenados y se han organizado en forma decreciente de acuerdo a la siguiente nomenclatura:



Adicionalmente se considera que el esfuerzo principal vertical es siempre la columna litostática, y que el esfuerzo deviatorico en esta dirección es siempre nulo:

$$\sigma_{zz} = \rho g z; \Delta \sigma_{zz} = 0$$

# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Fallas Inversas (acomoda compresión horizontal)

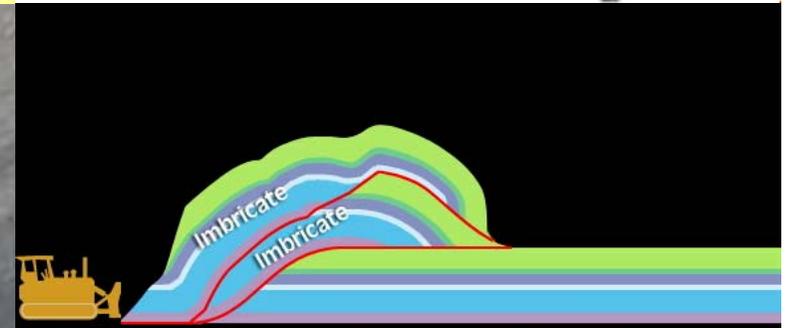
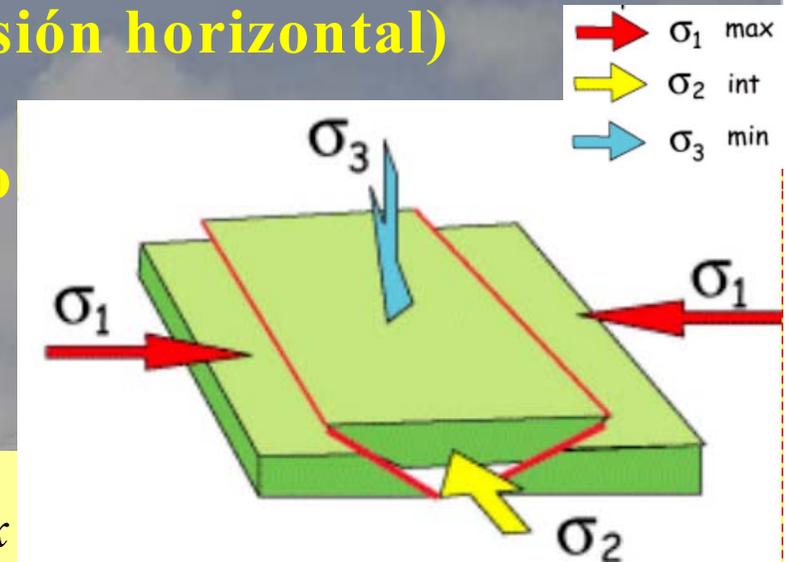
Para que se produzca un fallamiento inverso se requiere un esfuerzo deviatorico  $> 0$  en dirección x que supere el esfuerzo litostático:

$$\sigma_{xx} = \sigma_1 = \rho g z + \Delta \sigma_{xx} = \sigma_3 + \Delta \sigma_{xx}$$

Asumiendo que no hay deformación en sentido Y, entonces podemos suponer deformación plana entre el eje X y el Z, tal que:

$$\Delta \sigma_{yy} = \nu \Delta \sigma_{xx}; [\nu < 1; \Delta \sigma_{xx} > 0] \Rightarrow \sigma_{yy} = \rho g z + \nu \Delta \sigma_{xx} = \sigma_2$$

Entonces en fallamiento inverso el esfuerzo principal menor es vertical, y el esfuerzo principal mayor es horizontal y en sentido de la deformación mayor.



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Fallas Normales (acomoda extensión horizontal)

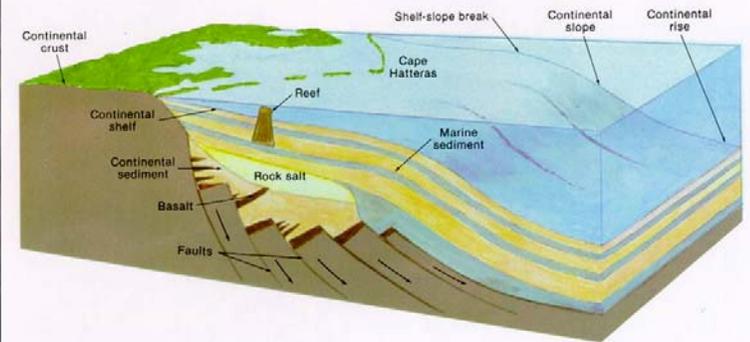
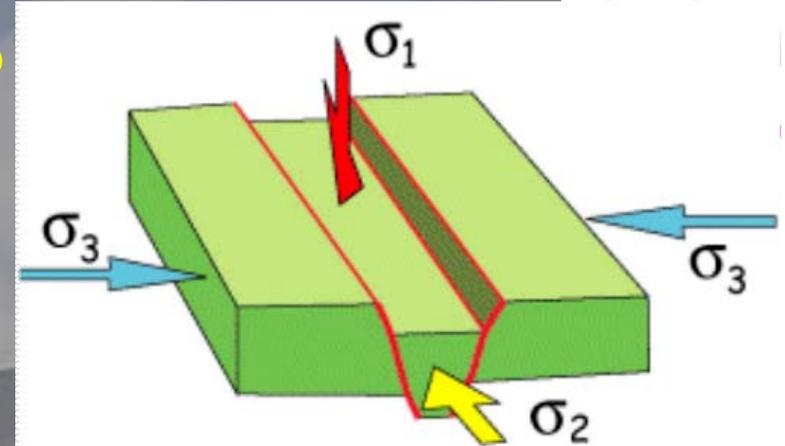
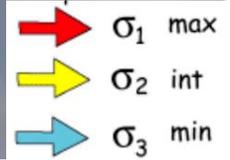
En este caso el esfuerzo es deviatorico menor que 0, entonces:

$$\sigma_{xx} = \sigma_3 = \rho g z + \Delta \sigma_{xx} = \sigma_1 + \Delta \sigma_{xx}$$

Es decir el esfuerzo principal es vertical, y nuevamente asumiendo deformación plana, el esfuerzo deviatorico en sentido Y es también tensional pero inferior al correspondiente en sentido X:

$$\Delta \sigma_{yy} = \nu \Delta \sigma_{xx}; [\nu < 1; \Delta \sigma_{xx} < 0] \Rightarrow \sigma_{yy} = \rho g z + \nu \Delta \sigma_{xx} = \sigma_2$$

Luego el esfuerzo principal en esta dirección es nuevamente intermedio.



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Falla de rumbo (la deformación es horizontal)

En este caso el esfuerzo deviatorico horizontal es compresional en un sentido y extensional en la dirección perpendicular:

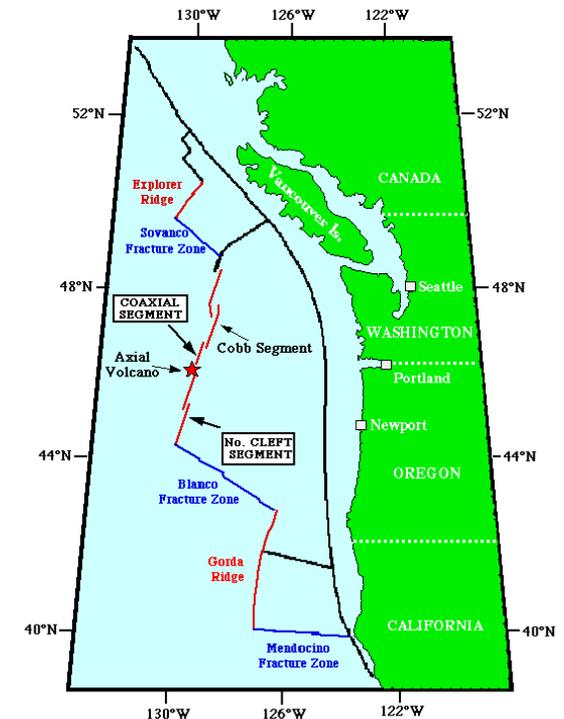
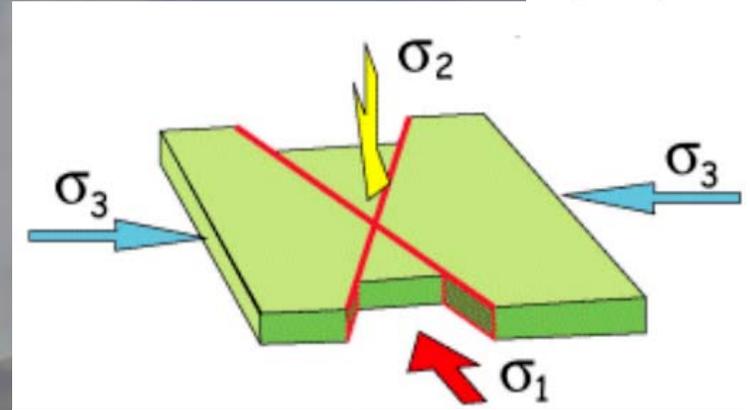
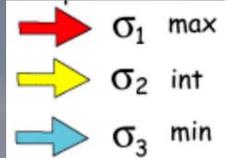
$$\Delta\sigma_{xx} < 0; \Delta\sigma_{yy} > 0$$

Entonces los esfuerzos principales mayor y menor están contenidos en el plano horizontal, y el esfuerzo principal intermedio es vertical:

$$\sigma_{xx} = \rho g z + \Delta\sigma_{xx} = \sigma_3;$$

$$\sigma_{yy} = \rho g z + \Delta\sigma_{yy} = \sigma_1;$$

$$\sigma_{zz} = \rho g z = \sigma_2;$$



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Fricción

Experimentalmente se demuestra que la resistencia al desplazamiento en una falla es proporcional al esfuerzo normal (ley de Amonton).

Para esfuerzos inferiores a 200 Mpa (2Kbar) se observa que:

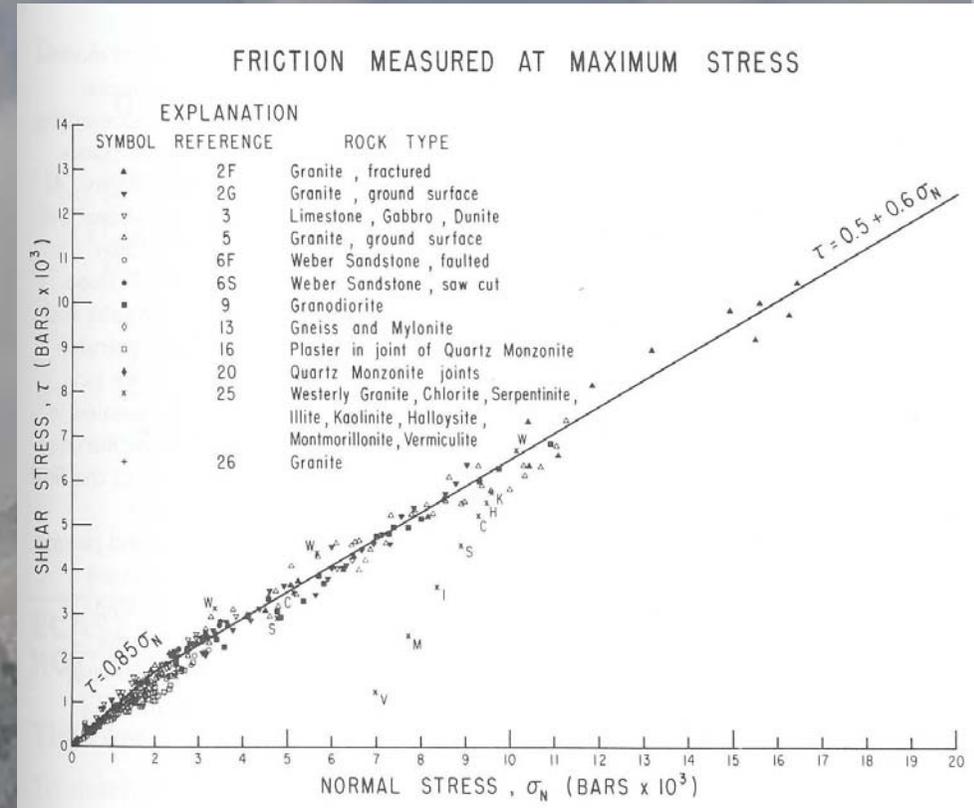
$$|\tau_{f_s}| = f_s \sigma_n; \quad f_s = 0.85$$

Para esfuerzos mayores se cumple que:

$$|\tau_{f_s}| = f_s \sigma_n + a; \quad f_s = 0.6 \quad a = 0.5[Kbar] = 50[MPa]$$

Si existe presión de fluidos, el esfuerzo normal se reduce proporcionalmente:

$$|\tau_{f_s}| = f_s (\sigma_n - P_w)$$



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Teoría de fracturamiento de Anderson

Utilizando los conceptos anteriores, relativos a la fricción y a los modos de fracturamiento observados en la naturaleza, Anderson propone una teoría que permite definir el ángulo esperado de ruptura en función del campo de esfuerzos. Para tal efecto se considera que los esfuerzos principales están orientados en el plano horizontal y vertical, siendo el esfuerzo principal vertical la columna litostática:

$$\sigma_{zz} = \rho g z$$

El esfuerzo normal y de corte en el plano de fractura queda entonces definido por:

$$\tau = -0.5(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})\sin 2\theta$$

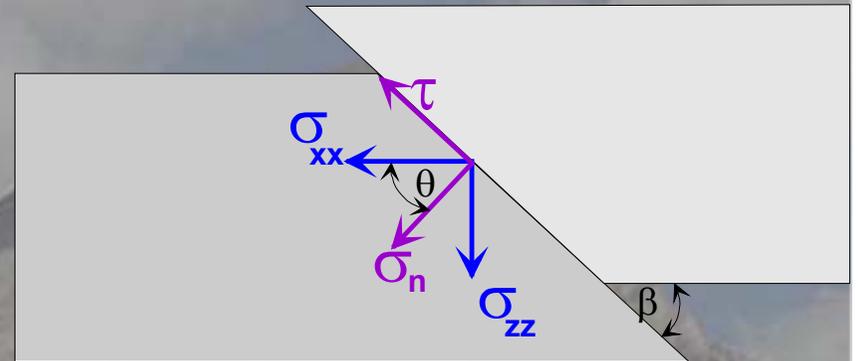
$$\sigma_n = 0.5 \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{zz}) + 0.5 \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) \cdot \cos 2\theta$$

# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Teoría de fracturamiento de Anderson

Donde el esfuerzo horizontal incluye una componente deviatorica, que es positiva en compresión y negativa en extensión:

$$\sigma_{xx} = \rho g z + \underbrace{\Delta \sigma_{xx}}_{\substack{>0: inversa \\ <0: normal}}$$



Entonces:

$$\sigma_n = \rho g z + 0.5 \cdot \Delta \sigma_{xx} (1 + \cos 2\theta)$$

$$\tau = -0.5 \cdot \Delta \sigma_{xx} \sin 2\theta$$

# DEFORMACIÓN FRAGIL

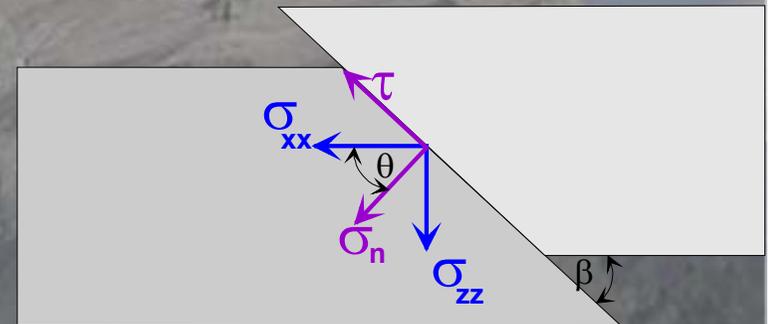
- Teoría de fracturamiento de Anderson

Incorporando estas expresiones en la ley de Amonton en presencia de presión de fluidos:

$$\pm 0.5 \cdot \Delta\sigma_{xx} \sin 2\theta = f_s \left\{ \rho g z - P_w + 0.5 \cdot \Delta\sigma_{xx} (1 + \cos 2\theta) \right\}$$

$$\Rightarrow \Delta\sigma_{xx} = \frac{2 f_s \left\{ \rho g z - P_w \right\}}{\pm 0.5 \cdot \sin 2\theta - f_s (1 + \cos 2\theta)}$$

La corteza frágil esta “prefallada” en forma relativamente homogénea en consecuencia se debería fallar en un dado ángulo que minimice el esfuerzo tectónico requerido:



$$\frac{\partial \Delta\sigma_{xx}}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow \tan 2\theta = \mp \frac{1}{f_s} \quad \text{o} \quad \tan 2\beta = \pm \frac{1}{f_s}$$

# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Teoría de fracturamiento de Anderson

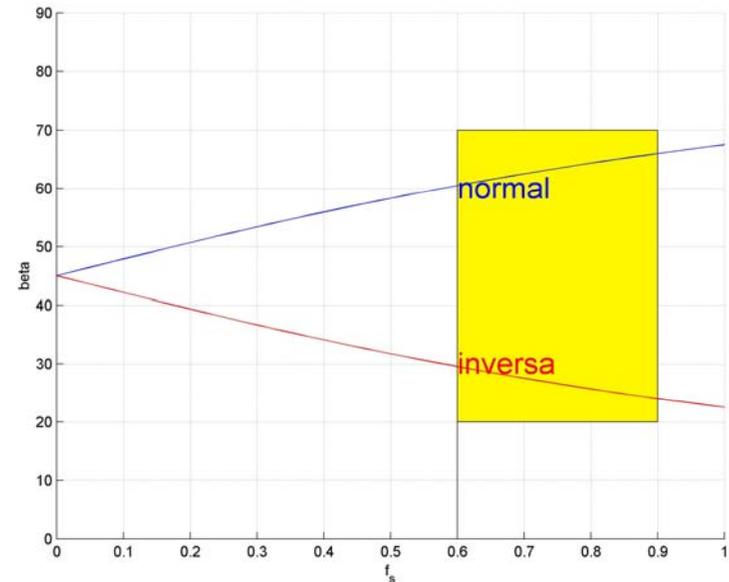
Expresando entonces el ángulo de fracturamiento (manteo) en función del coeficiente de fricción:

$$\tan 2\beta = \pm \frac{1}{f_s}$$

La zona de color amarillo entrega los valores de fricción mas comunes, en consecuencia fallas inversas mantean del orden de 25-30, mientras que fallas normales mantean ángulos entre 60 y 70°

Reemplazando esta expresión en el esfuerzo tectónico:

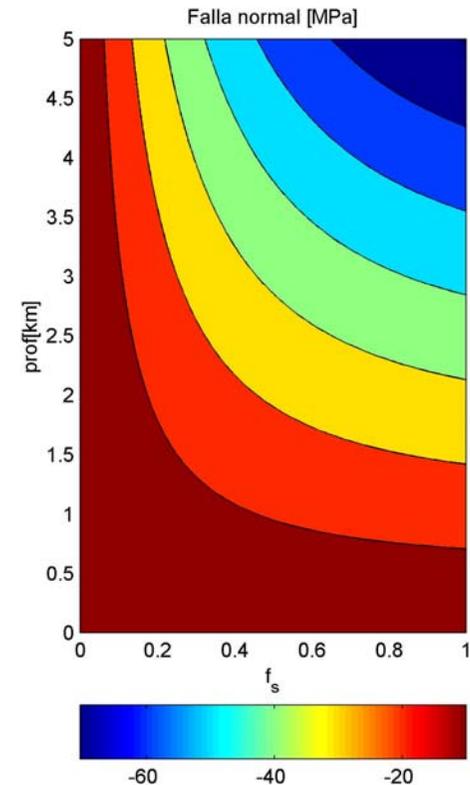
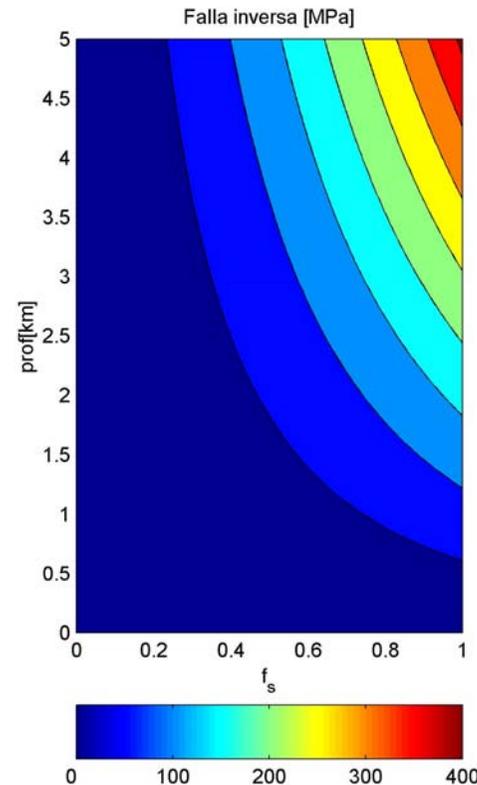
$$\Delta\sigma_{xx} = \frac{\pm 2 f_s \{ \rho g z - P_w \}}{\sqrt{1 + f_s^2} \mp f_s (1 + \cos 2\theta)}$$



# DEFORMACIÓN FRAGIL

• Teoría de fracturamiento de Anderson  
Considerando una presión de fluidos igual a la presión hidrostática, las figuras siguientes muestran el esfuerzo tectónico requerido para desarrollar fallas normales e inversas para una familia de coeficientes de fricción y profundidad:

- 1) Fallas inversas requieren de mayor esfuerzo tectónico
- 2) A mayor profundidad se incrementa el esfuerzo tectónico



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- **Teoría de fracturamiento de Anderson: Inconsistencias**  
Si bien la teoría de fracturamiento de Anderson es capaz de predecir el carácter general de la geometría de fallas normales e inversas, es importante tener en consideración que esta teoría parte de una serie de supuestos cuya validez es solo parcial. La mayor dificultad en su aplicación dice relación con:

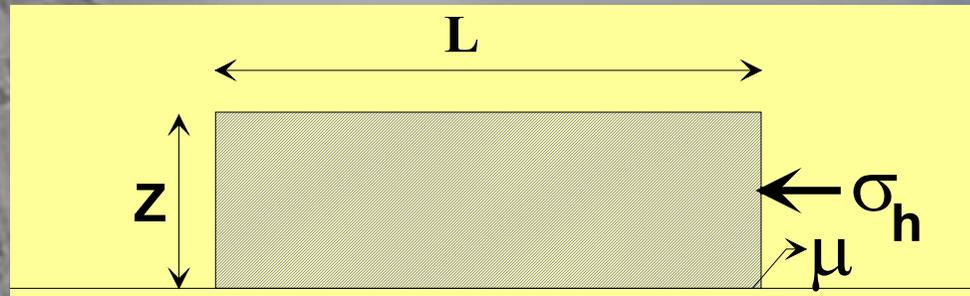
- El campo de esfuerzos varía lateralmente y a profundidad.
- Una vez activada una falla en un determinado campo de esfuerzos, constituye una zona de debilidad que puede ser reactivada en un nuevo campo de esfuerzos no necesariamente orientado en forma óptima.
- La falta de homogeneidad en la resistencia a la deformación condiciona fracturamientos en direcciones no óptimas.



# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Teoría de fracturamiento de Anderson: Inconsistencias (fallamiento inverso/normal de bajo ángulo)

Asumiendo una geometría simplificada:



La fuerza horizontal se puede expresar en términos de los esfuerzos verticales y de presión (Ley de Amonton):

$$F_h = \sigma_h z = (\sigma_v - p) \ell \mu$$

Considerando el esfuerzo vertical como la carga litostática, y la presión de fluidos como una fracción de esta:

$$\sigma_v = \rho g z;$$

$$p = \lambda \rho g z \quad [\lambda = 0.4 \text{ para condición hidrostática}]$$

# DEFORMACIÓN FRAGIL

- Teoría de fracturamiento de Anderson: Inconsistencias (fallamiento inverso/normal de bajo ángulo)

$$\sigma_h = (1 - \lambda) \ell \mu \rho g$$

Considerando  $\rho=2600 \text{ kg/m}^3$  ;  $\lambda=0.4$ ;  $\mu=0.85$ ; y que el esfuerzo máximo que puede resistir una roca para no fallarse en compresión es del orden de 200 Mpa, esto limita el largo máximo del bloque que puede ser desplazado sin que pierda su consistencia interna:

$$\ell = \frac{\sigma_h}{(1 - \lambda) \mu \rho g} = \frac{200 \cdot 10^6}{0.6 \cdot 0.85 \cdot 2600 \cdot 10} = 15[\text{km}]$$

La única opción para alcanzar mayores dimensiones es considerar una condición de sobre presión (Hubert & Rubey, 1959), en la cual  $\lambda \rightarrow 1$  y la presión de fluidos tiende a la presión litostática.

# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

El comportamiento reológico de la litósfera esta condicionado por una competencia entre el comportamiento frágil y dúctil de las rocas que la componen. Por condiciones de mínima energía la litósfera se va a deformar por aquel mecanismo que exige el menor esfuerzo en cada situación.

En función a la teoría expuesta en las secciones anteriores, la resistencia a la deformación la podemos reducir a las siguientes procesos:

• **Fragil:**  $\sigma_e = \alpha(1 - \lambda) \rho g z$

• **Dúctil:**  $\sigma_v = \left[ \frac{\varepsilon^{\circ}}{A_o} \right]^{1/n} \exp(E / nRT)$

Entonces la resistencia al esfuerzo litosférico es:

$$\sigma_D = \min(\sigma_e, \sigma_v)$$

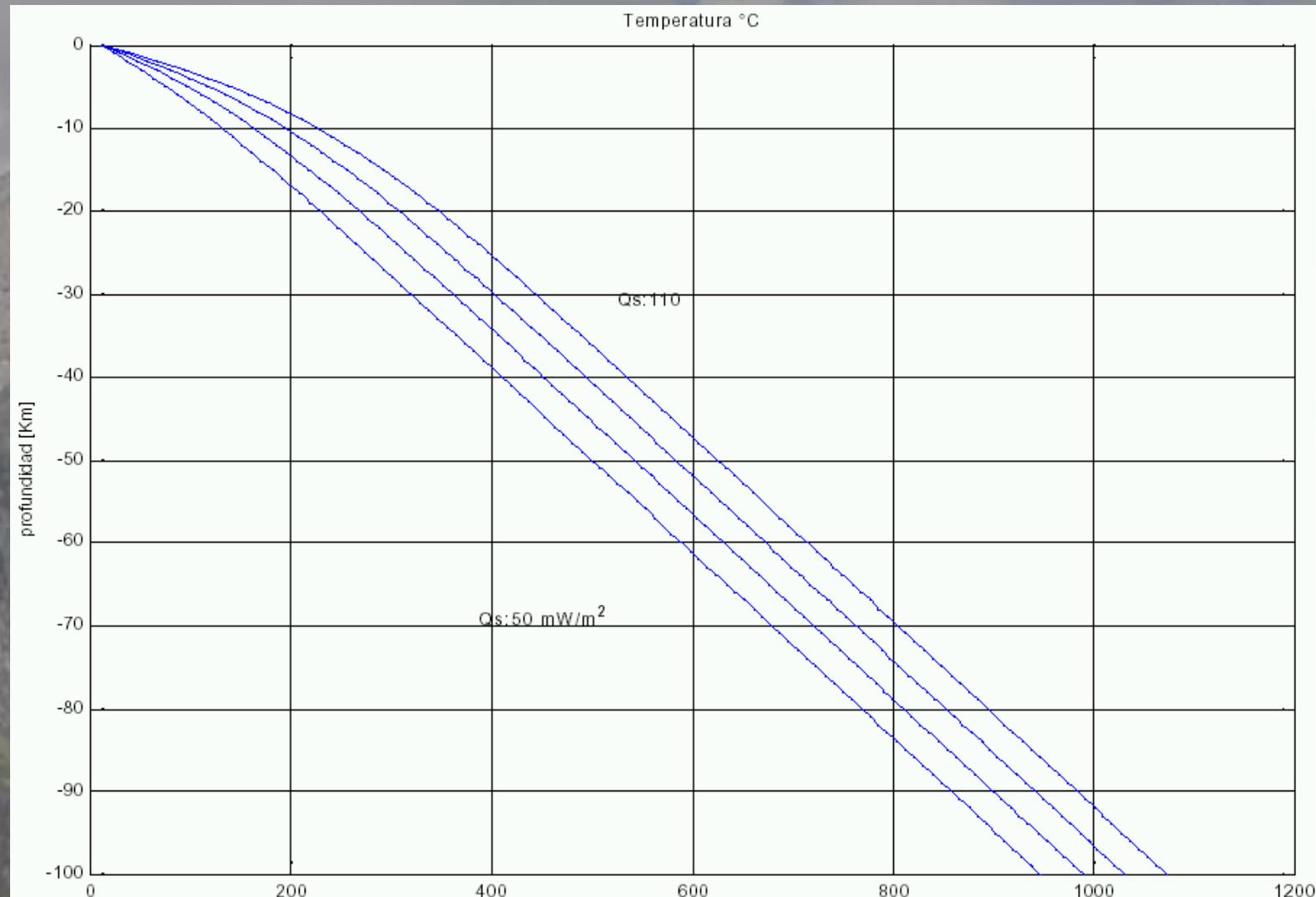
# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

En estas expresiones los parámetros presentan la siguiente dependencia:

- $\alpha$ : función del régimen tectónico ( $\approx 3.3$  para ambiente compresivo  $\approx 0.77$  para extensión)
- $\lambda$ : presión de fluidos (0.4 para presión hidrostática)
- $\dot{\epsilon}$ : tasa de deformación (depende del régimen tectónico, varía en ordenes de magnitud  $10^{-12}$ - $10^{-16}$  [ $s^{-1}$ ])
- $A_0, E$ : dependen del tipo de roca, importantes diferencias entre corteza media (granodiorítica) y manto (olivino)
- $n$ : también depende del tipo de roca, en general varía entre 2 y 4

# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

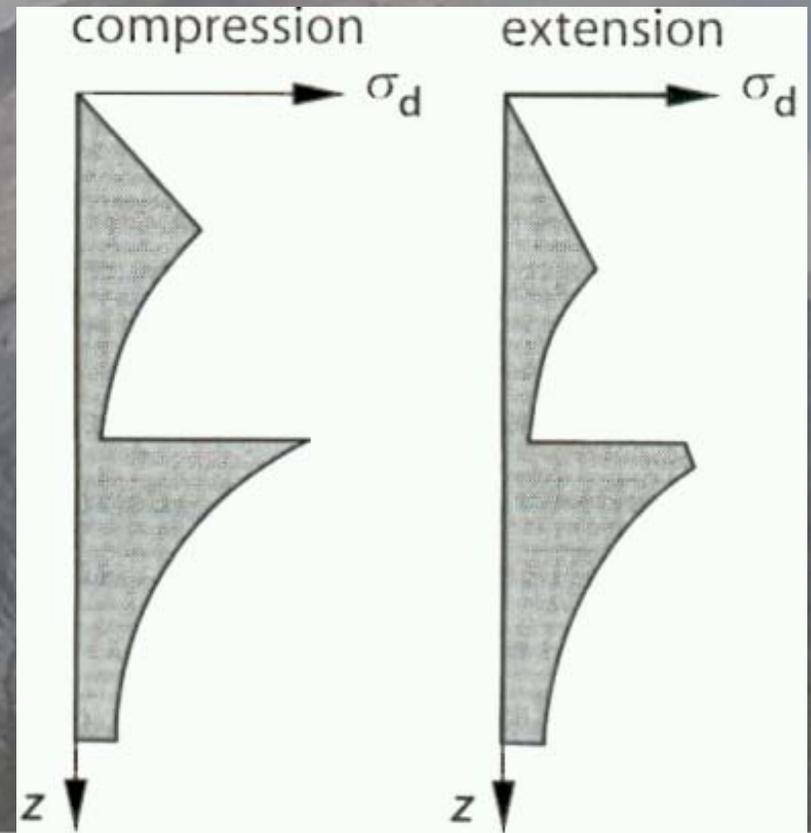
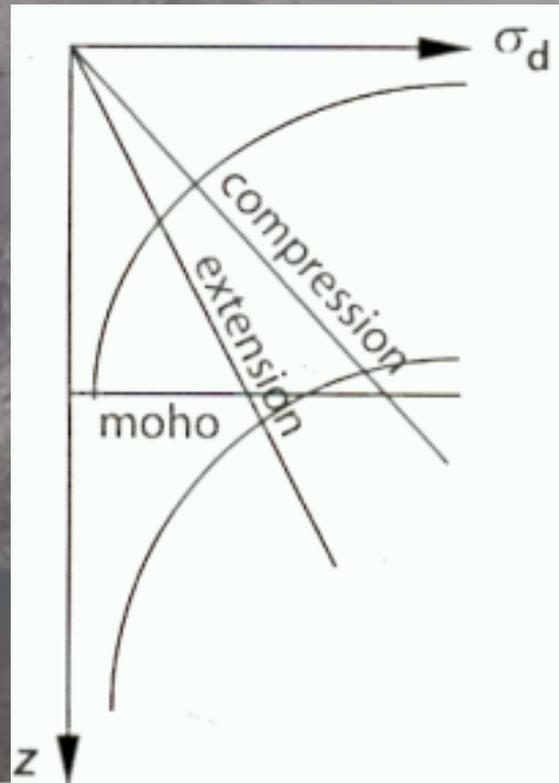
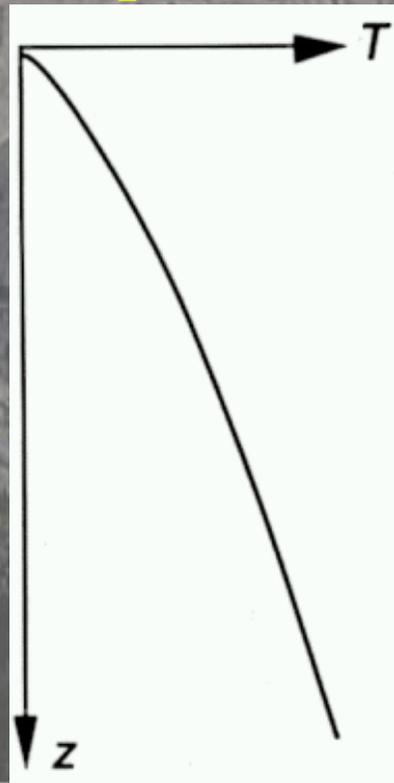
- T: temperatura, gradiente depende de ambiente geológico



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

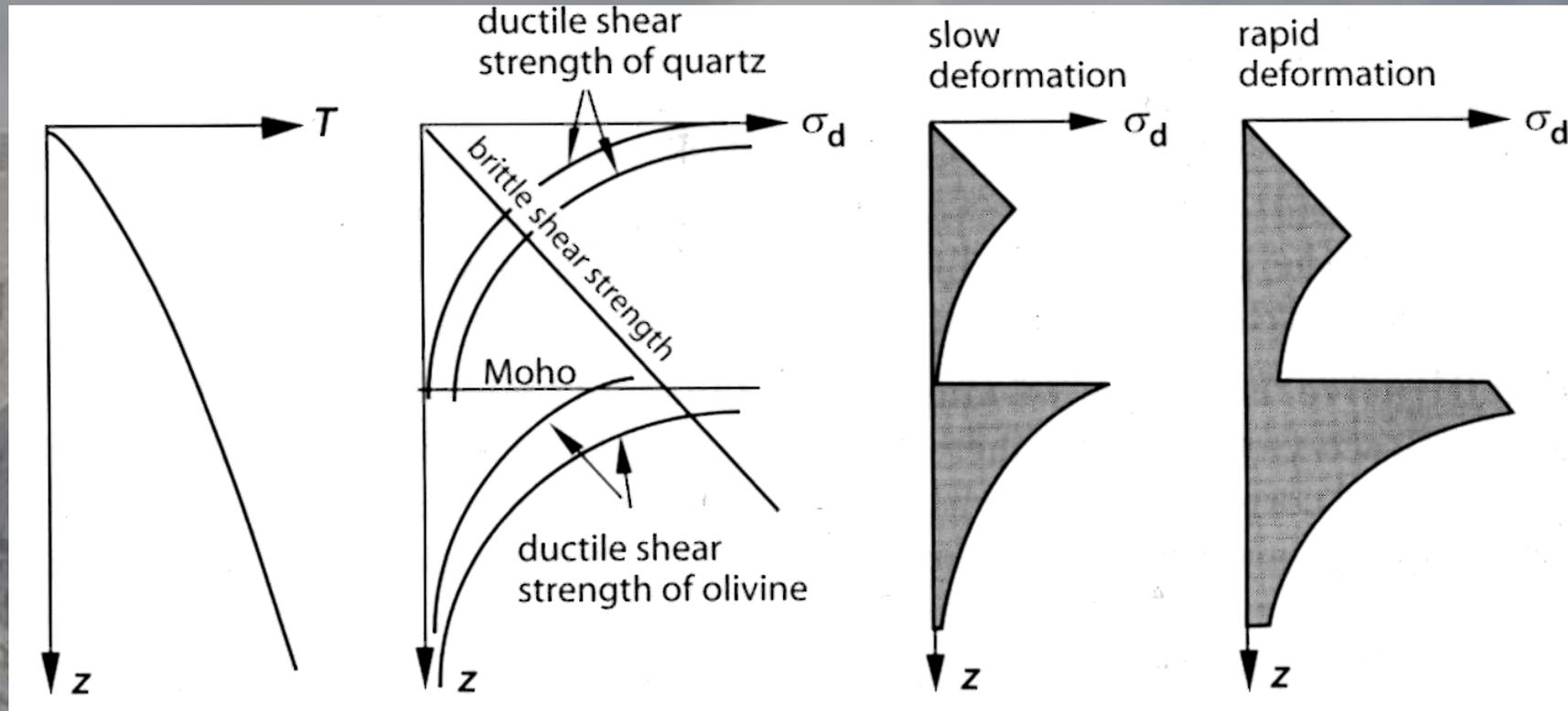
Tomando en consideración las variaciones de temperatura, composicionales y de ambientes tectonicos de compresión y extensión, la resistencia al esfuerzo presenta los siguientes comportamientos:

Las envolventes de resistencia a la deformación en cada caso se indican en los respectivos diagramas:



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

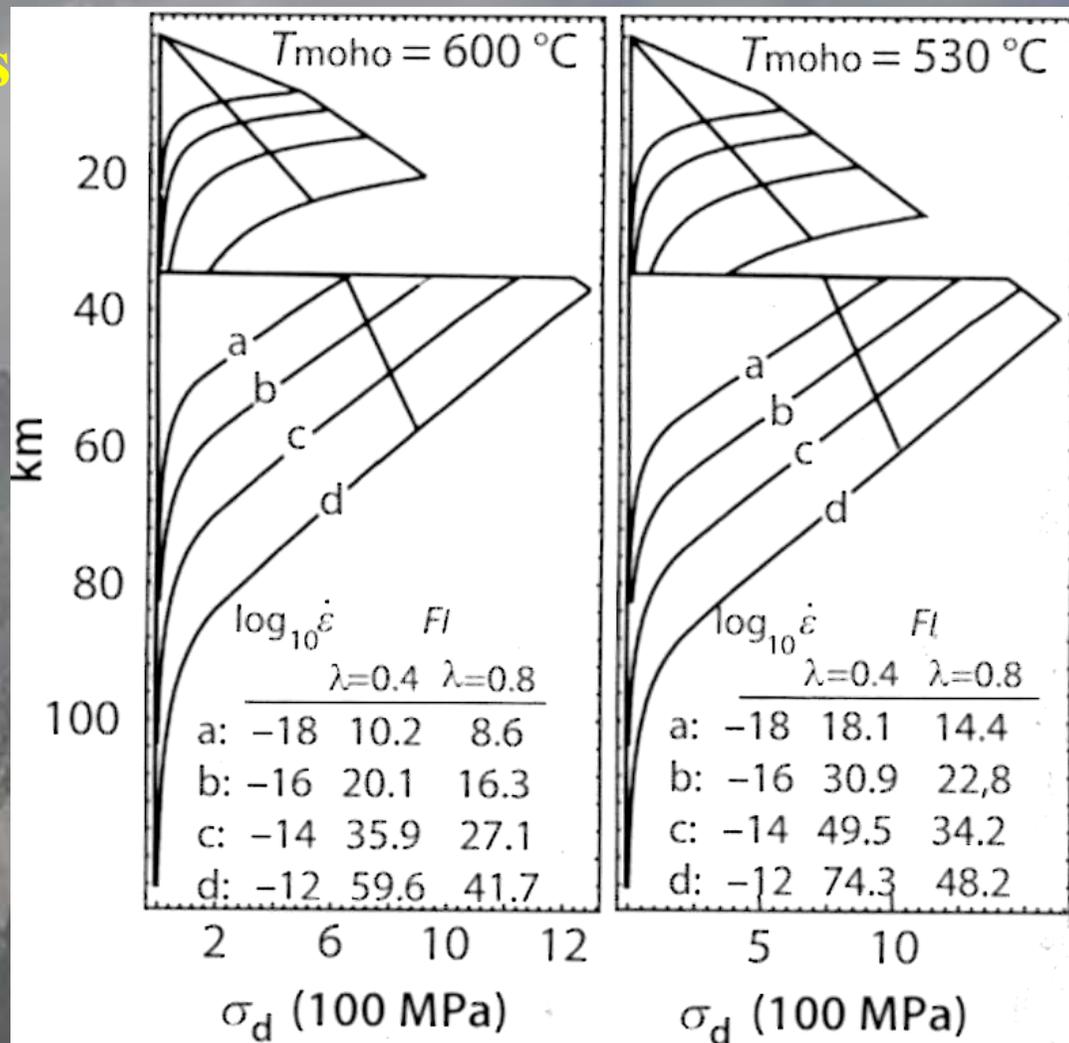
Ante variaciones de la tasa de deformación se obtienen los siguientes diagramas:



A menor tasa de deformación la resistencia al esfuerzo es menor. La mayor competencia del manto se ve fuertemente incrementada a mayor tasa de deformación.

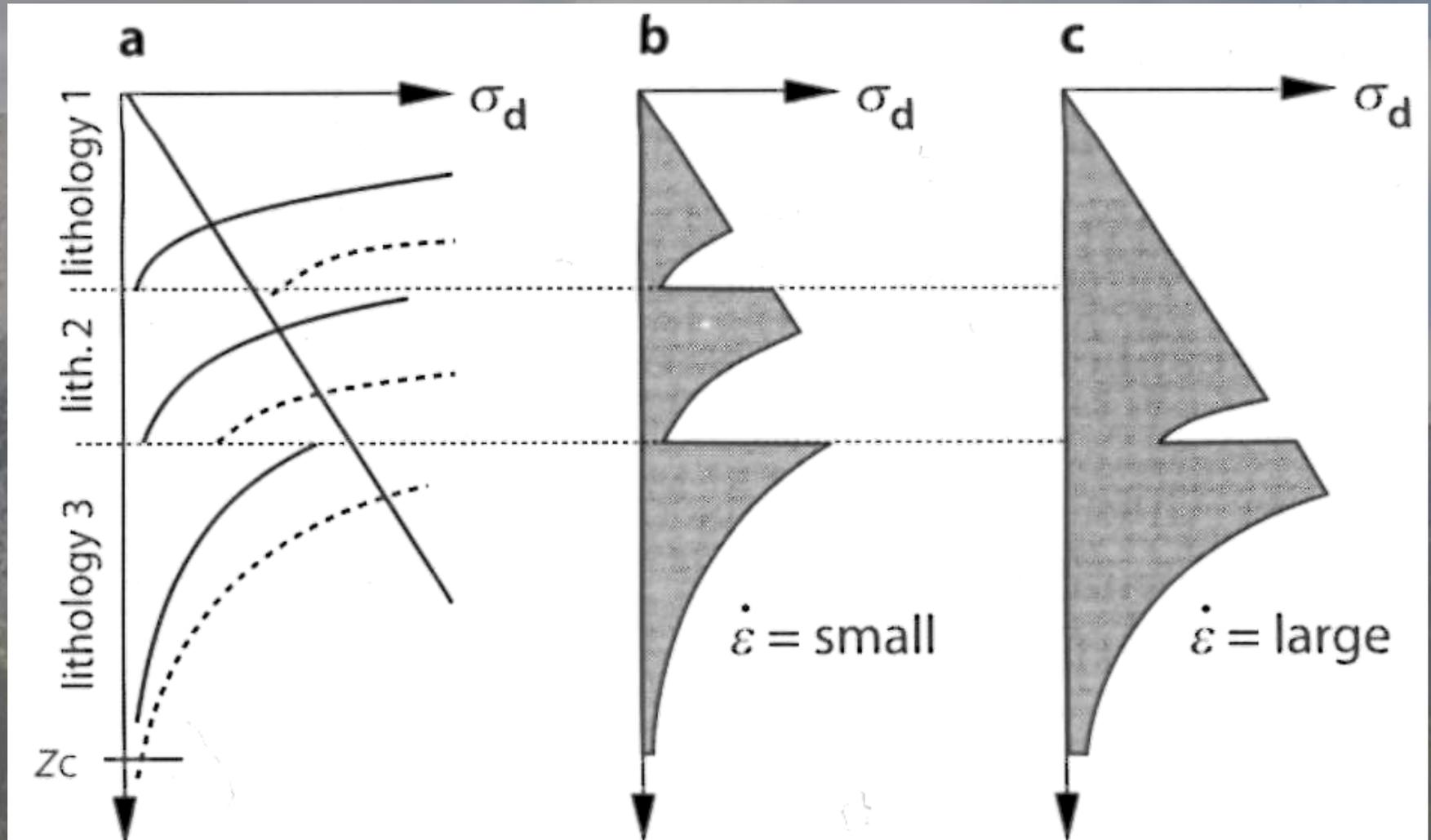
# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Mas variaciones de la tasa de deformación en combinacion con presiones de fluidos superiores al nivel hidrostático:



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

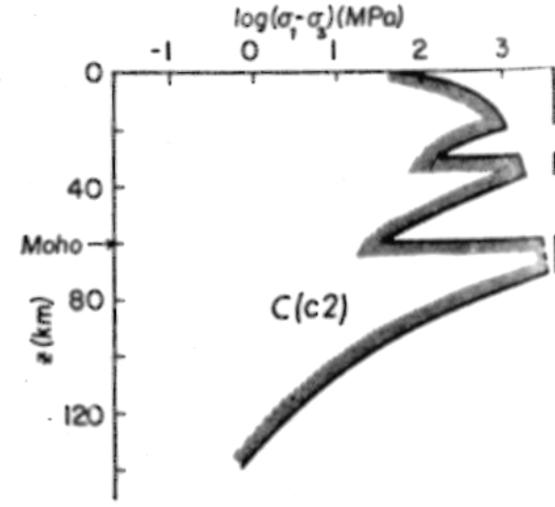
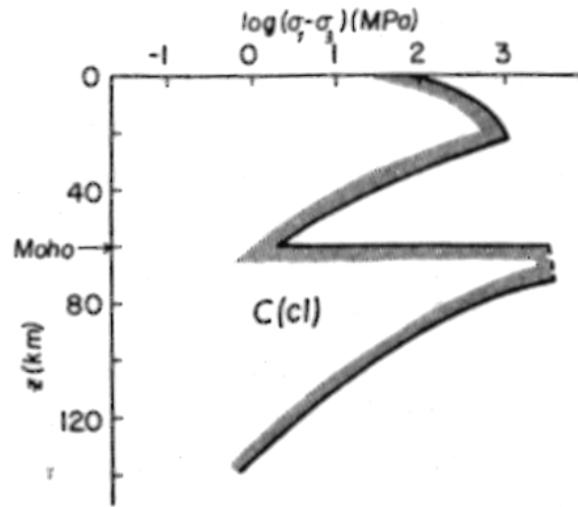
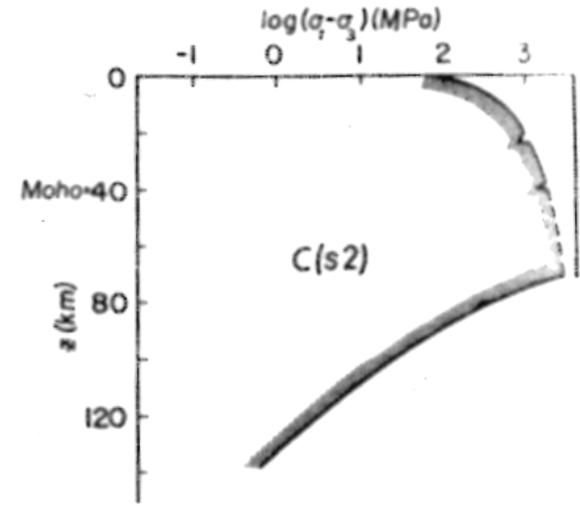
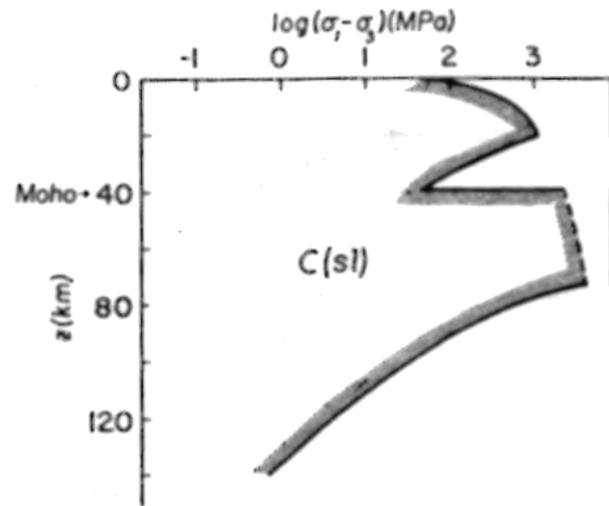
Diferencias composicionales en la corteza: potencial desacople de corteza inferior en bajas tasas de deformación



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Resistencia a la deformación en ambientes geológicos característicos

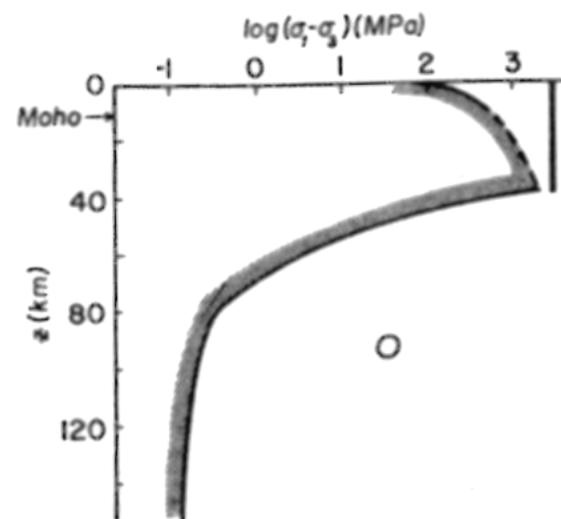
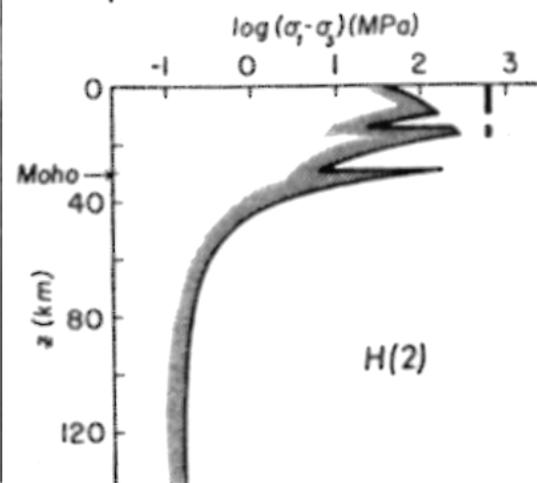
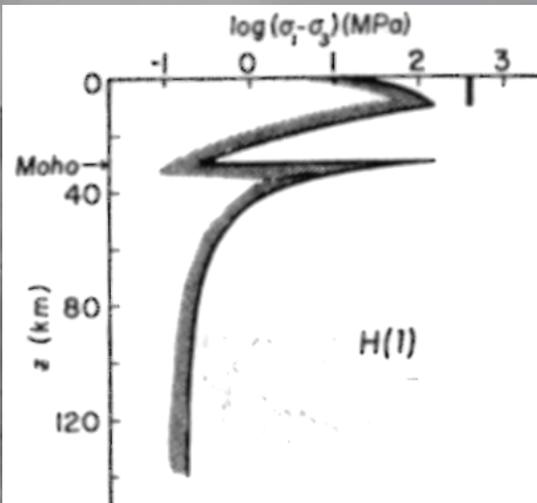
Model	Lithospheric thickness † (km)	Crustal thickness (km)	Composition ‡	Brittle regime §	Type tectonic province
C(s1)	150	40	unlayered	T	Precambrian shields
C(s2)	150	40	layered	T	Precambrian shields
C(c1)	150	60	unlayered	T	continental convergence zones
C(c2)	150	60	layered	T	continental convergence zones



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Resistencia a la deformación en ambientes geológicos característicos

Model	Lithospheric thickness †(km)	Crustal thickness (km)	Composition ‡	Brittle regime §	Type tectonic province
H(1)	50	30	unlayered	N/S	continental extensional zones
H(2)	50	30	layered	N/S	continental extensional zones
O	75	10	basic	T	mature oceanic lithosphere



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Integración de la envolvente de esfuerzo límite: En los diagramas anteriores hemos representado el esfuerzo límite para una determinada profundidad, si queremos saber la deformación de la litósfera en su totalidad, debemos integrar la envolvente de esfuerzo:

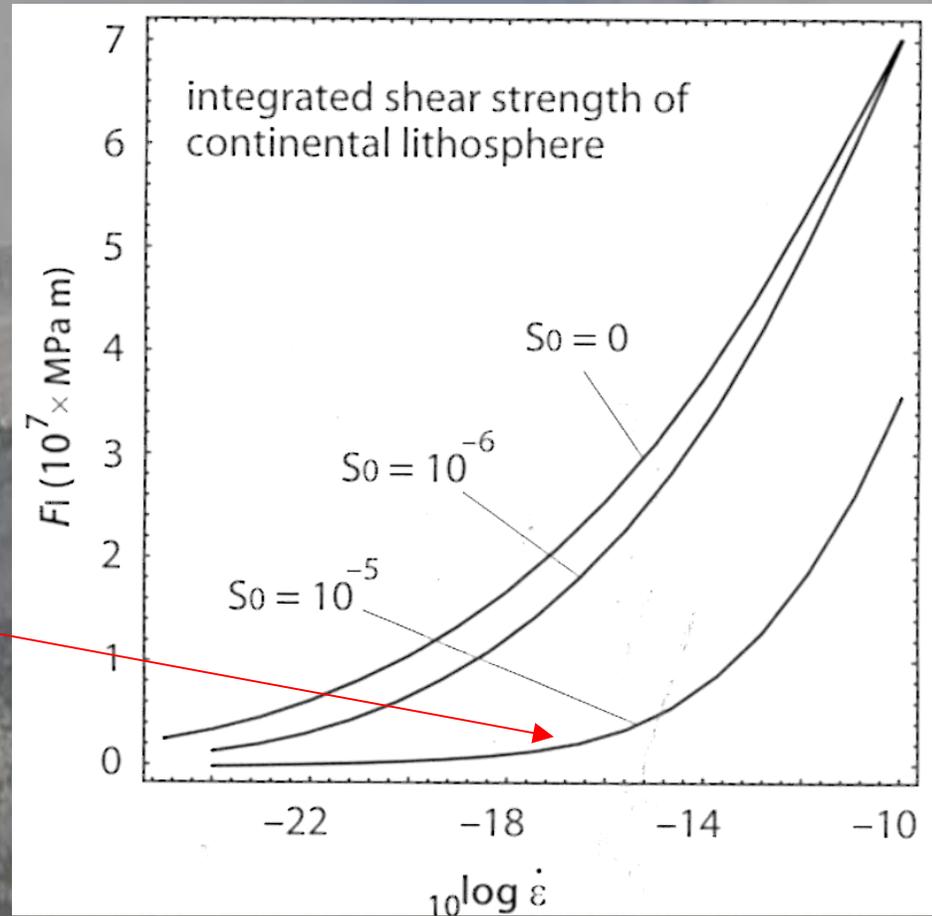
$$F = \int_0^L \sigma_D dz = \int_0^L \min(\sigma_e, \sigma_v) dz$$

Donde  $L$  es el espesor de la litosfera, esta integración tiene unidades de esfuerzo por distancia. Dado que el flujo viscoso decrece exponencialmente con la profundidad el límite exacto de la base de la litósfera no es tan relevante ya que el aporte al esfuerzo neto es menor.

# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

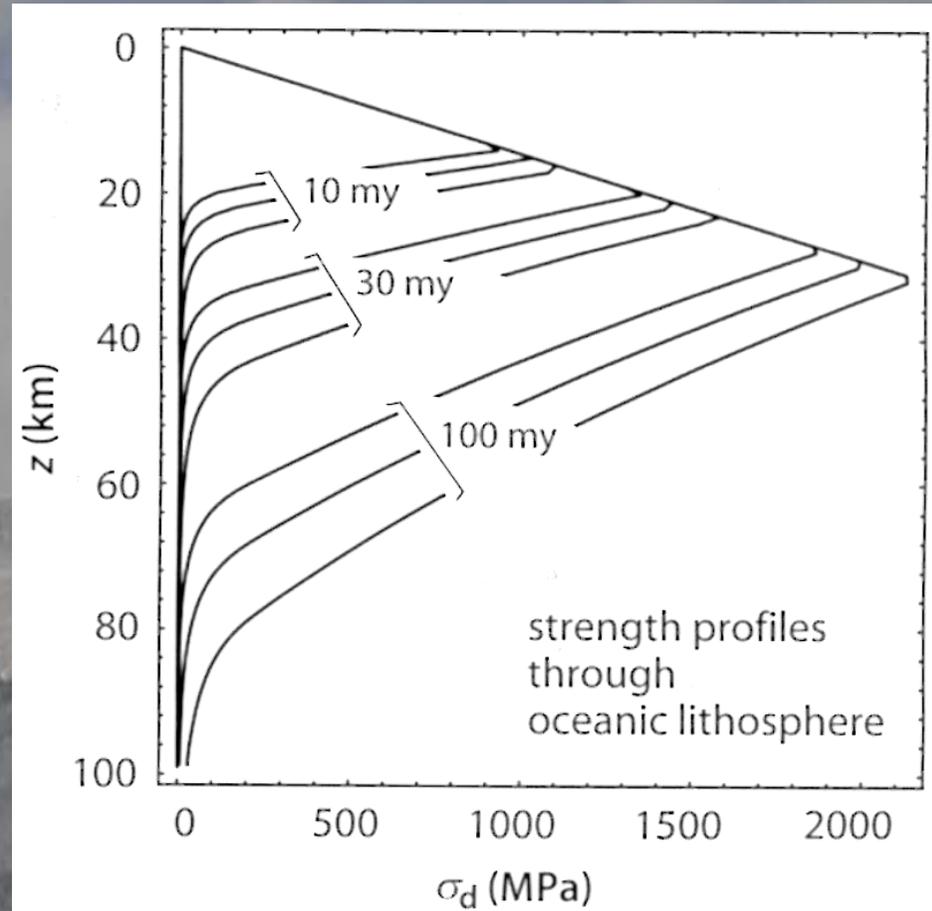
Integración de la envolvente de esfuerzo límite:

Temperatura en el moho. La temperatura del moho es muy relevante para la estimación de la competencia de la litosfera continental. En el diagrama siguiente vemos como ante un mayor flujo calorico (por ejemplo corteza gruesa del altiplano), la resistencia al esfuerzo decrece dramáticamente para distintas tasas de deformación:



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Integración de la envolvente de esfuerzo límite: Corteza oceánica. En este caso las geotermas son directamente proporcionales a la edad de la corteza oceánica. De acuerdo al diagrama siguiente es claro que la resistencia a la deformación de la litósfera oceánica es considerablemente mayor que la litósfera continental, y por consiguiente es menos susceptible a deformaciones internas.



# REOLOGIA DE LA LITOSFERA

Integración de la envolvente de esfuerzo límite: Corteza oceánica. En la integración vemos una fuerte dependencia con la edad de la corteza oceánica, y también con el aumento de la tasa de deformación. Estas fuerzas medidas en Nm son del orden de  $10^{13}$  a  $10^{14}$  Nm. Veremos mas adelante que las fuerzas tectónicas de “ridge push” son del orden de  $4 \cdot 10^{12}$  Nm, es decir pueden ser transmitidas sin que la placa sufra deformación interna.

