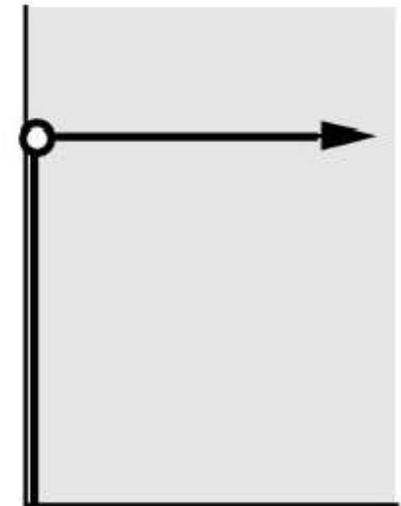
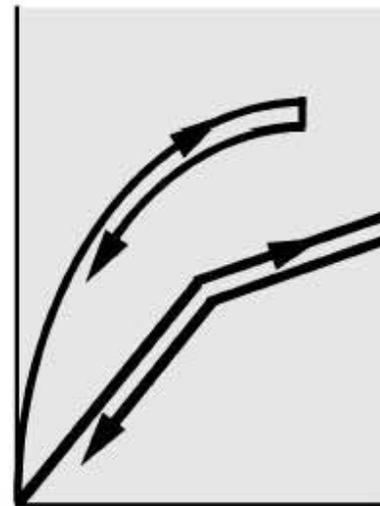
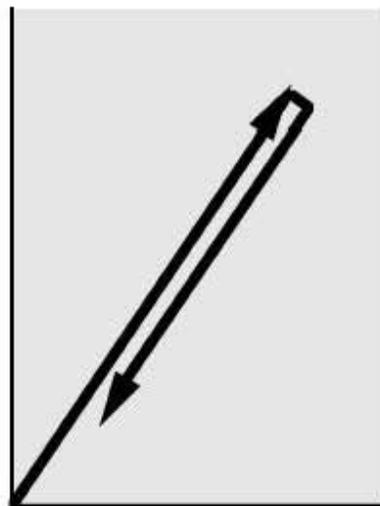
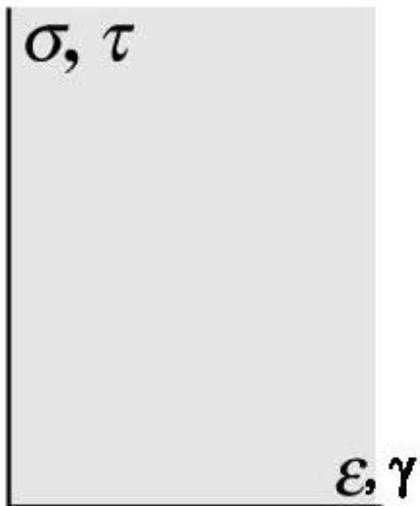


Comportamiento del Suelo

A. Lizcano

Geotechnical Research Group
Department of Civil & Environmental Engineering
Bogotá, Colombia
December 2007

Motivación



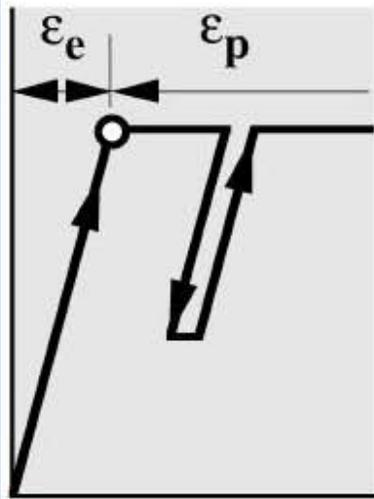
Elástico lineal

Elástico no lineal

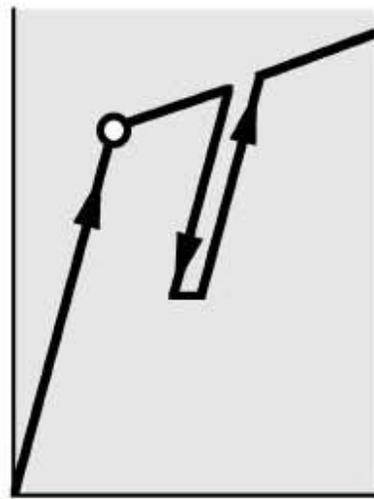
Rígido, perfectamente plástico



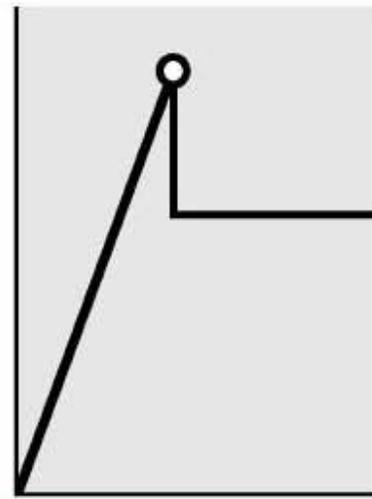
Motivación



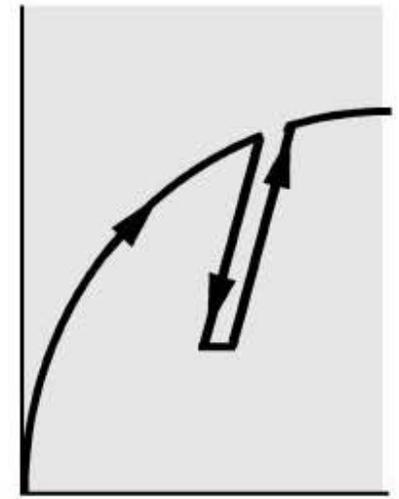
Elasto-plástico
sin endureci-
miento



Elasto-plástico
con endureci-
miento



Elasto-plástico
fragil



Hiperbólico
(Kondner-
Duncan) o
hipoplástico



Comportamiento mecánico

Comportamiento mecánico:

- Relación esfuerzo – deformación (Rigidez)
- Resistencia al corte (Estado límite)

Deformación (partículas sólidas, sin agua):

- Deformación de las partículas
- Deformación de los contactos entre partículas
- Deslizamiento entre partículas
- Giro de las partículas
- Fracturamiento y pulverización (trituration) de las partículas (crushing)



Comportamiento mecánico

Efecto del fluido en los poros del suelo (suelo saturado)

- Interacción química fluido – partícula (suelos granulares de tamaño pequeño, p.e limos, o suelos blandos, p.e. arcilla)
- Flujo estacionario: No hay cambio de volumen; si es ascendente \Rightarrow sifonamiento o levantamiento: Esfuerzos efectivos nulos
- Flujo no estacionario: cambio de volumen (suelos granulares de tamaño pequeño, p.e limos, o suelos blandos, p.e. arcillas) y cambio en los esfuerzos efectivos



Comportamiento mecánico

Conclusión

La deformación de un material granular, y por lo tanto su relación esfuerzo deformación (es decir el comportamiento mecánico del material) depende de las propiedades granulométricas del material, es no lineal y es irreversible.

Los esfuerzos efectivos controlan el comportamiento mecánico del suelo



Comportamiento mecánico

- Tipo de suelo (Granular o blando)
- Condiciones del análisis (isotrópica, oedométrica, triaxial, etc.)
- Tipo de carga (monotónica, cíclica, dinámica)
- Condición de carga (drenada, no drenada)



Definiciones - Variables de estado

S : Sólido

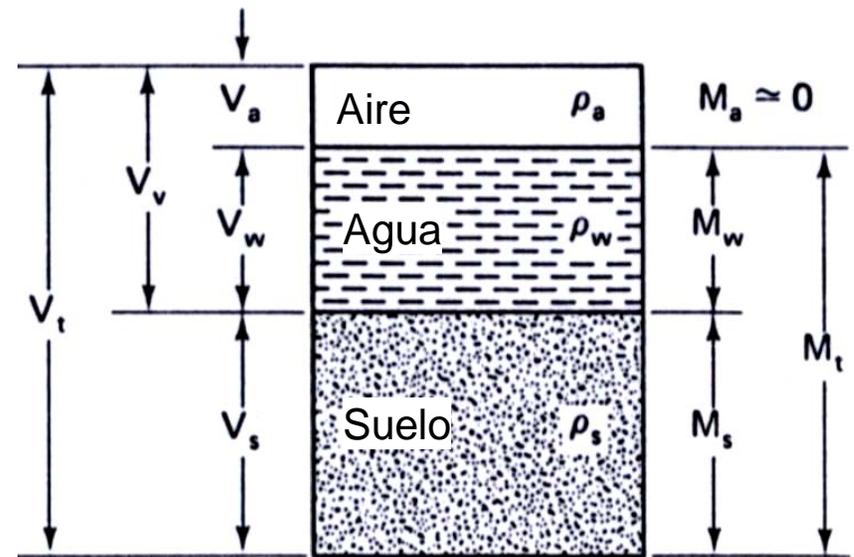
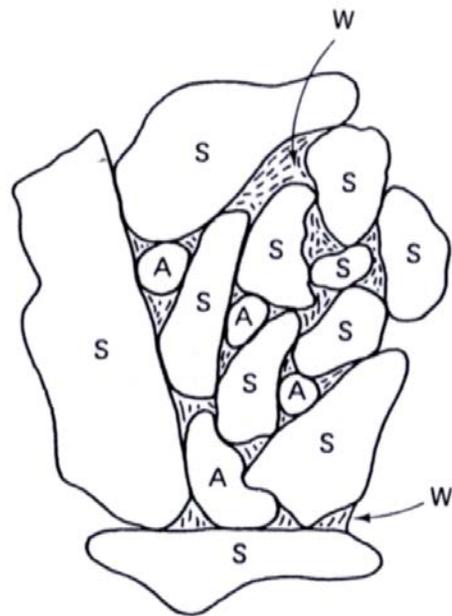
W: Líquido

A: Aire

Partícula de suelo

Agua (electrolitos)

Aire



$$e = \frac{V_v}{V_s}$$



Definiciones - Variables de estado

Esfuerzo (suelo seco):

- Esfuerzo promedio producido por los contactos entre las partículas: $\sigma = \sigma'$

Esfuerzo (suelo saturado):

- Esfuerzo total: σ
- Presión del agua de los poros (presión hidrostática, presión inicial) / Exceso de presión de poros (presión del agua de los poros producida por la carga):
 $u / \Delta u$
- Esfuerzo efectivo: Contacto efectivo entre partículas: $\sigma' = \sigma - u$ (principio de los esfuerzos efectivos)



Definiciones - Variables de estado

$$\left. \begin{aligned} p' &= \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \\ q' &= q = \sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_1 - \sigma_3 \end{aligned} \right\} \text{Cambridge invariantes}$$

$$\left. \begin{aligned} s' &= \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \\ t' &= t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \end{aligned} \right\} \text{MIT invariantes}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$e \approx e_0 - \varepsilon(1 + e_0)$$

$$v = 1 + e$$

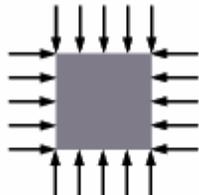
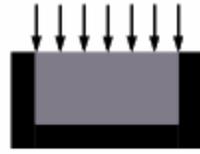
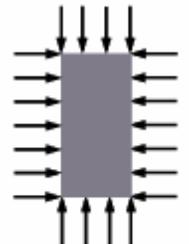
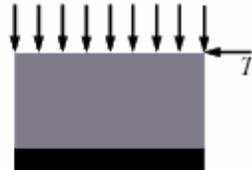
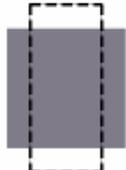
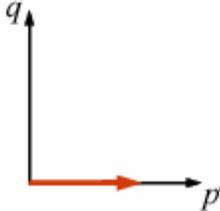
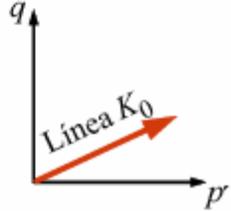
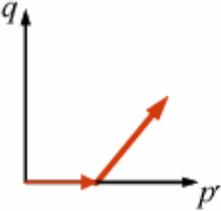
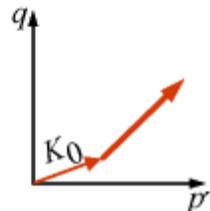


Tipos de suelos

- Suelos granulares (arenas, gravas)
- Suelos blandos (arcillas, limos)

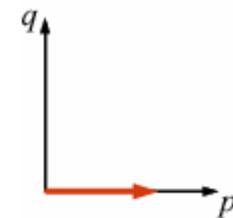
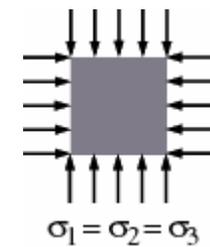
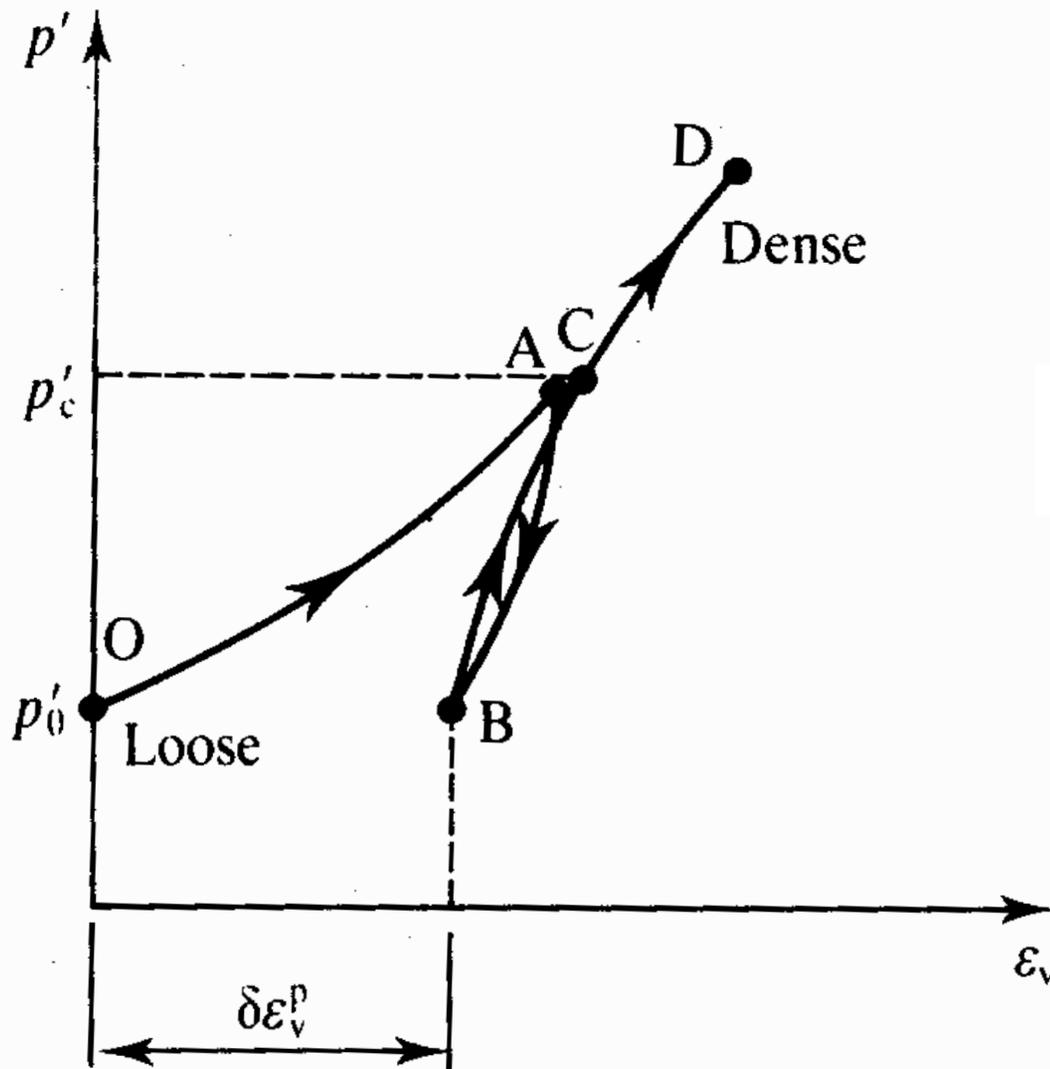


Condiciones de análisis

Ensayo	Compresión isotrópica	Compresión oedométrica	Compresión triaxial	Corte simple
Condiciones de borde 	 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	 $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$	 $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const.}$	 $\sigma_1 = \text{const.} \Rightarrow \text{Vol. variable}$ $\sigma_1 = \text{variable} \Rightarrow \text{Vol. const.}$
Tipo de deformación	Volumétrica 	Volumétrica + Distorsión 	Distorsión + Volumétrica 	Distorsión + Volumétrica 
Trayectoria de esfuerzos				



Compresión isotrópica monotónica drenada (o material seco)



Compresión isotrópica – Resultados experimentales

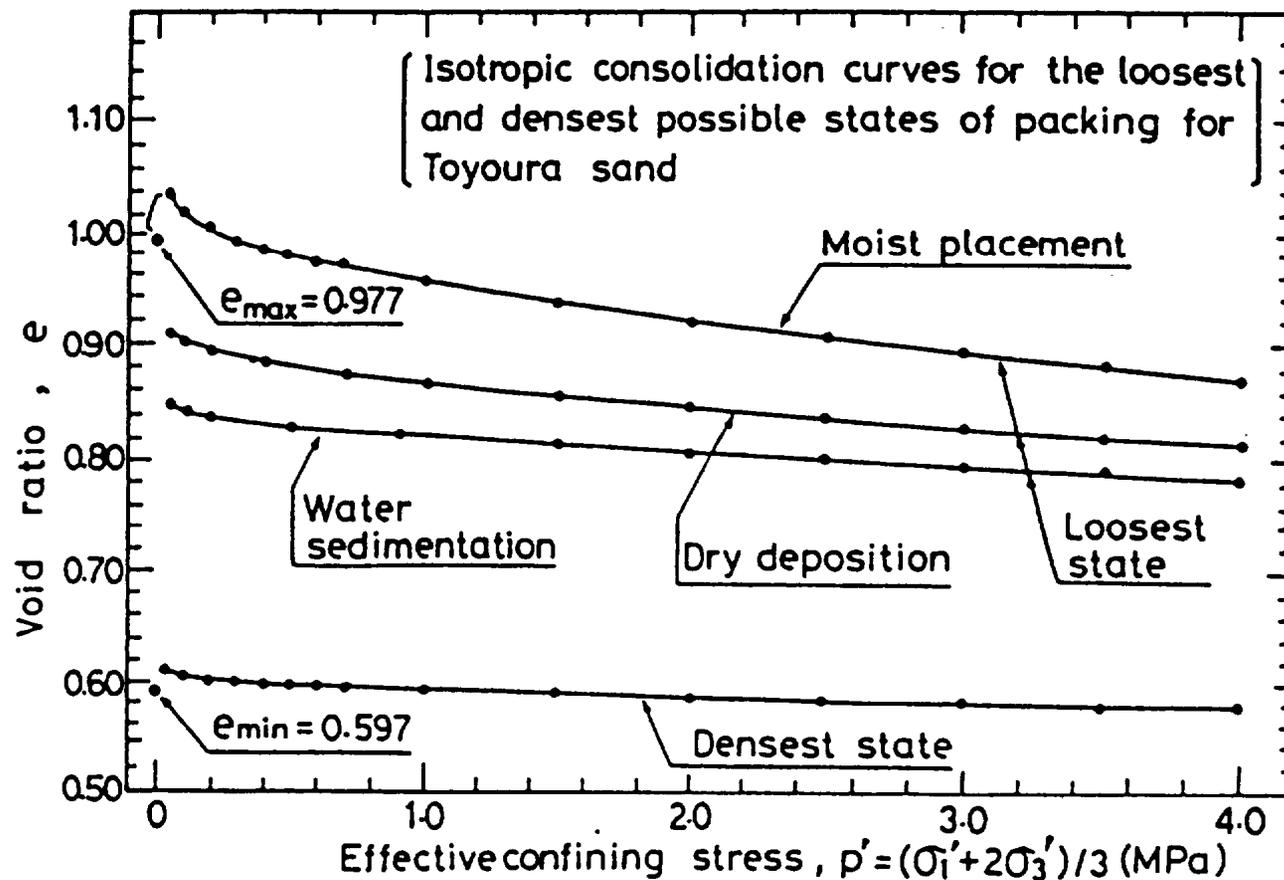
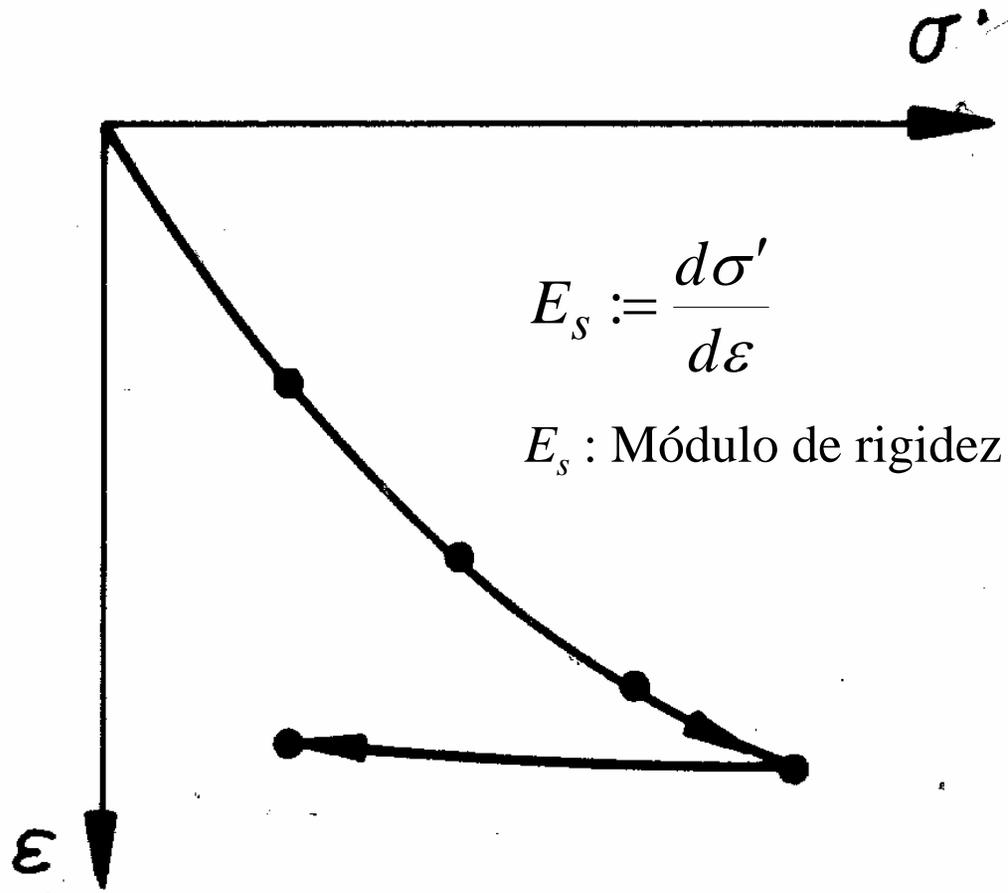


Fig. 13. Isotropic consolidation curves for Toyoura sand samples prepared using three different methods (Ishihara, 1993)

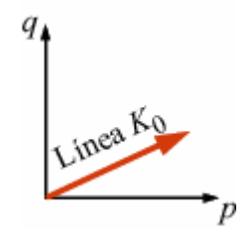
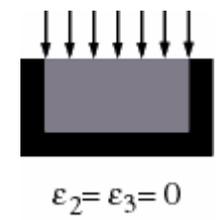


Compresión oedométrica monotónica

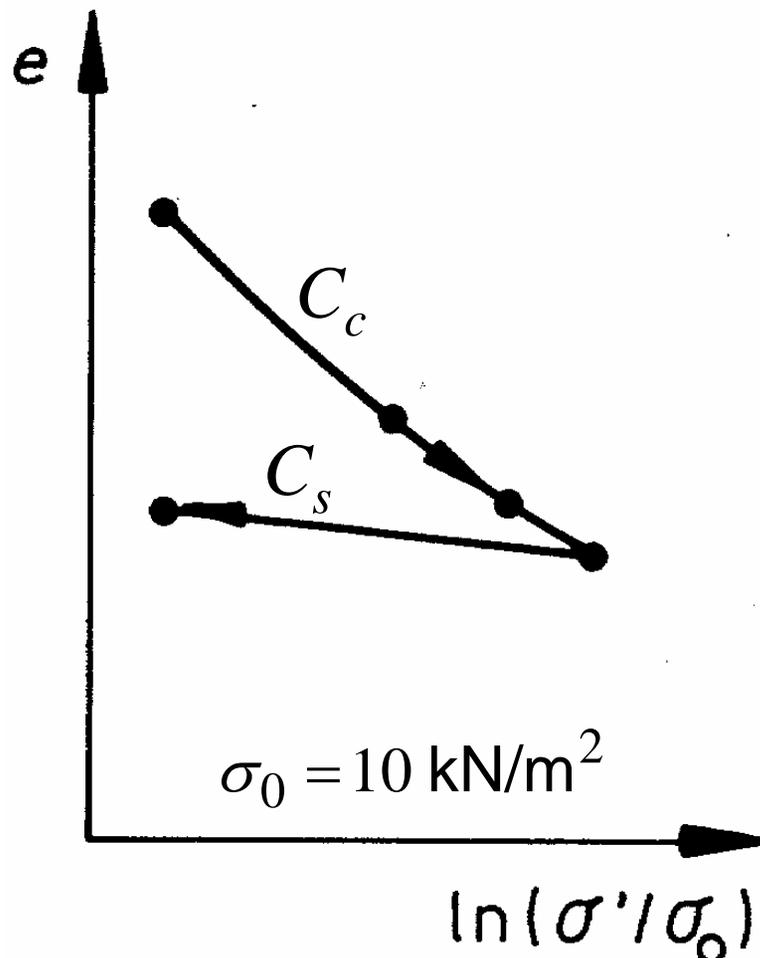


$$E_s := \frac{d\sigma'}{d\epsilon}$$

E_s : Módulo de rigidez



Compresión oedométrica monotónica

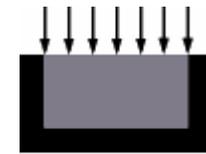


$$C_c := \frac{de}{d \left[\ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0} \right) \right]}$$

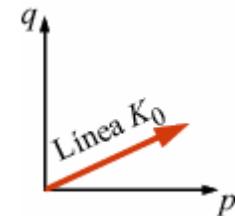
$$e \approx e_0 - \varepsilon(1 + e_0)$$

$$E_s = \frac{\sigma'(1+e)}{C_c}$$

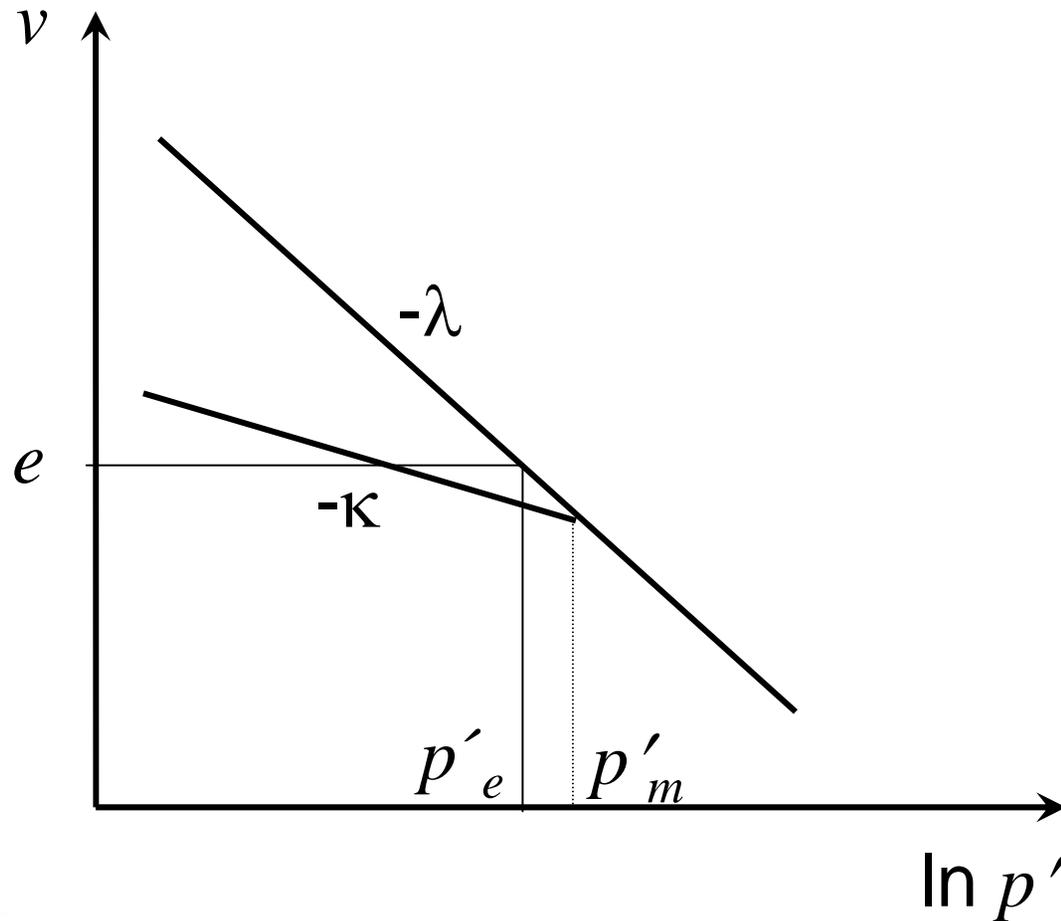
$$E_s = \frac{\sigma'(1+e)}{C_s}$$



$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$



Idealización comportamiento en compresión isotrópica y oedométrica - Definiciones



$$-\lambda = \frac{dv}{d(\ln p')} = \frac{p' dv}{dp'}$$

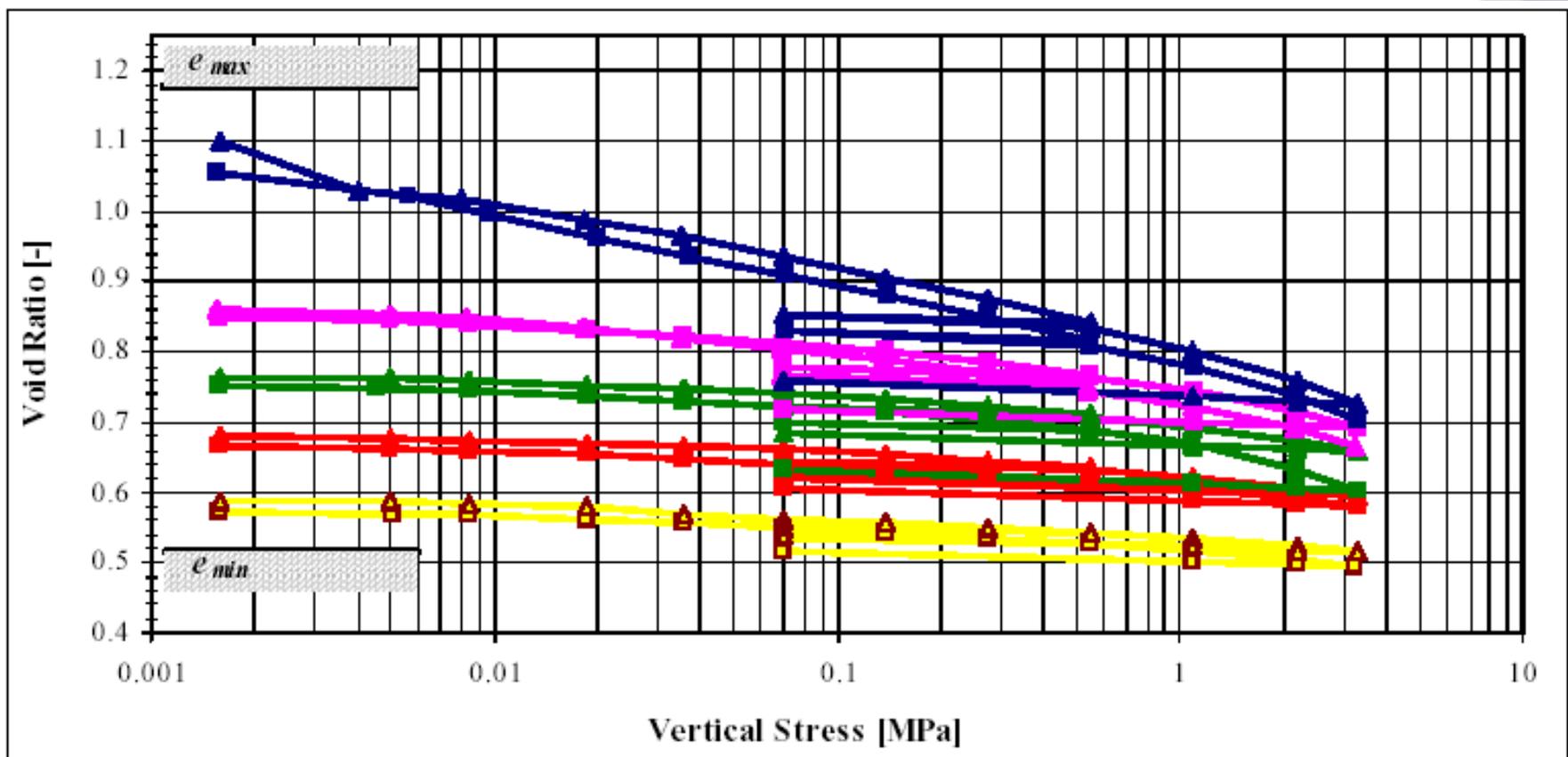
$$-\kappa = \frac{dv}{d(\ln p')} = \frac{p' dv}{dp'}$$

$$OCR = \frac{p'_m}{p'} \text{ (TERZAGHI)}$$

$$OCR = \frac{p'_e}{p'} \text{ (HVORSLEV)}$$

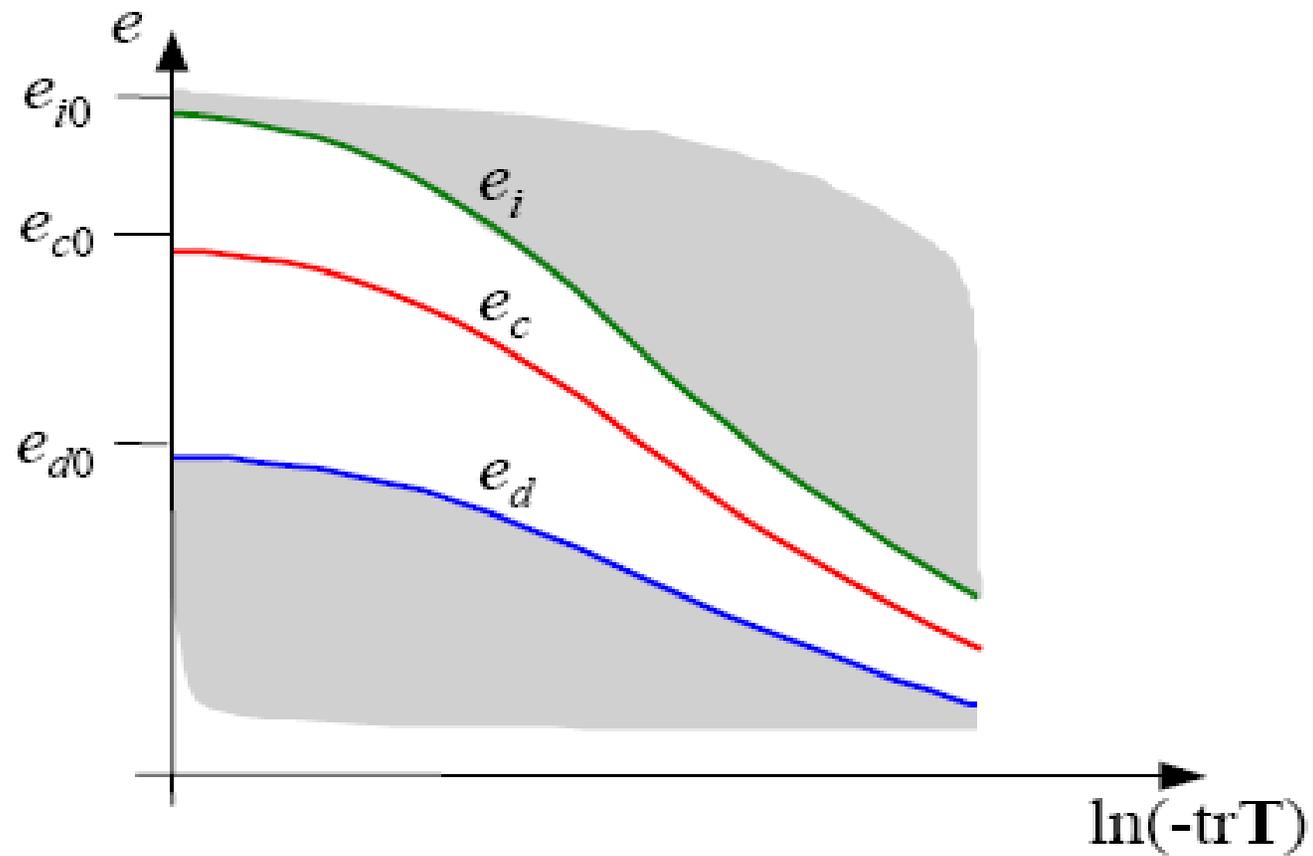


Compresión oedométrica – Resultados experimentales

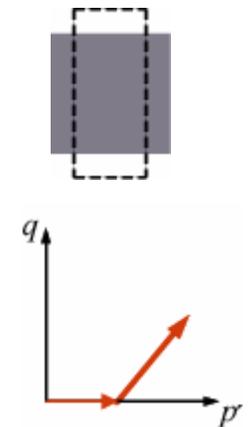
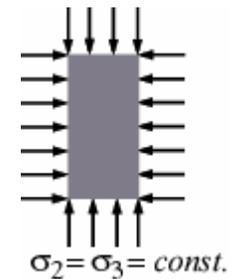
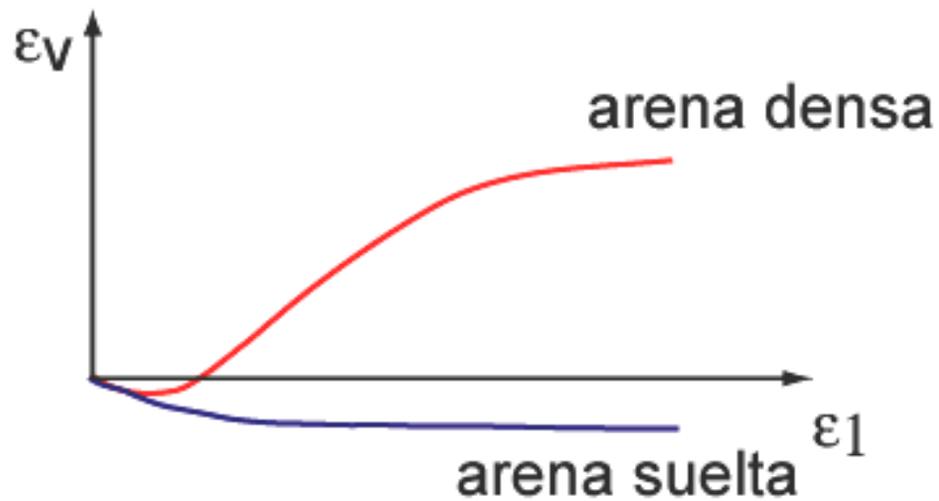
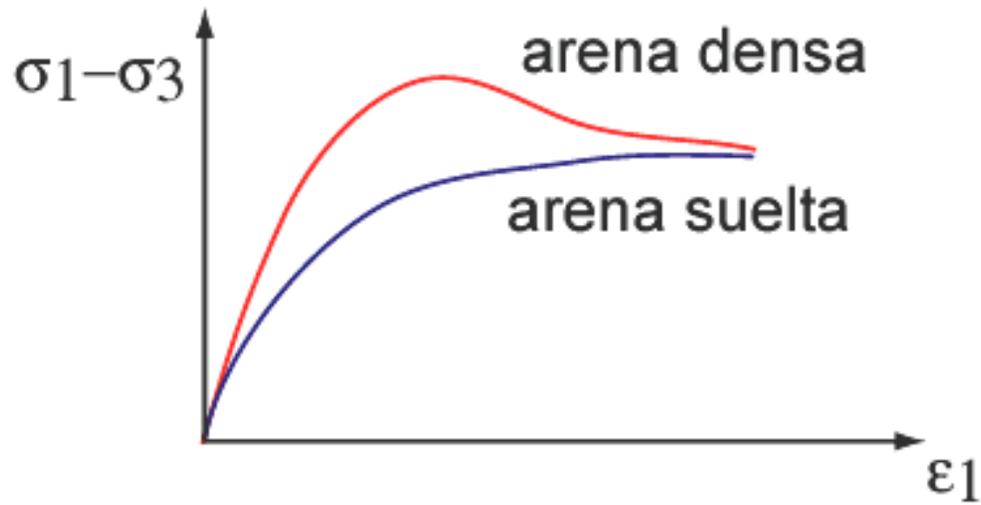


Ensayo oedométrico con arena de Bruselas

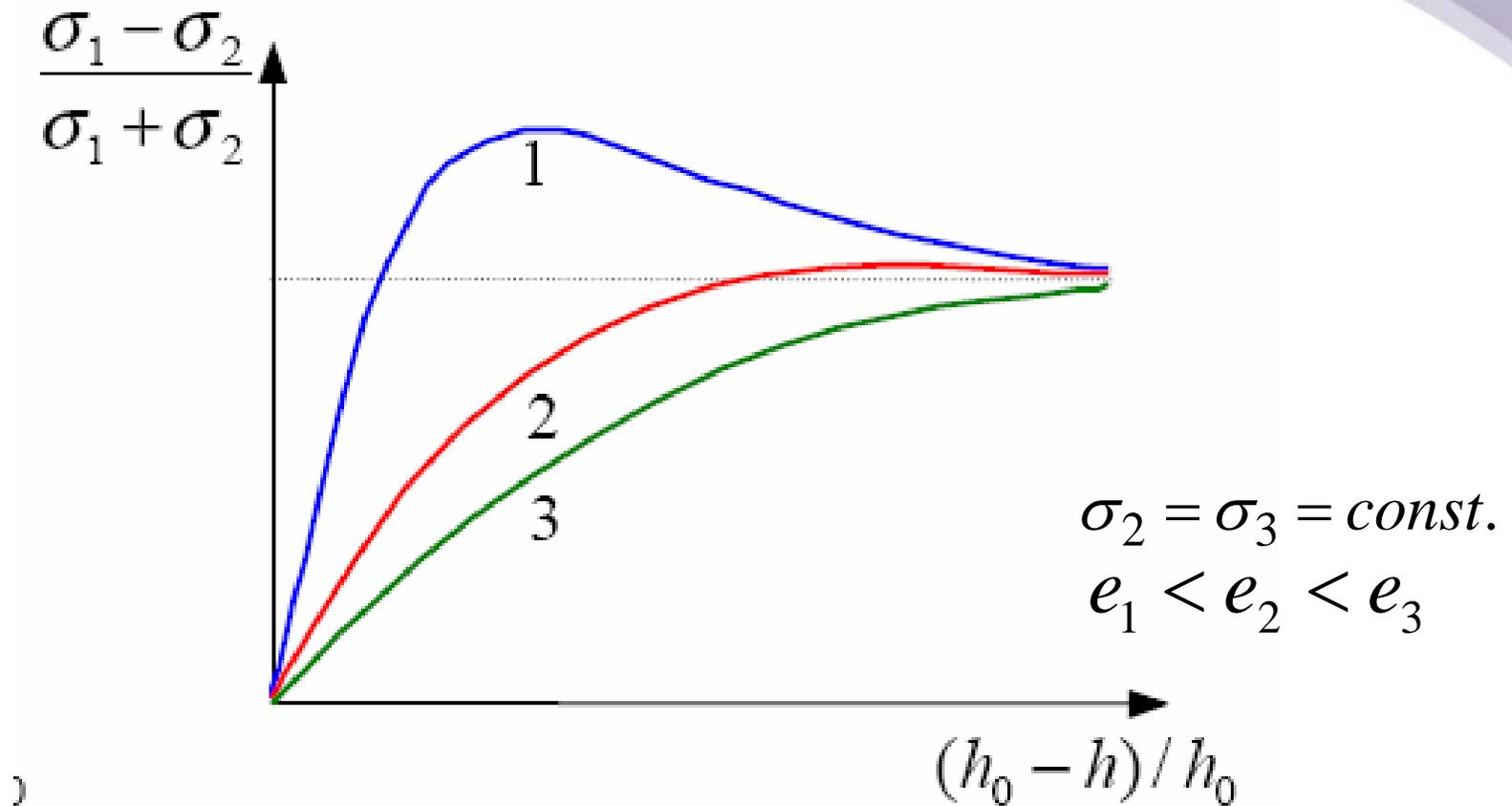
Compresión oedométrica



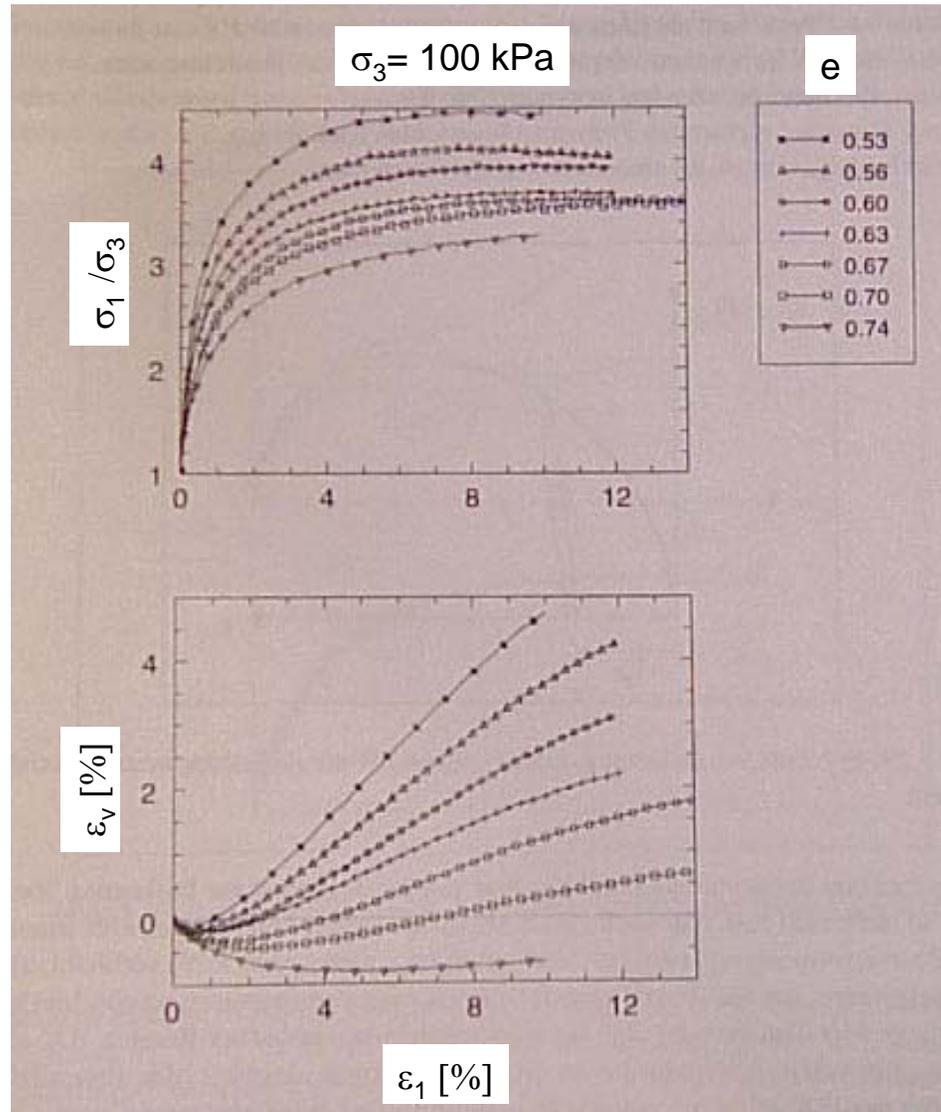
Compresión triaxial monotónica drenada



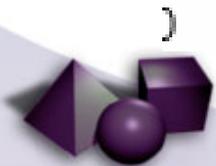
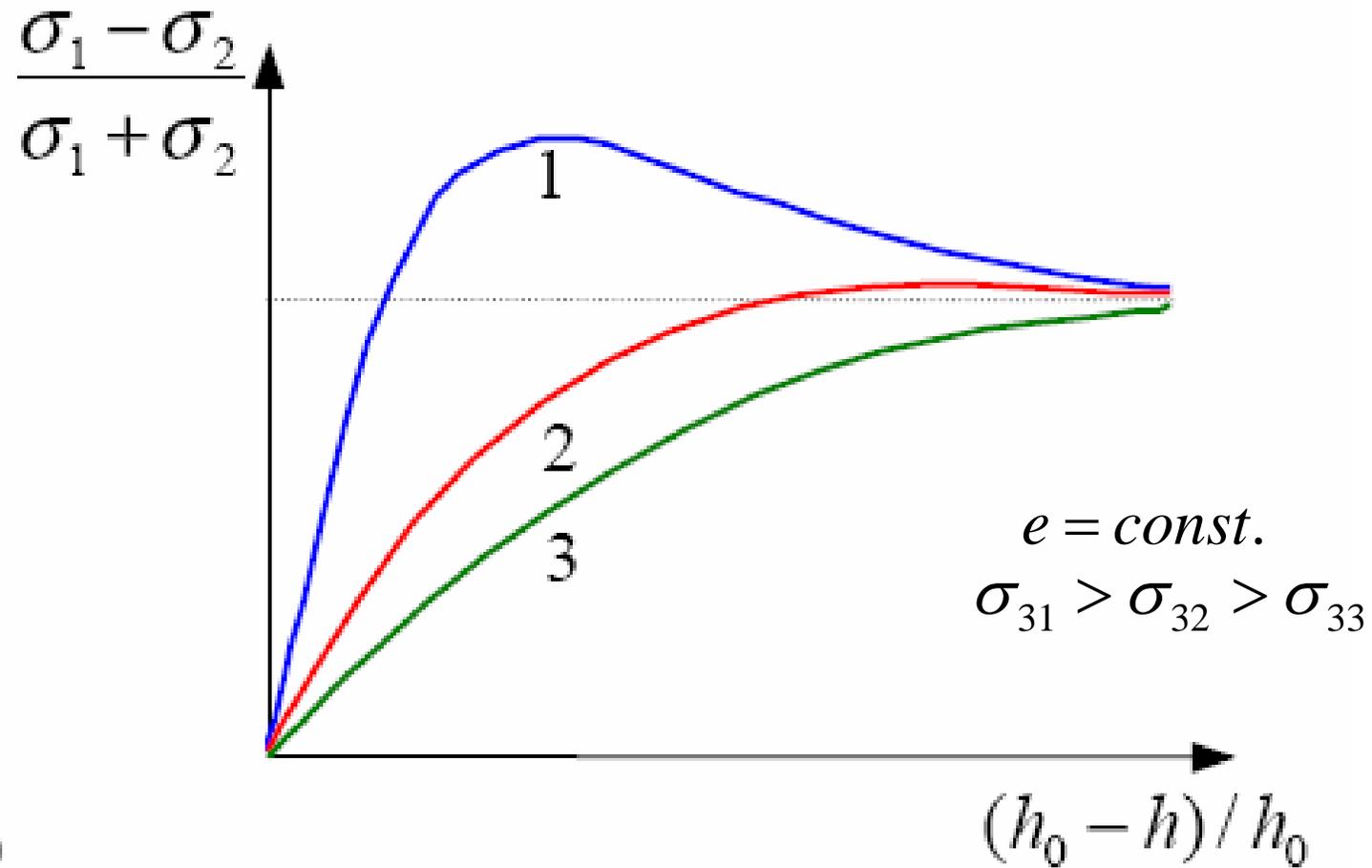
Compresión triaxial monotónica drenada



Compresión triaxial monotónica drenada – Resultados experimentales



Compresión triaxial monotónica drenada



Compresión triaxial monotónica drenada – Resultados experimentales

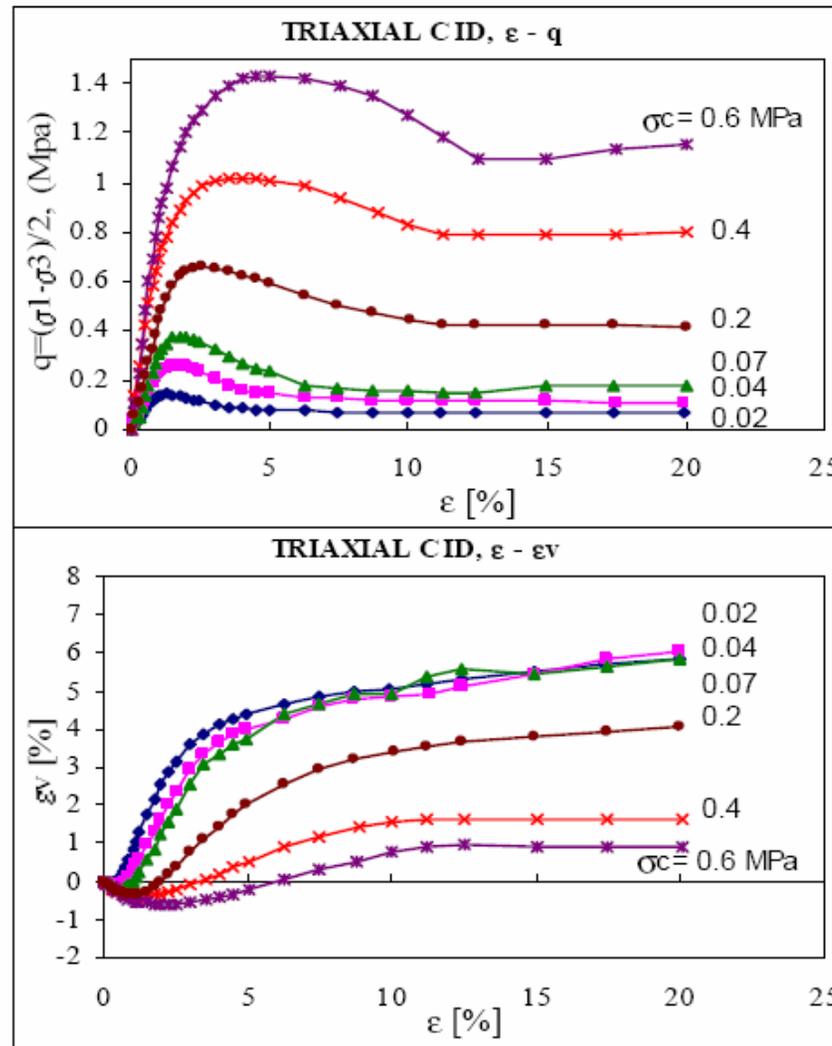


Fig.10 Curvas tensión-deformación y cambio volumétrico "Río Maipo", muestra 1.



Compresión triaxial monotónica drenada – Resultados experimentales

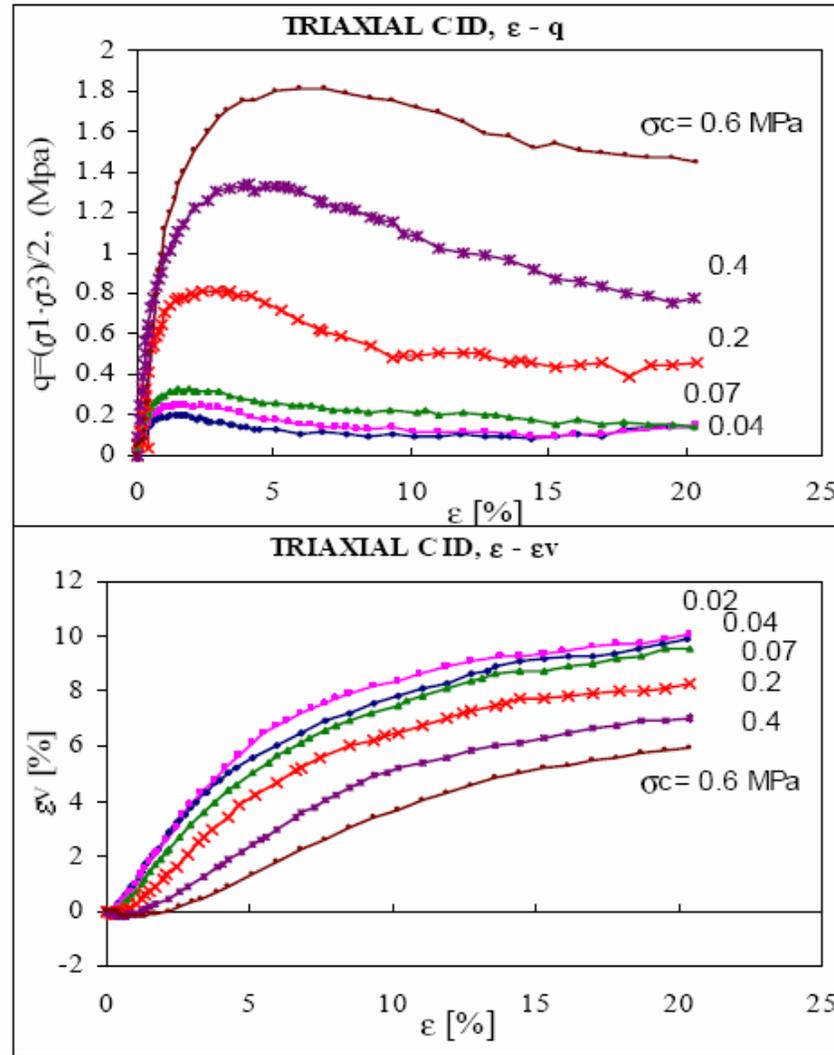
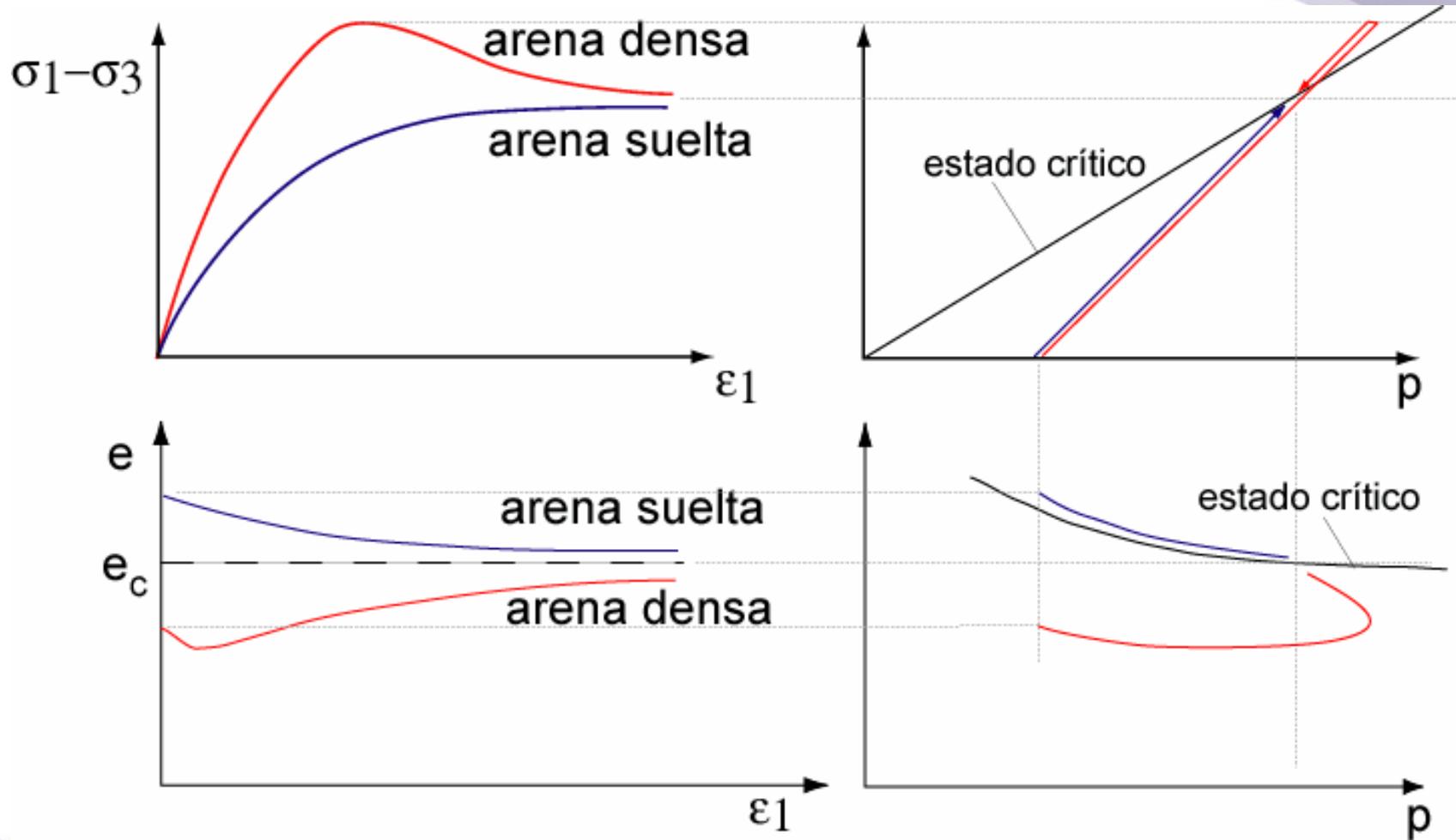


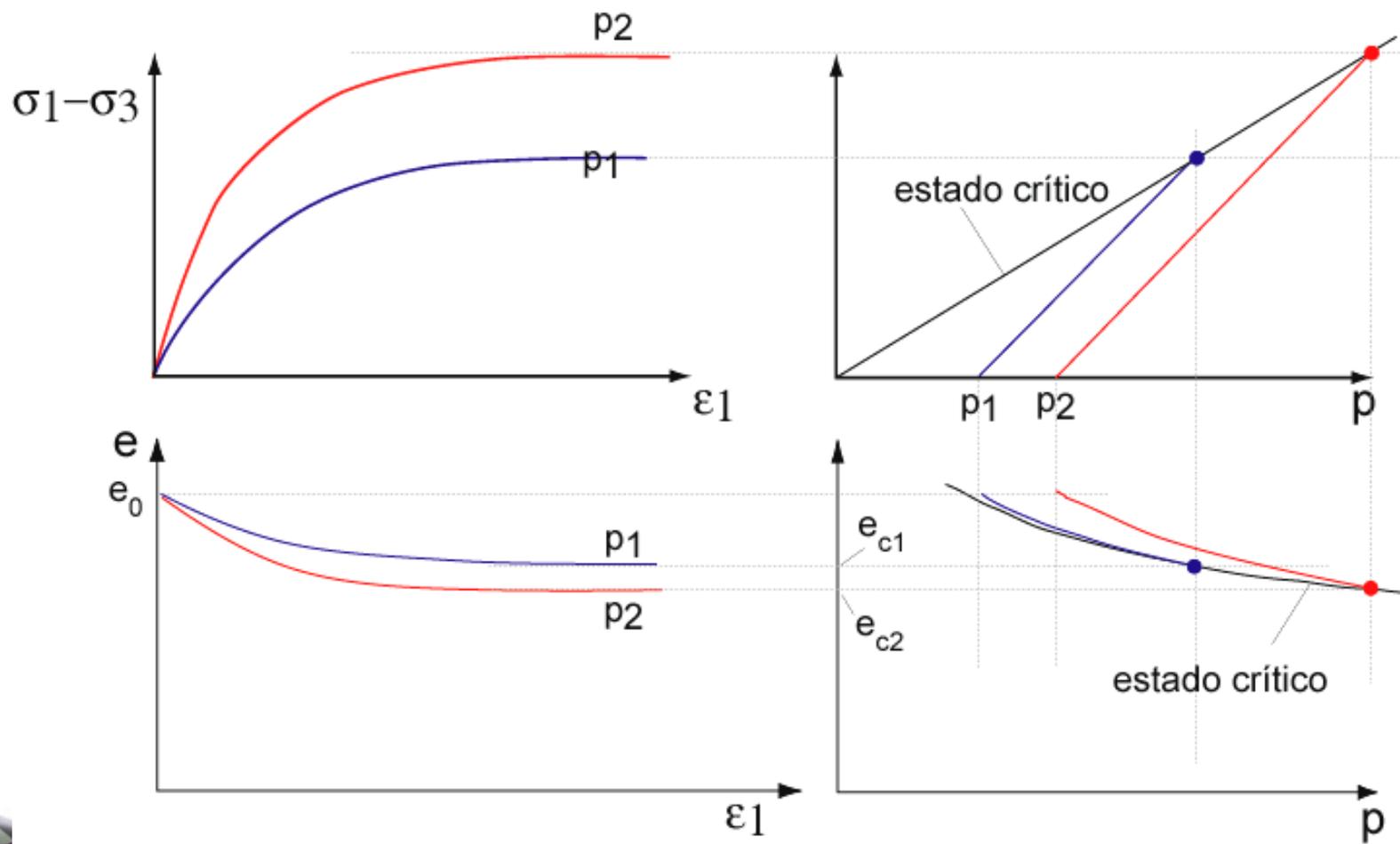
Fig. 11 Curvas tensión-deformación y cambio volumétrico "Río Aconcagua", muestra 3.



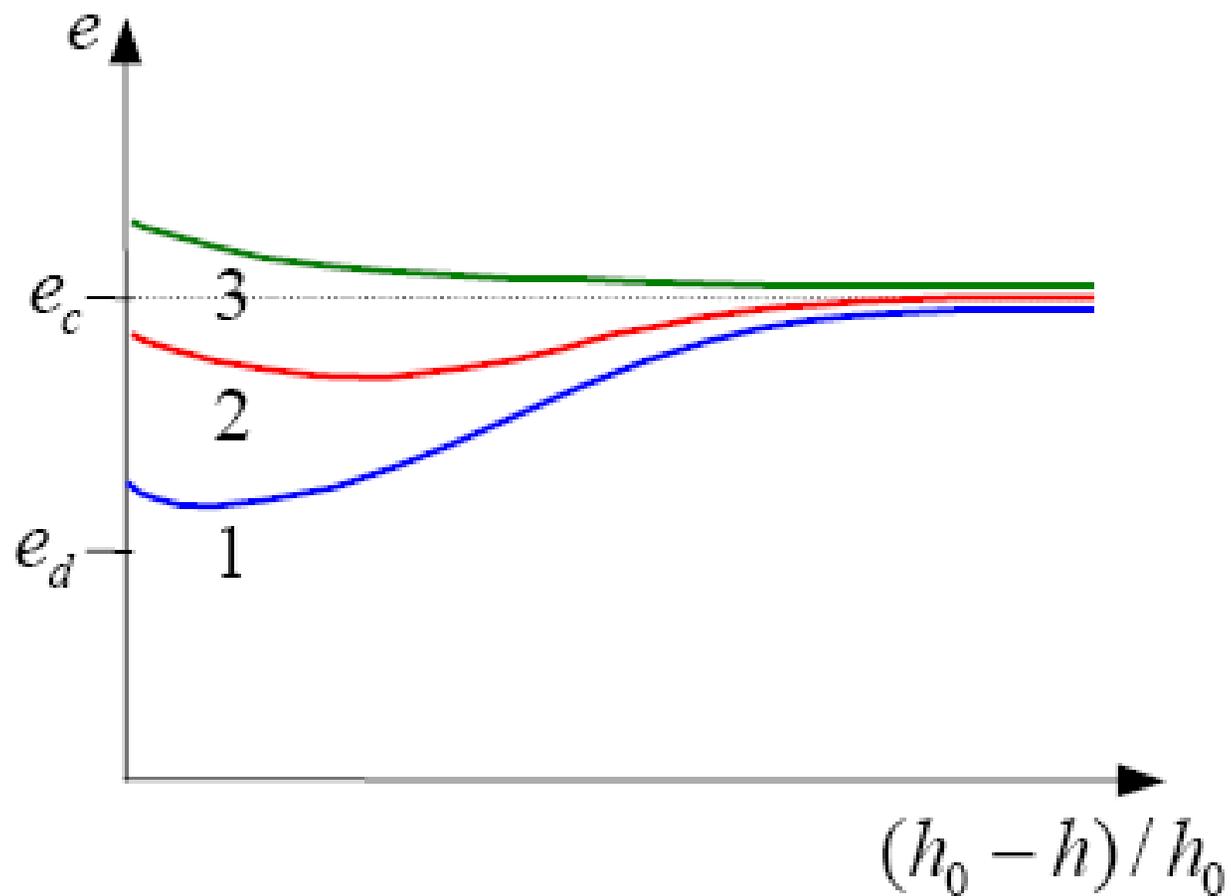
Compresión triaxial monotónica drenada – Estado crítico



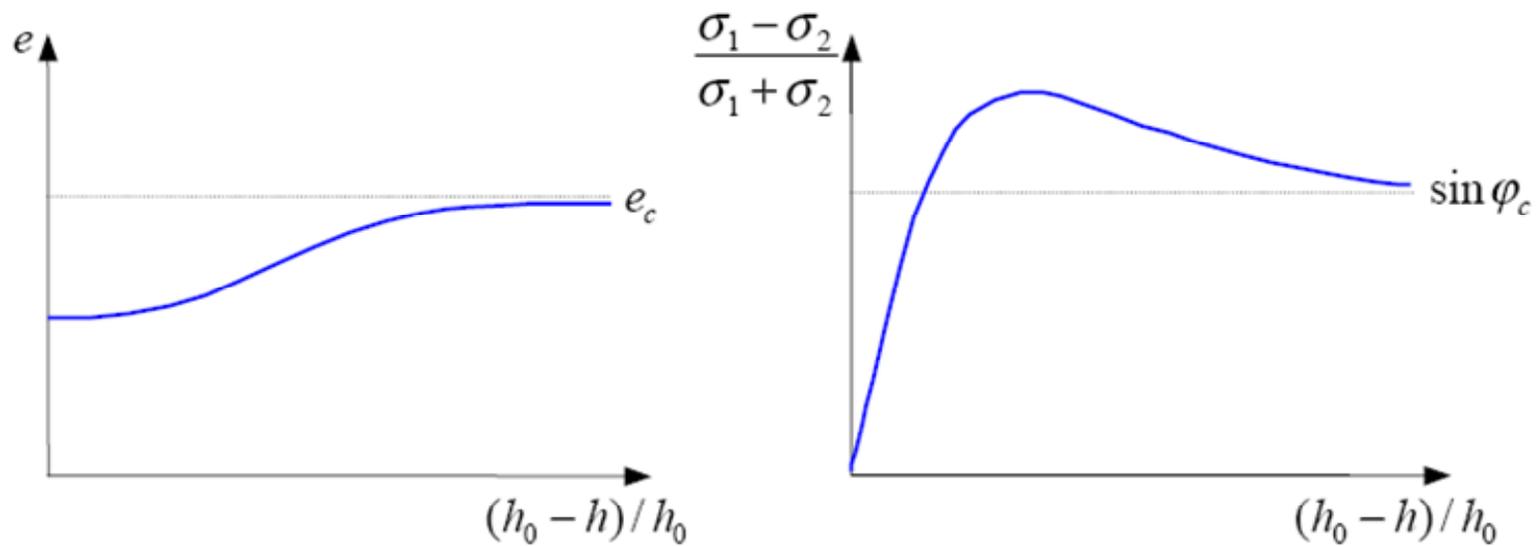
Compresión triaxial monotónica drenada – Estado crítico



Compresión triaxial monotónica drenada – Estado crítico



Compresión triaxial monotónica drenada – Ángulo de fricción crítico



Compresión triaxial monotónica drenada – Resultados experimentales

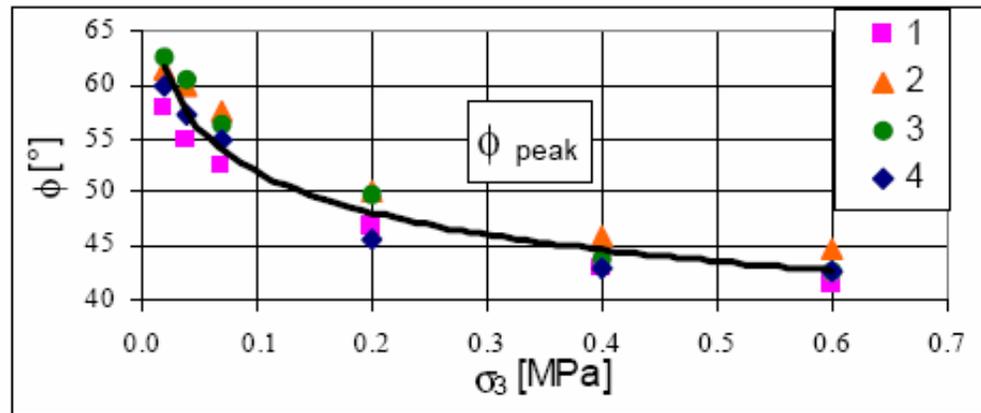


Fig.14 Ángulo de fricción "Río Maipo"

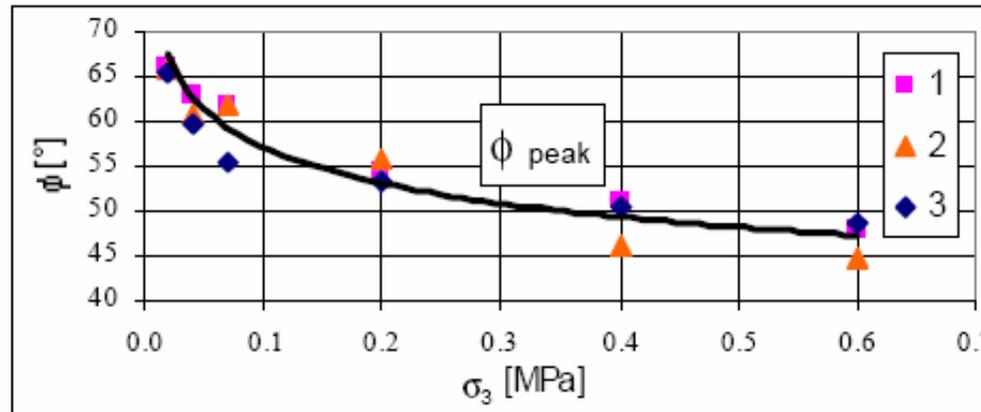


Fig.15 Ángulo de fricción "Río Aconcagua"



Compresión triaxial monotónica drenada – Resultados experimentales

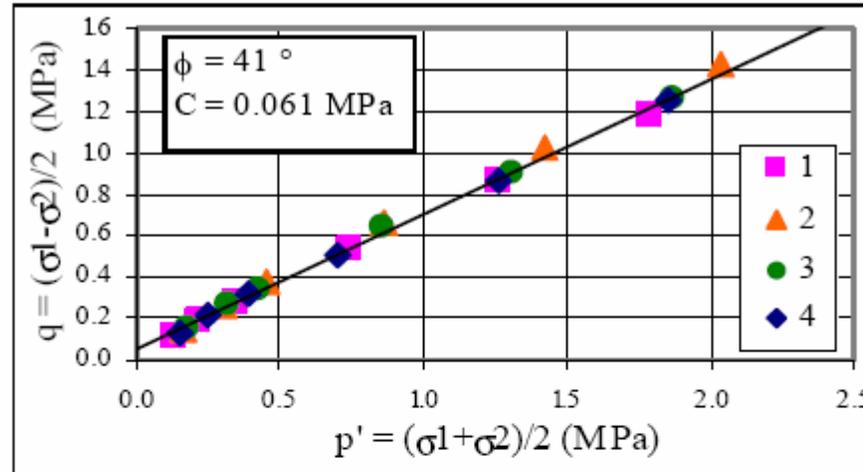


Fig.12 Envolvente de falla "Río Maipo"

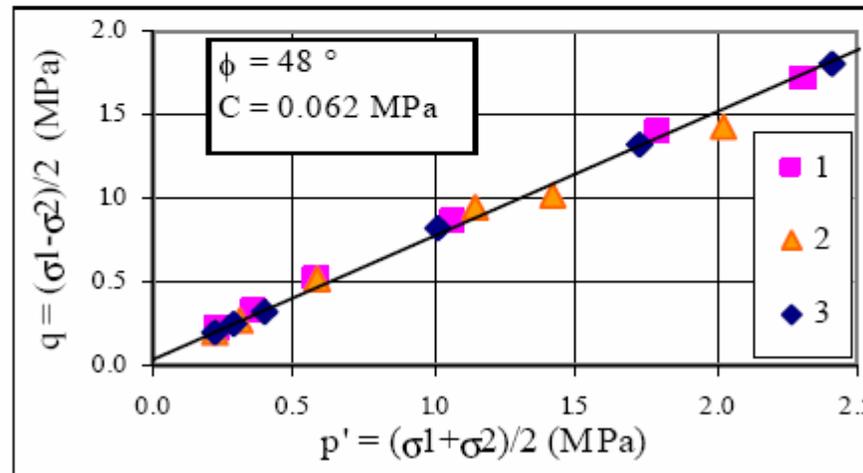
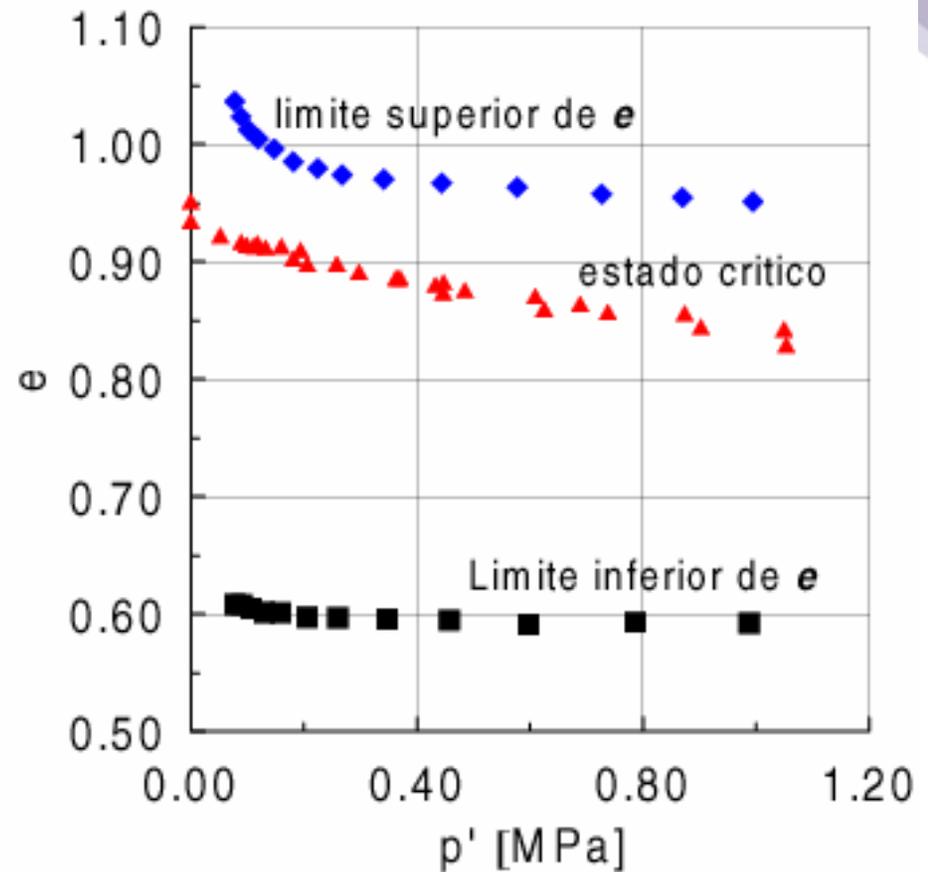
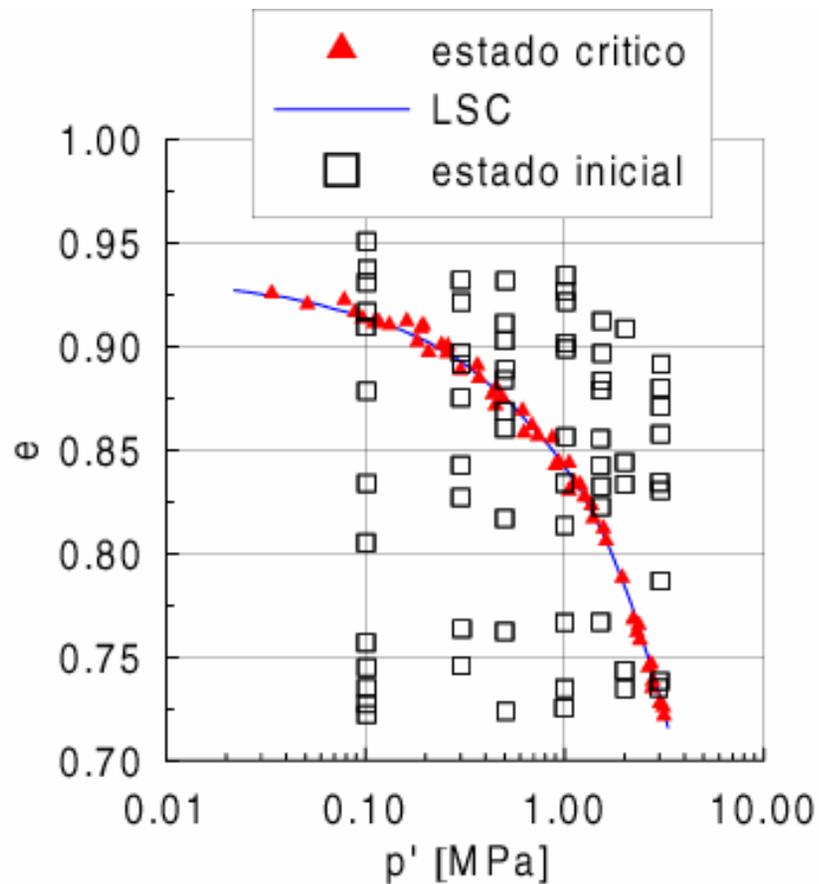


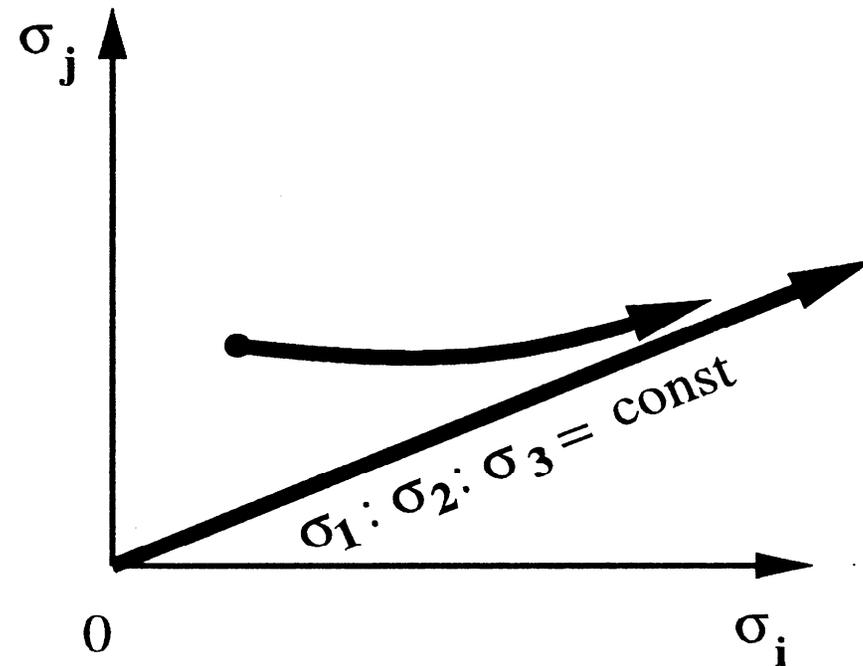
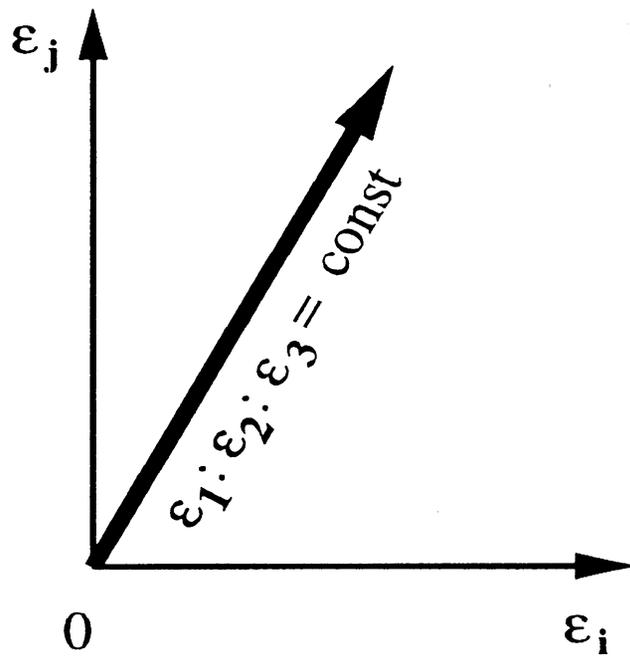
Fig.13 Envolvente de falla "Río Aconcagua"



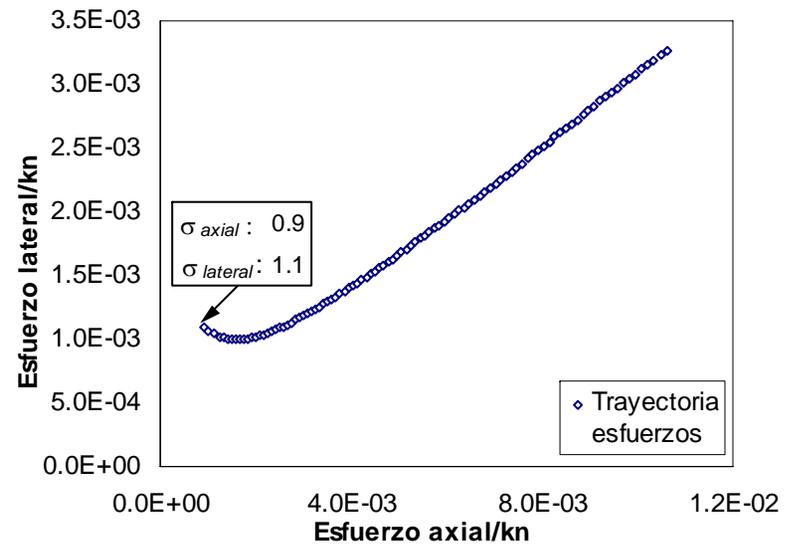
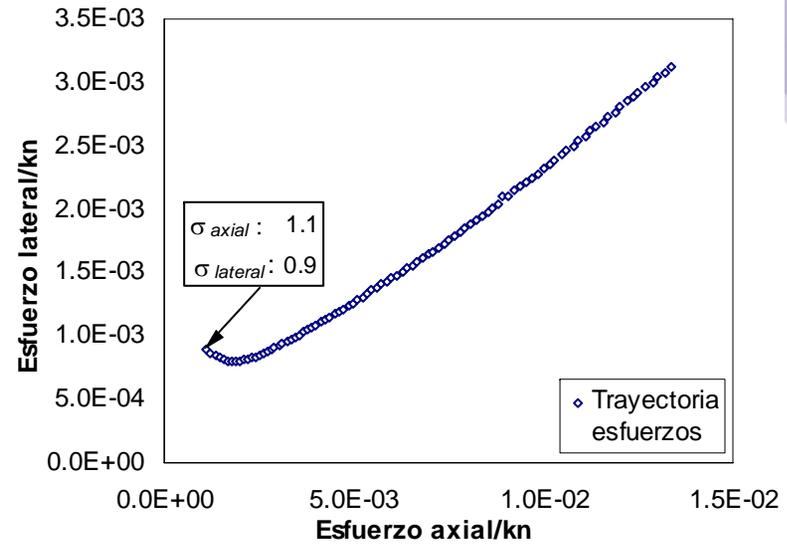
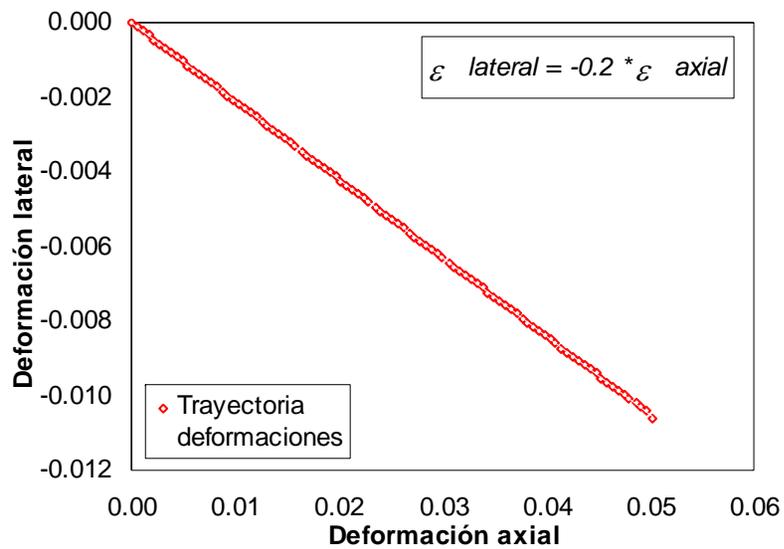
Compresión triaxial monotónica drenada – Estado crítico



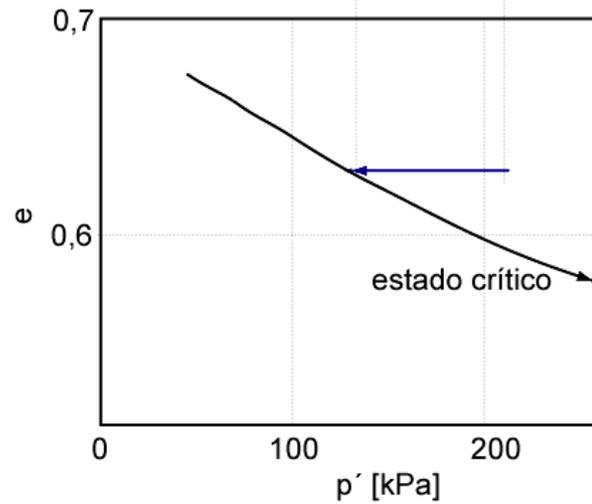
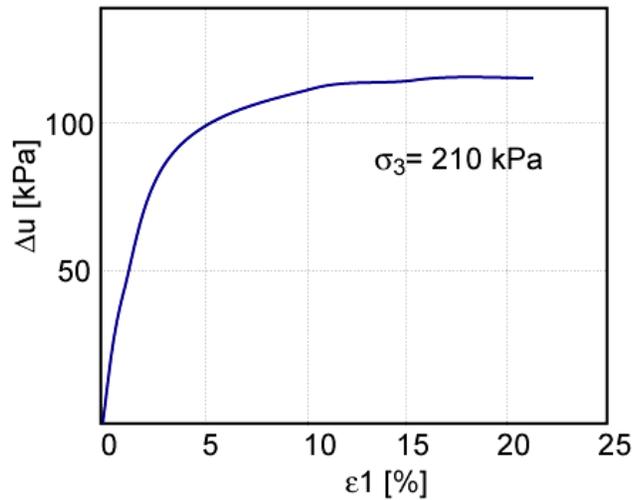
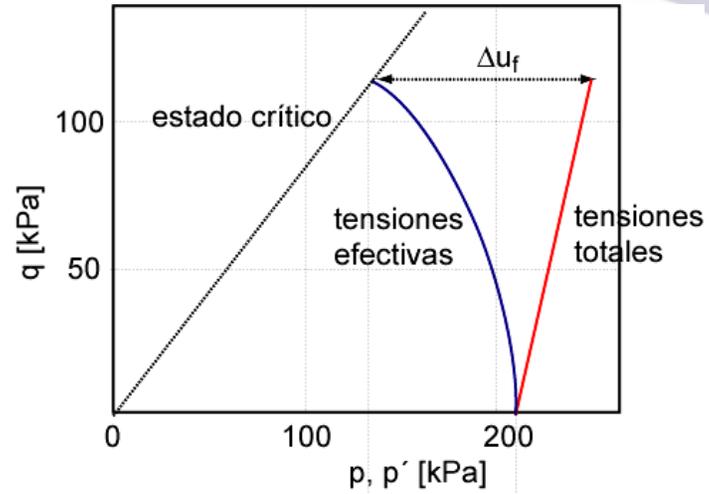
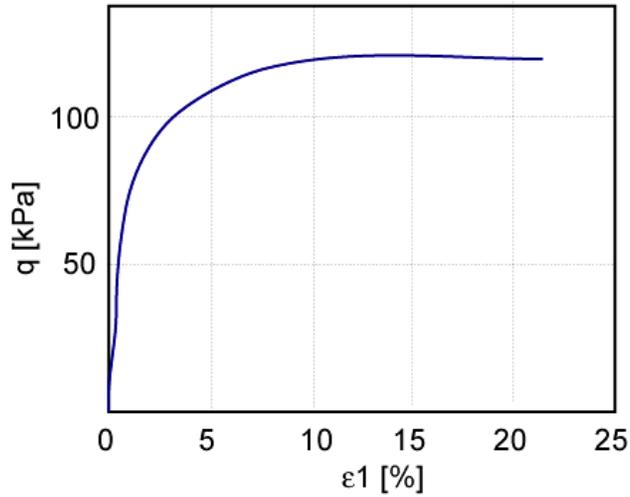
Deformación / Compresión proporcional



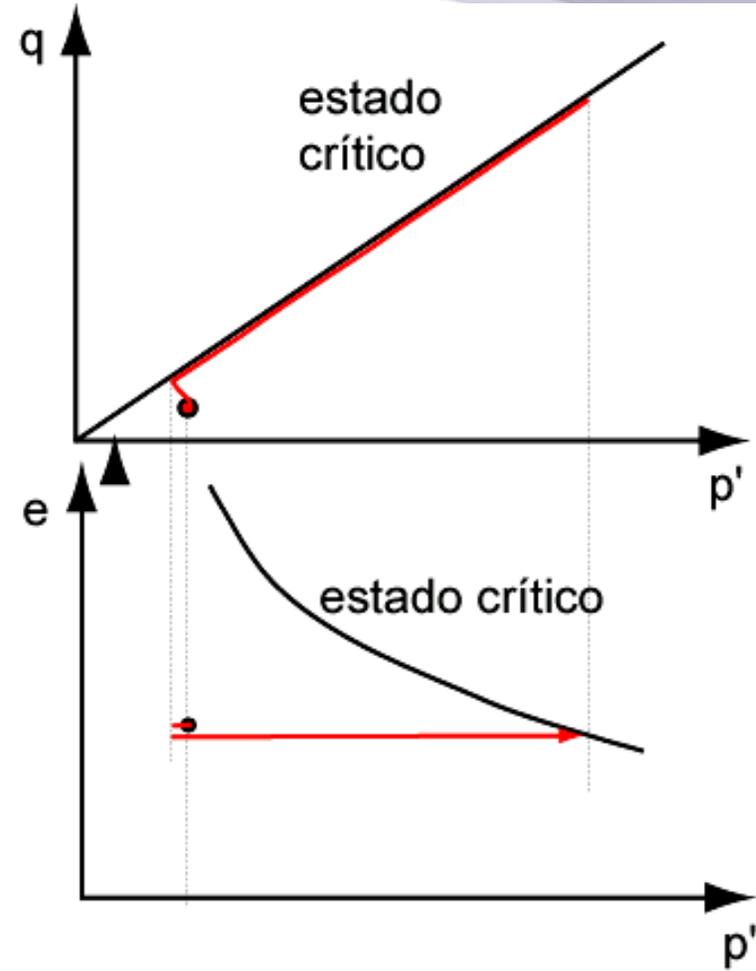
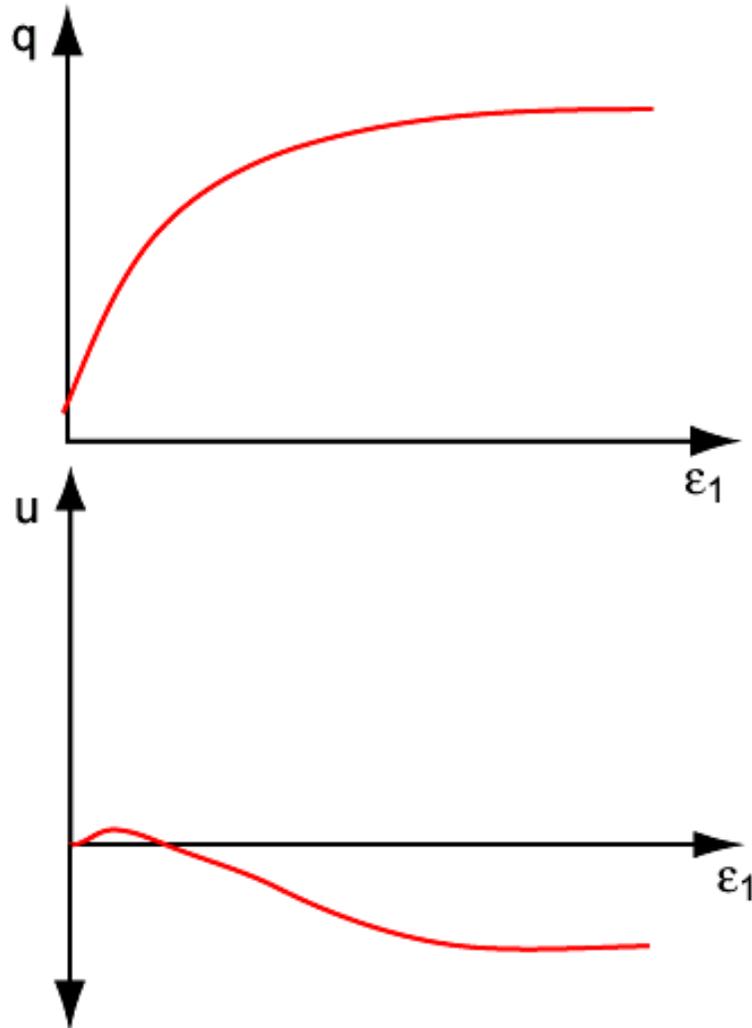
Deformación / Compresión proporcional



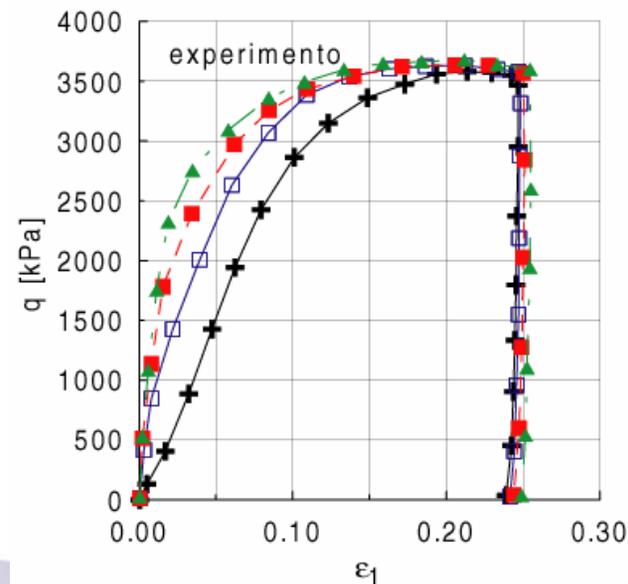
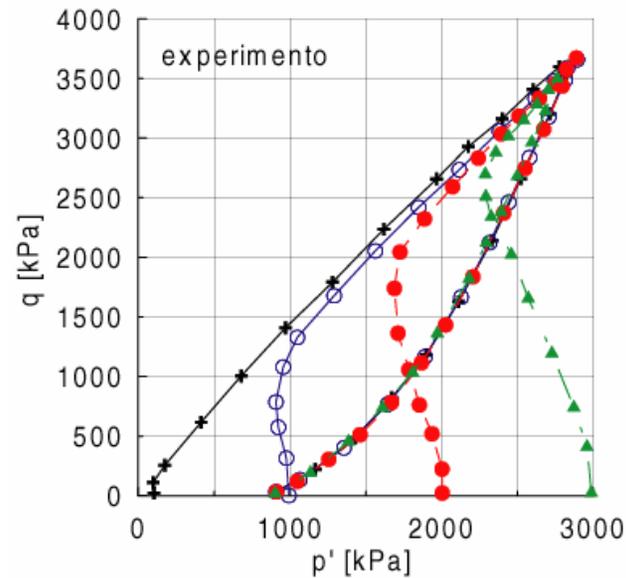
Compresión triaxial monotónica no drenada



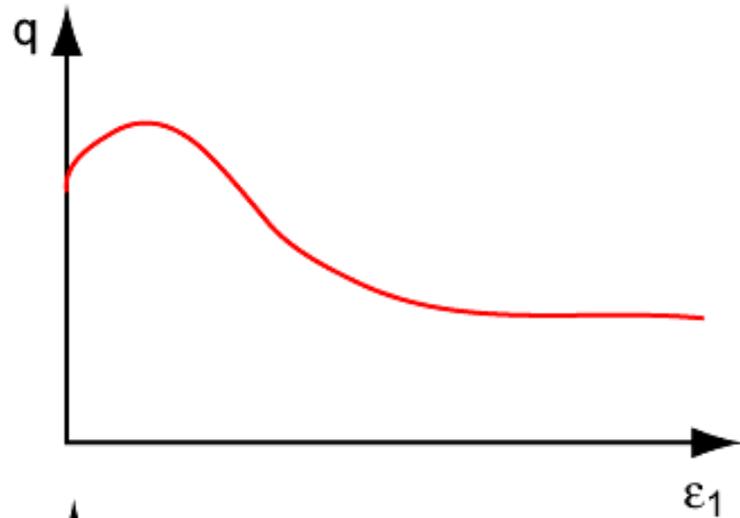
Compresión triaxial monotónica no drenada – Muestra en estado denso



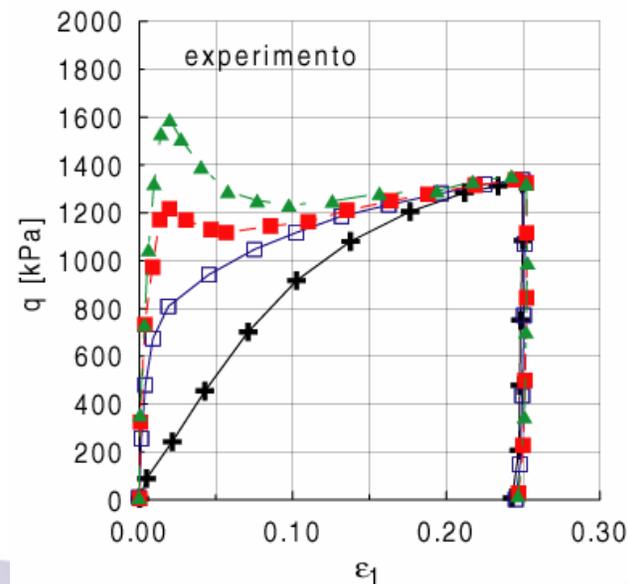
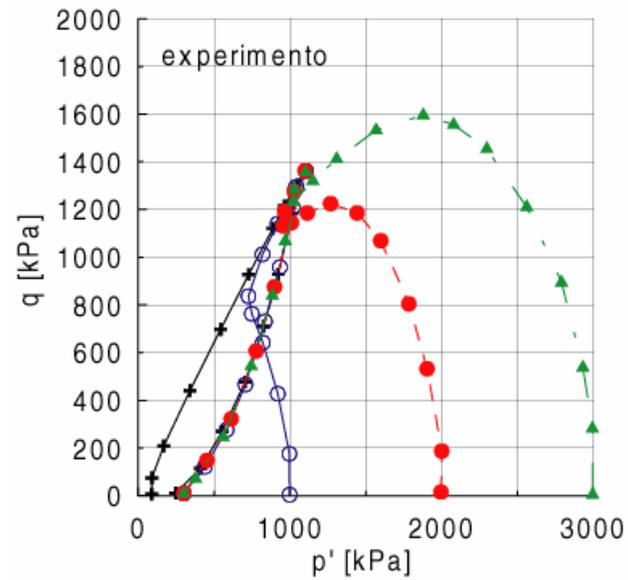
Compresión triaxial monotónica no drenada – Muestra en estado denso – Resultados experimentales



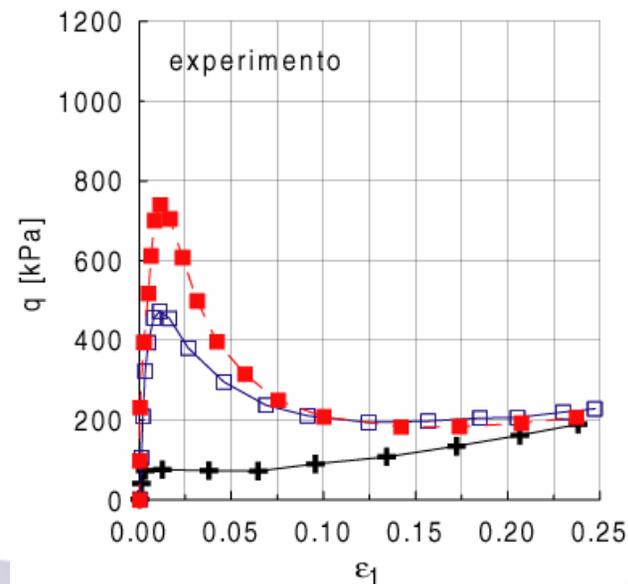
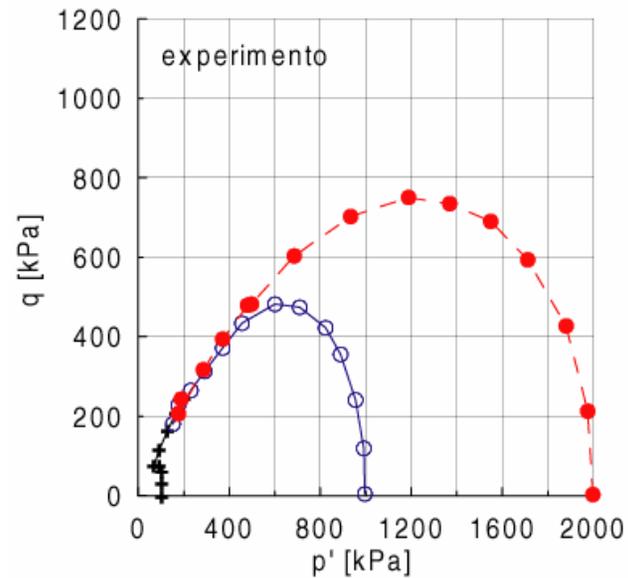
Compresión triaxial monotónica no drenada – Muestra en estado suelto



Compresión triaxial monotónica no drenada – Muestra en estado suelto – Resultados experimentales



Compresión triaxial monotónica no drenada – Muestra en estado MUY suelto – Resultados experimentales



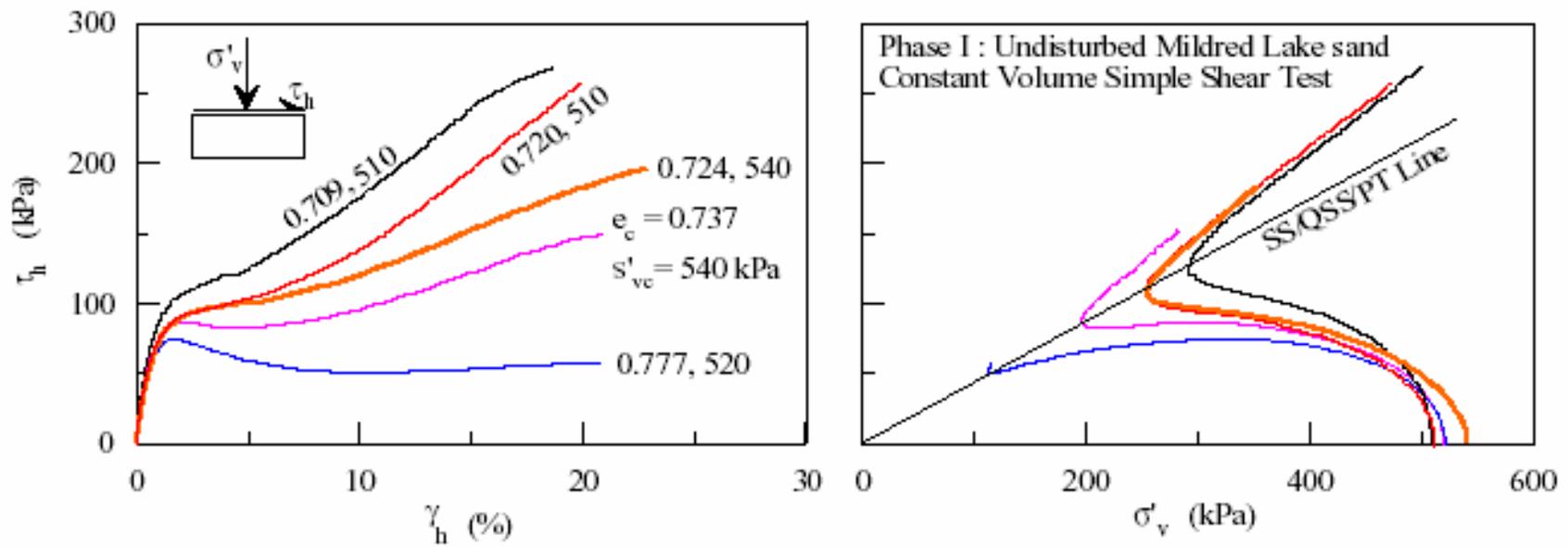
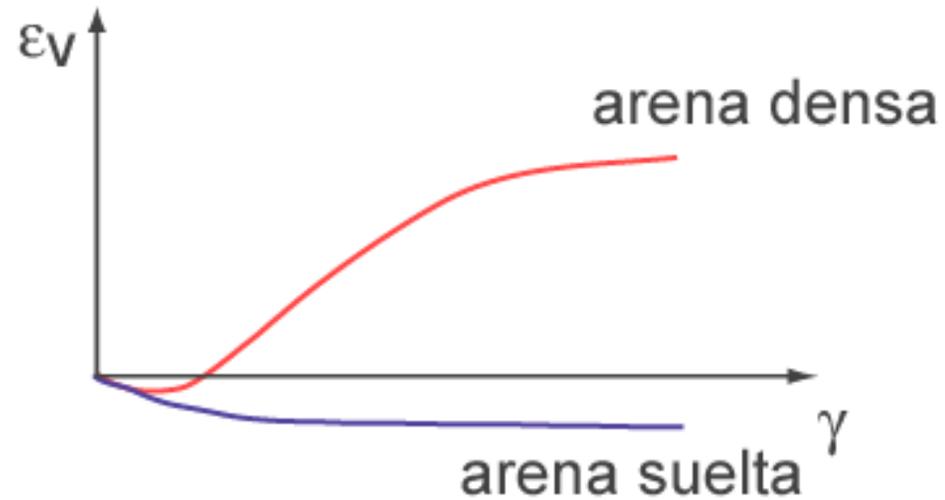
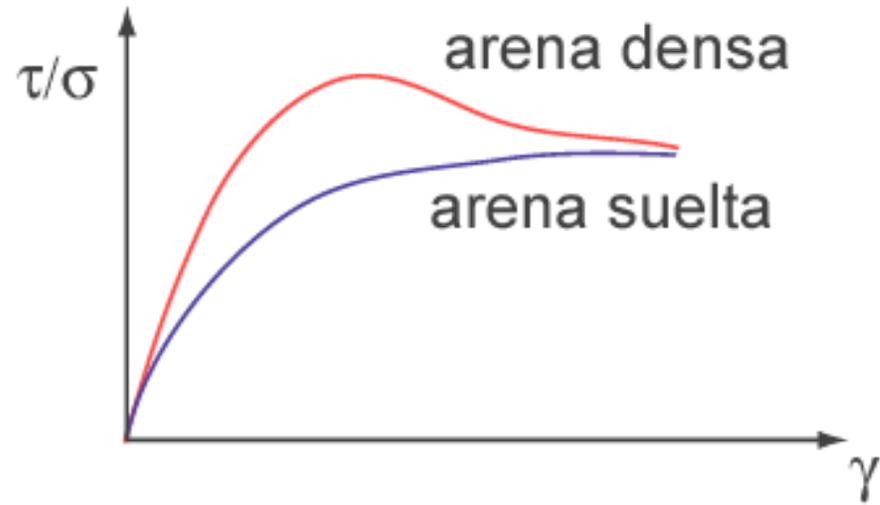
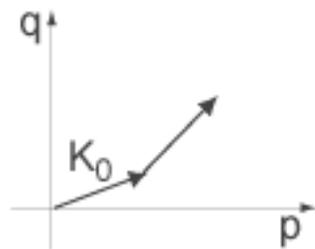
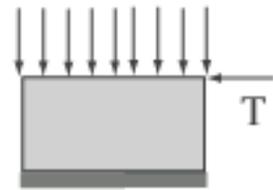


Figure 8: Range of undrained simple shear response in undisturbed Mildred Lake sand

Sivathayalan & Vaid, 2004



Corte simple con cambio de volumen drenado



Corte simple no drenado

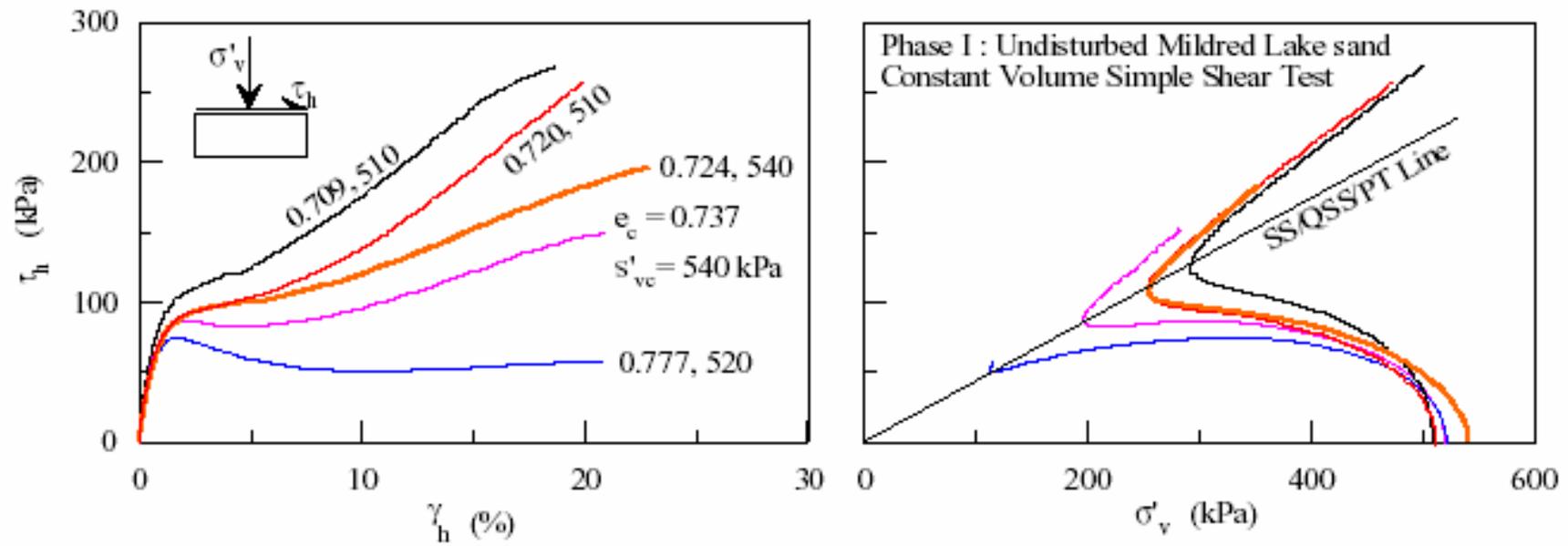
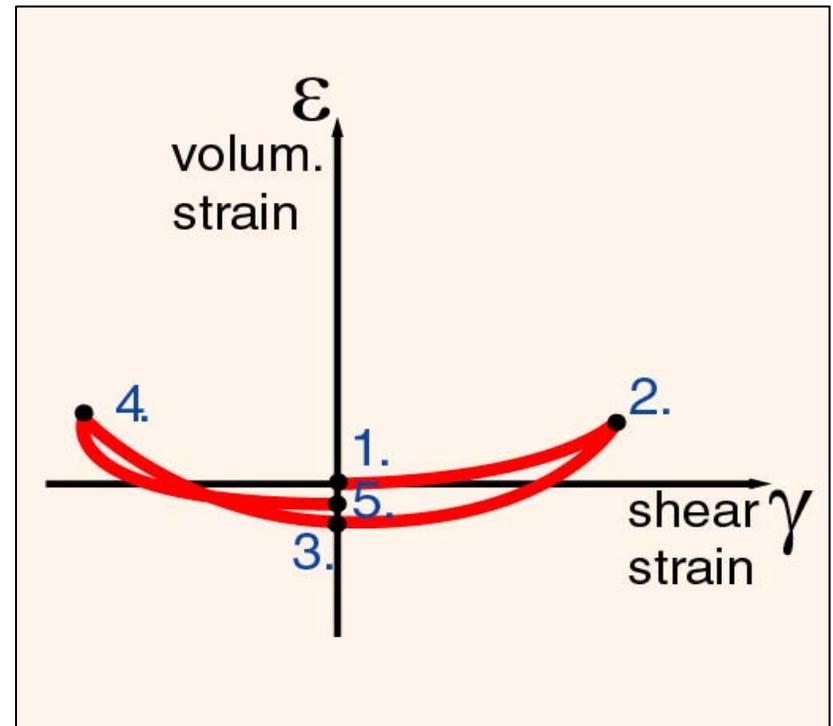
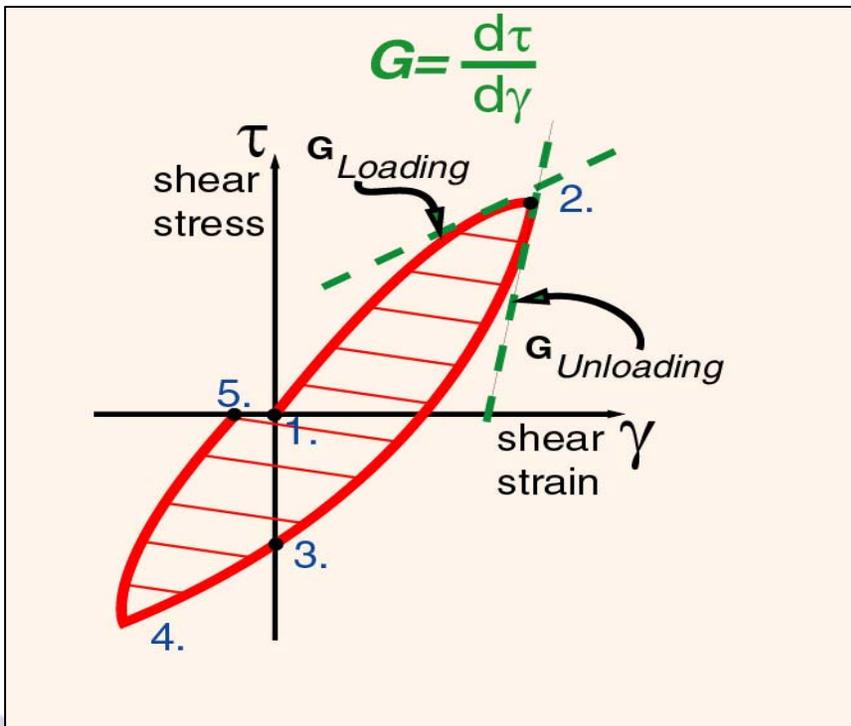
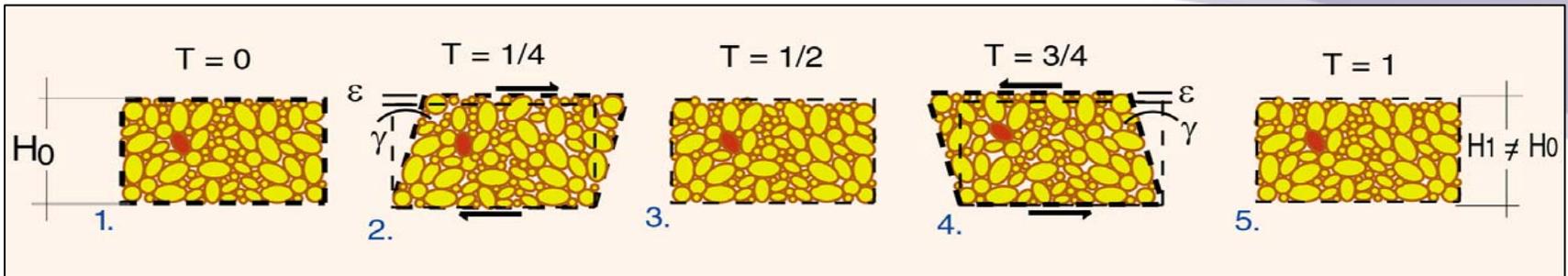


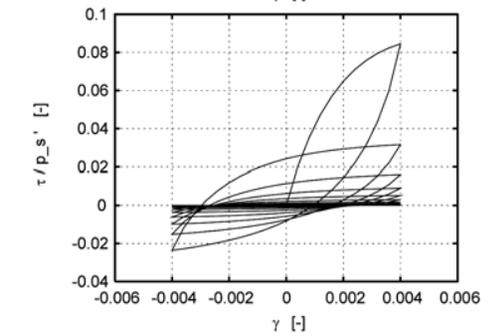
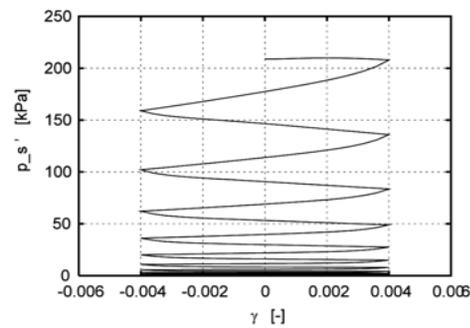
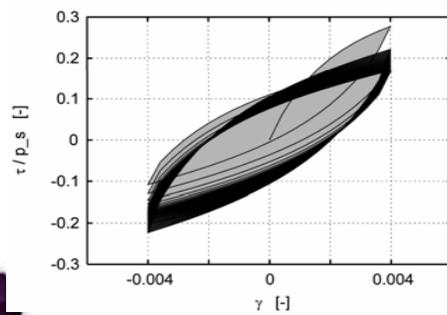
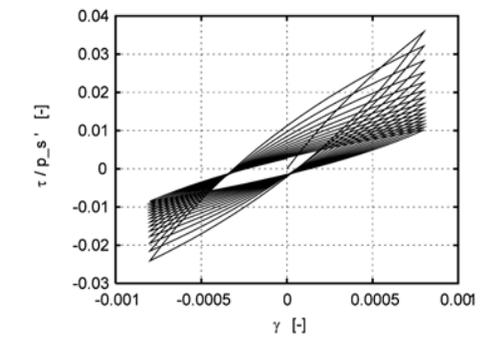
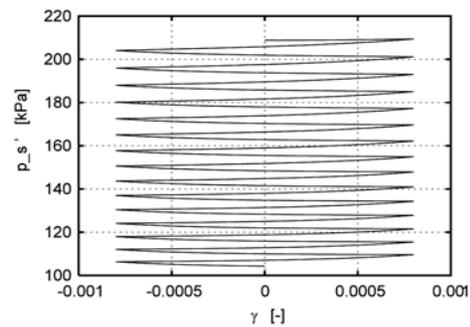
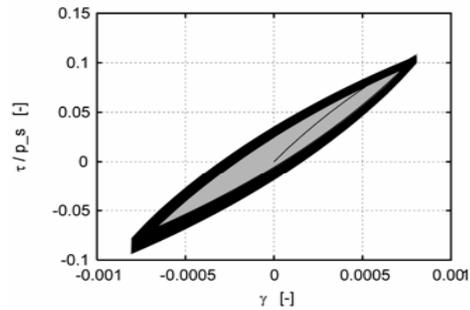
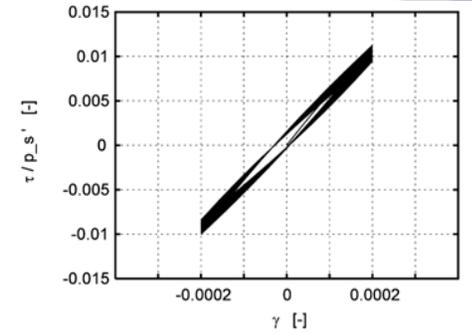
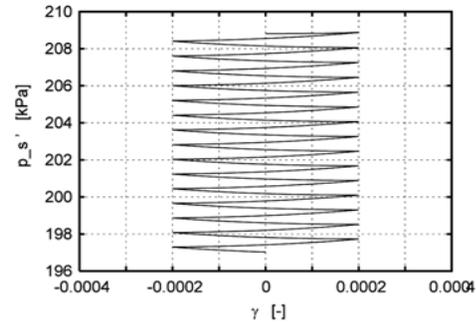
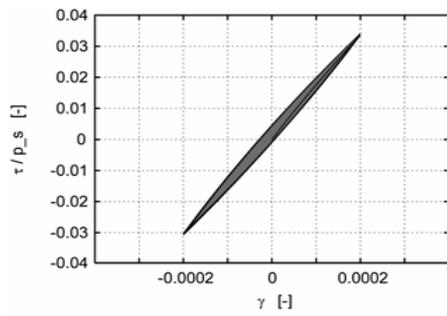
Figure 8: Range of undrained simple shear response in undisturbed Mildred Lake sand



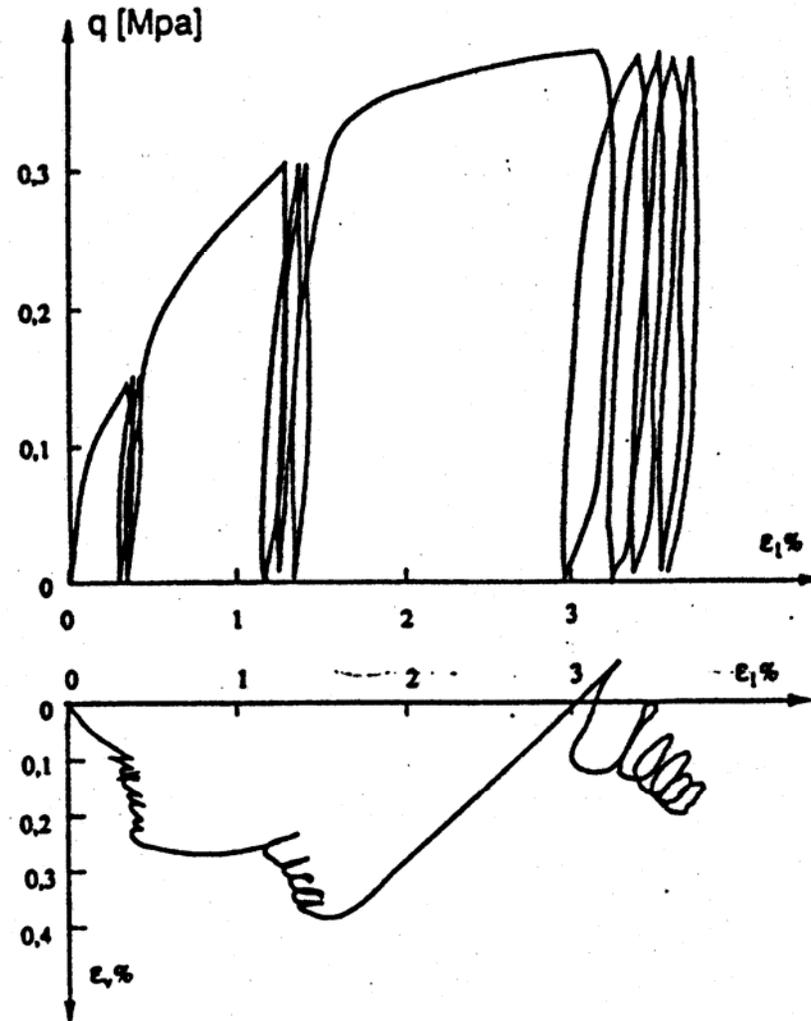
Corte simple cíclico



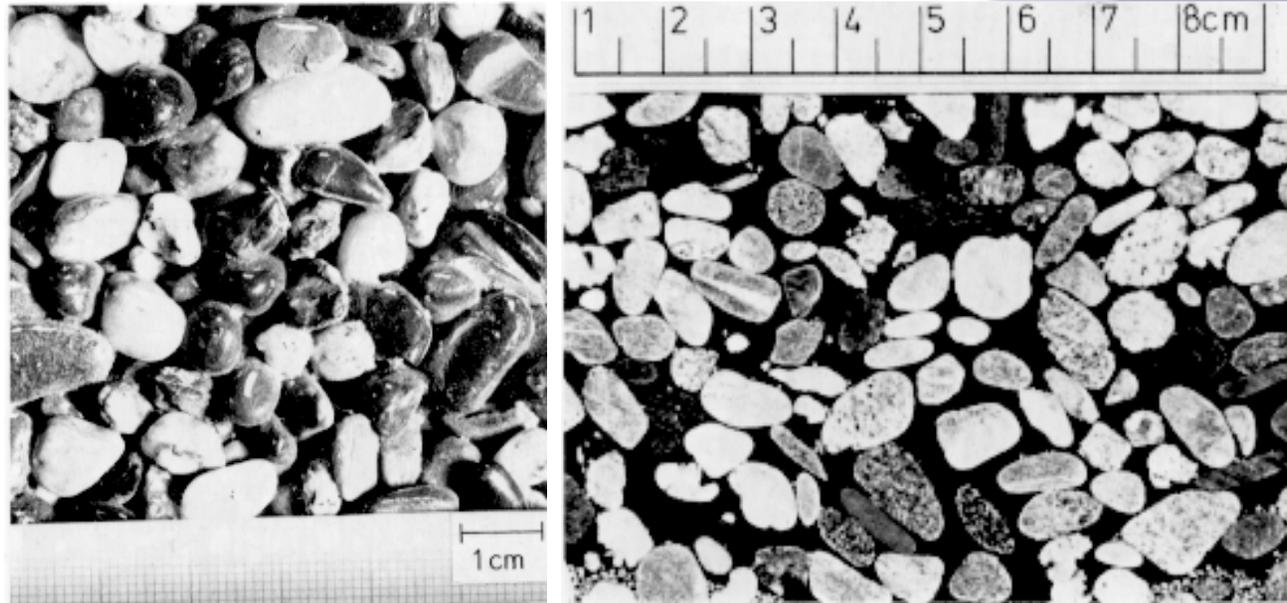
Corte simple cíclico



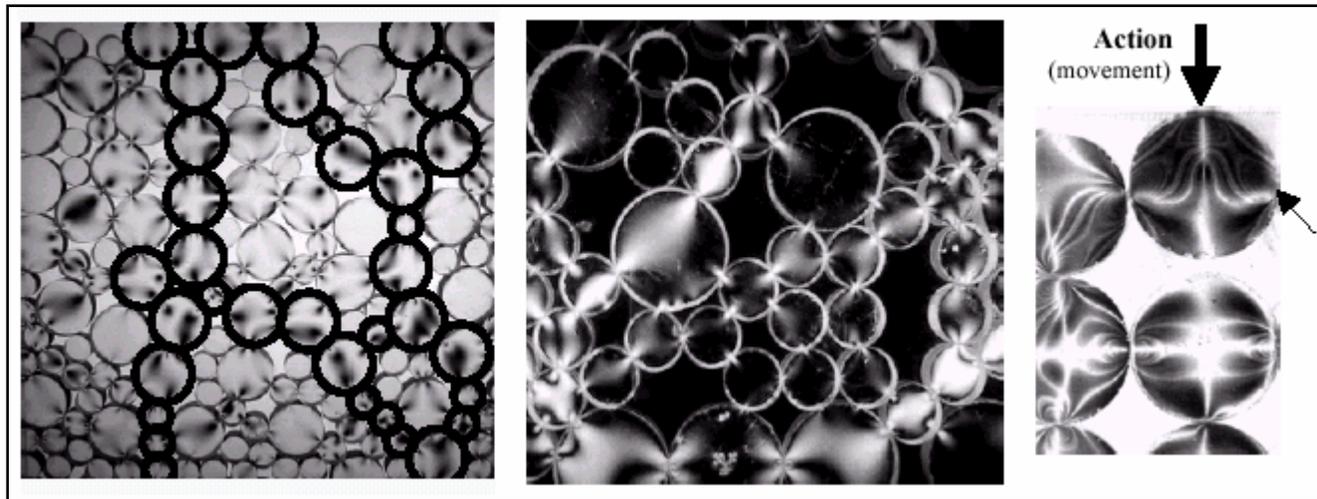
Compresión triaxial cíclica drenada



Comportamiento de Suelos Granulares



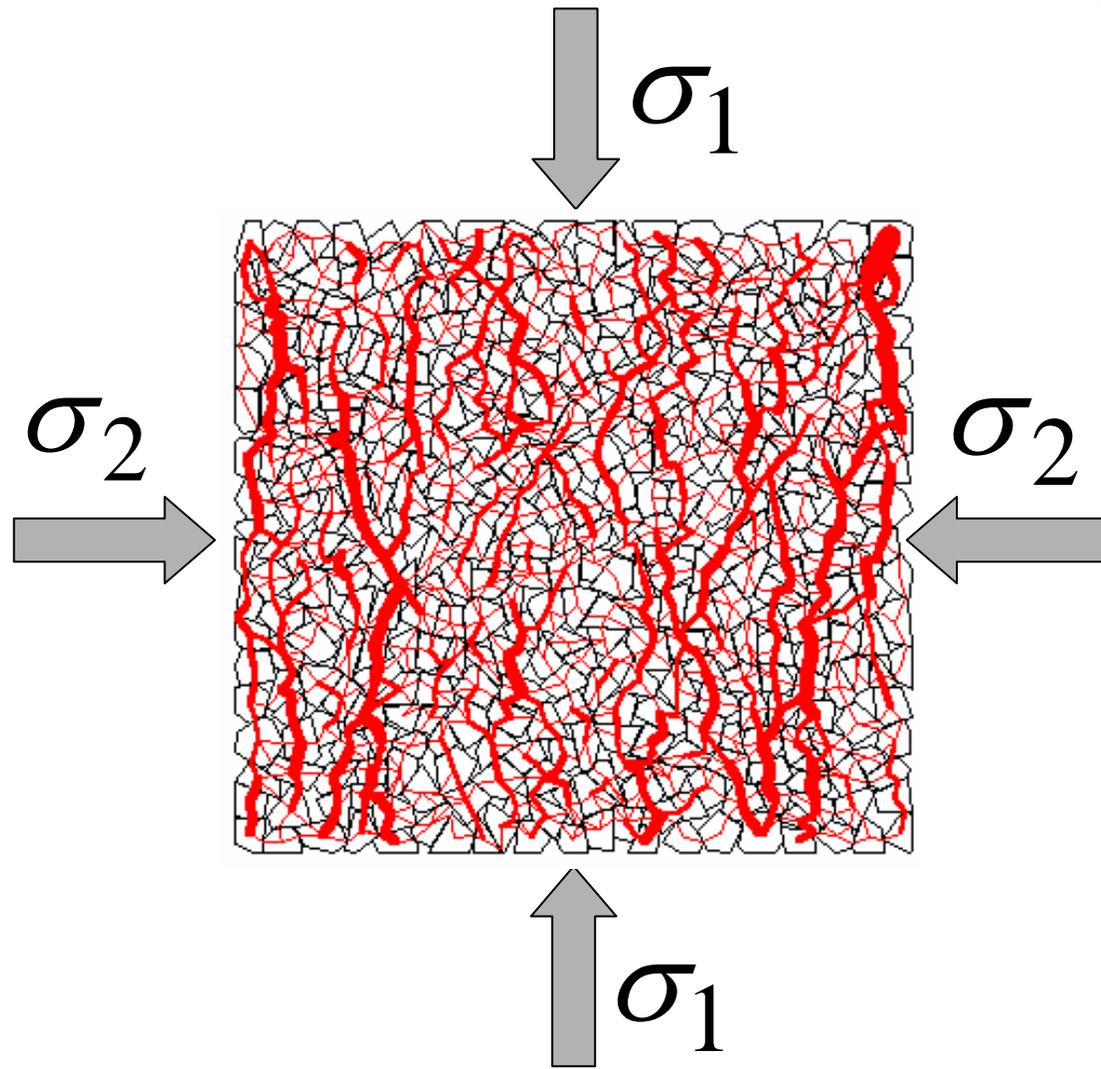
Comportamiento mecánico



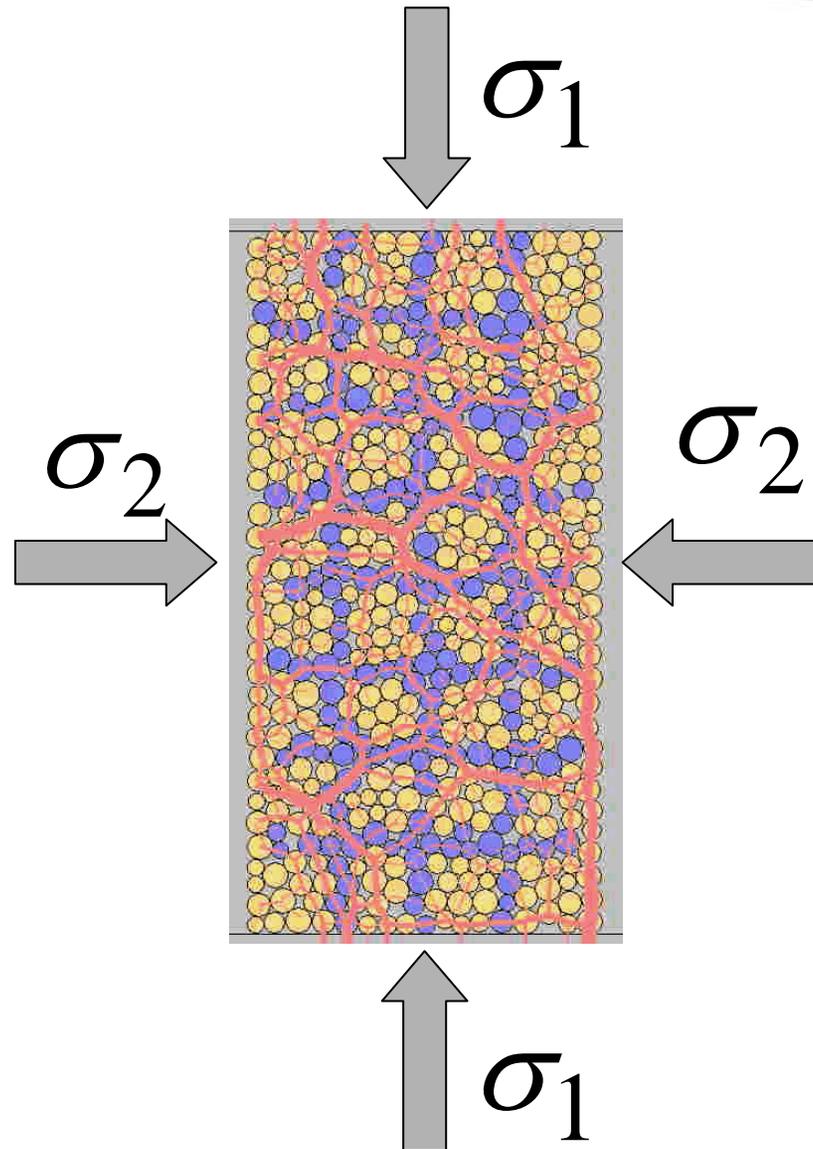
(SANTAMARINA, 2002)



Comportamiento mecánico



Comportamiento mecánico



Tipos de suelos – Arenas – Esqueletos granulares

Esqueletos granulares están conformados por granos que se tocan entre sí y que transmiten cargas, cuya forma solo puede ser caracterizada de forma aproximada.



Tipos de suelos – Arenas – Esqueletos granulares

Esqueletos granulares están conformados por granos que se tocan entre sí y que transmiten cargas, cuya forma solo puede ser caracterizada de forma aproximada. Las propiedades de los granos y su distribución estadística determinan básicamente el comportamiento mecánico de esqueletos granulares.



Tipos de suelos – Arenas – Esqueletos granulares

Esqueletos granulares están conformados por granos que se tocan entre sí y que transmiten cargas, cuya forma solo puede ser caracterizada de forma aproximada. Las propiedades de los granos y su distribución estadística determinan básicamente el comportamiento mecánico de esqueletos granulares. Influencian igualmente este comportamiento, diferentes fuerzas de atracción y repulsión entre partículas.



Tipos de suelos – Arenas – Esqueletos granulares

Esqueletos granulares están conformados por granos que se tocan entre sí y que transmiten cargas, cuya forma solo puede ser caracterizada de forma aproximada. Las propiedades de los granos y su distribución estadística determinan básicamente el comportamiento mecánico de esqueletos granulares. Influencian igualmente este comportamiento, diferentes fuerzas de atracción y repulsión entre partículas. La interacción entre partículas es más significativa entre menor sea el tamaño de éstas.



Tipos de suelos – Arenas – Esqueletos granulares

Esqueletos granulares están conformados por granos que se tocan entre sí y que transmiten cargas, cuya forma solo puede ser caracterizada de forma aproximada. Las propiedades de los granos y su distribución estadística determinan básicamente el comportamiento mecánico de esqueletos granulares. Influencian igualmente este comportamiento, diferentes fuerzas de atracción y repulsión entre partículas. La interacción entre partículas es más significativa entre menor sea el tamaño de éstas. Esta interacción no es regular, debido a que los granos no son iguales.

