



FACULTAD
DE INGENIERÍA



Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez

juan.pablo.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

+54 261 5796326



═══════ Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG ═══════
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Modelos Constitutivos para Suelos

Teoría de Estado Crítico

ACMIG03: Comportamiento Mecánico de Suelos

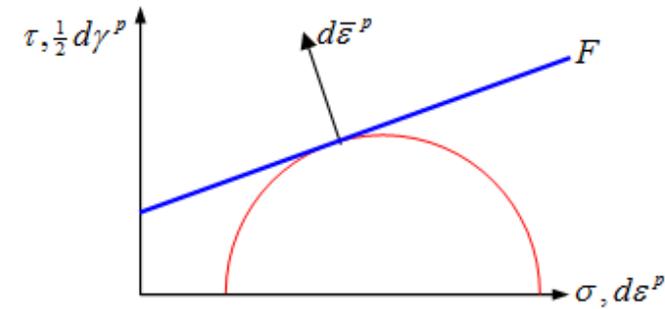
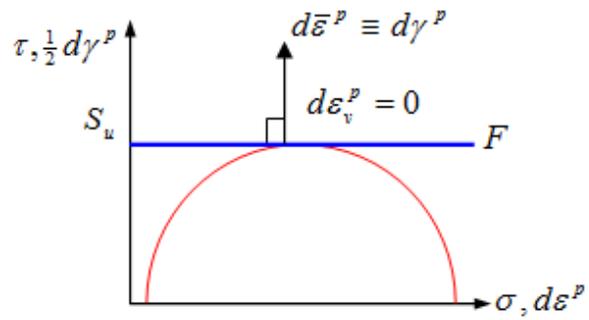
Dr. Juan Pablo Ibañez

juan.pablo.ibanez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

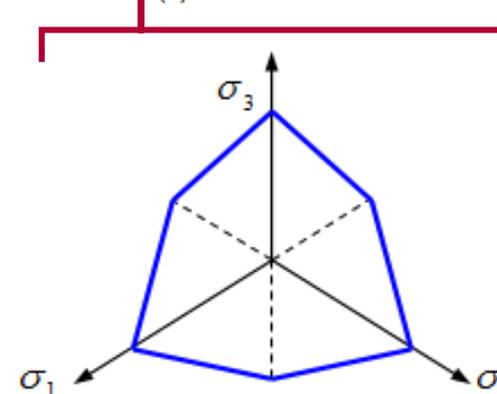
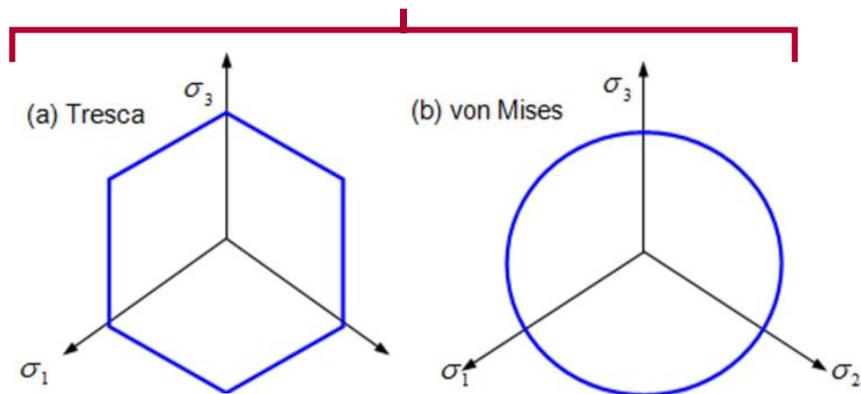
+54 261 5796326

BASES DE LA TEORÍA DE ESTADO CRÍTICO

- Desde Coulomb (1776) y Rankine (1857) se vienen aplicando los conceptos de la plasticidad al estudio tensión-deformación de suelos, adaptando modelos aplicados a metales.
- Ejemplo: **Mohr-Coulomb como modelo de Tresca *extendido***.

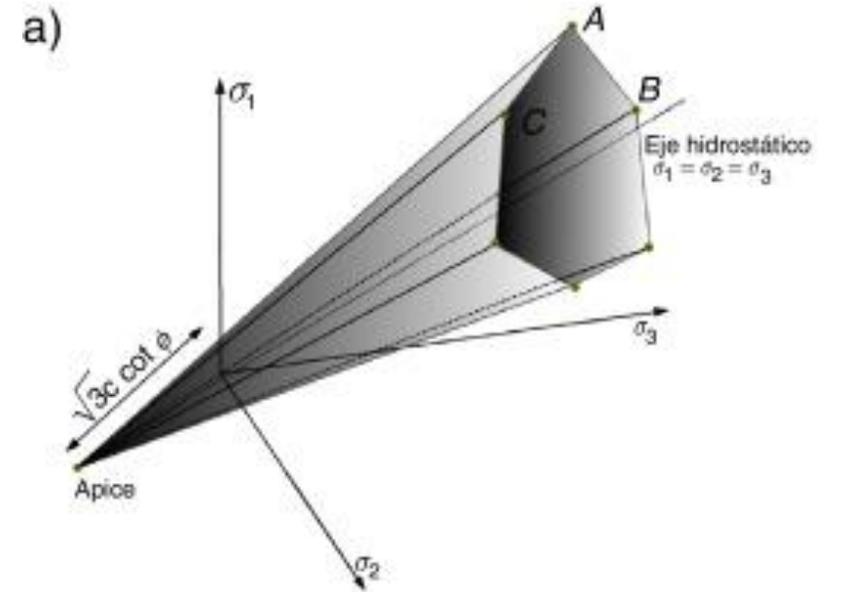
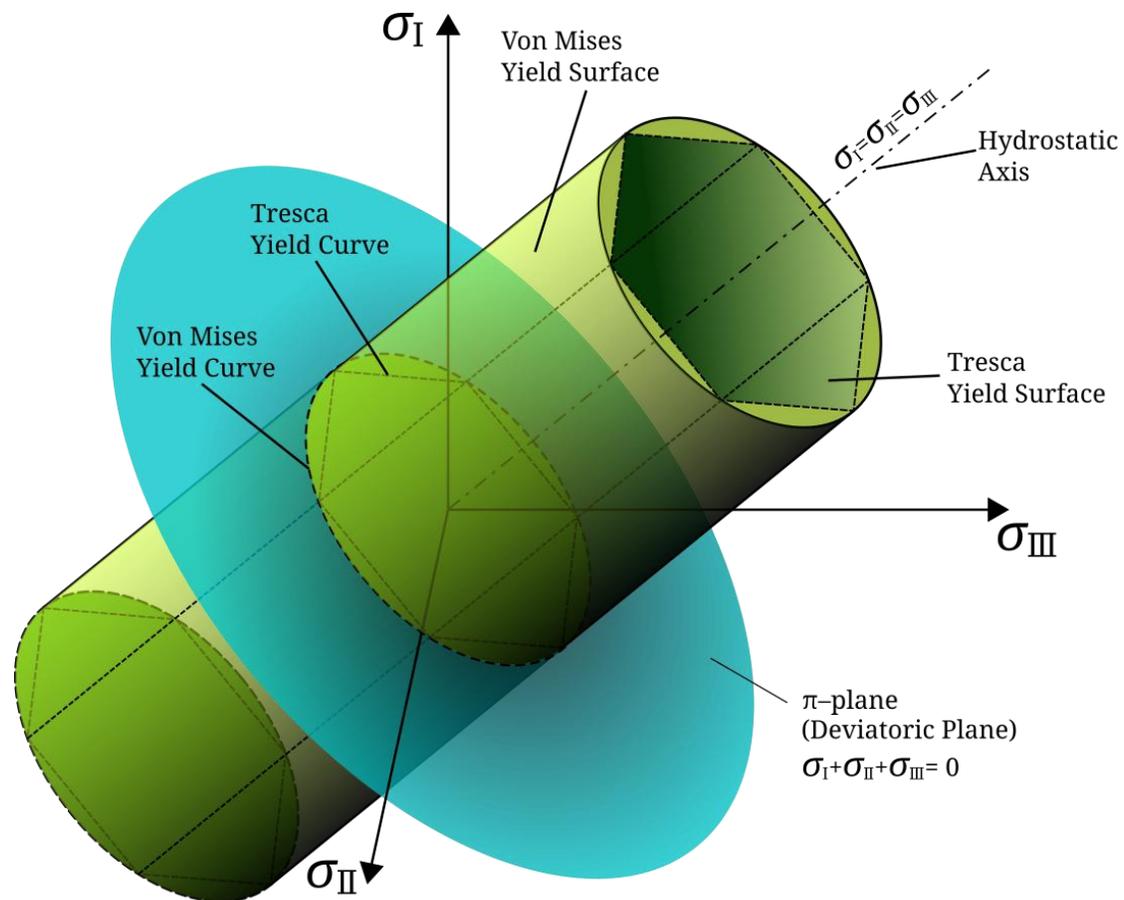


(b) Criterio de Mohr-Coulomb

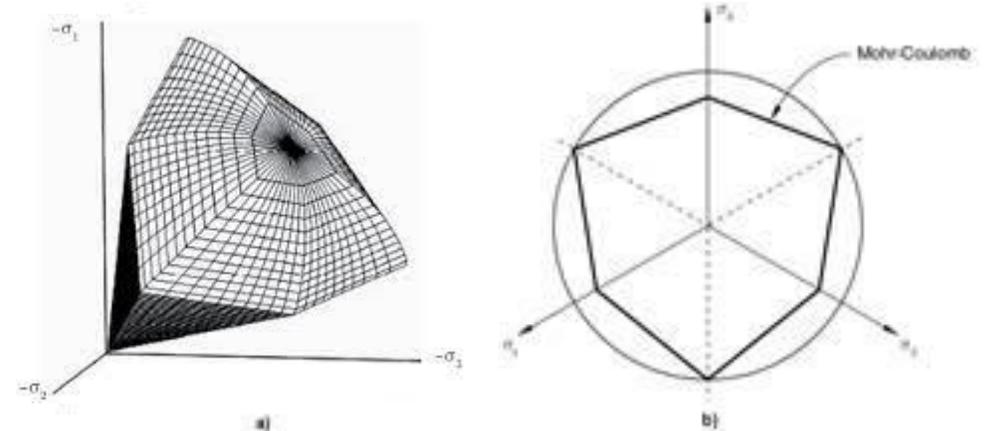


BASES DE LA TEORÍA DE ESTADO CRÍTICO

- Ejemplo: Mohr-Coulomb como modelo de Tresca *extendido*.
 - Efecto del confinamiento y ausencia de tensión intermedia.



Modelo de MC en 3D.

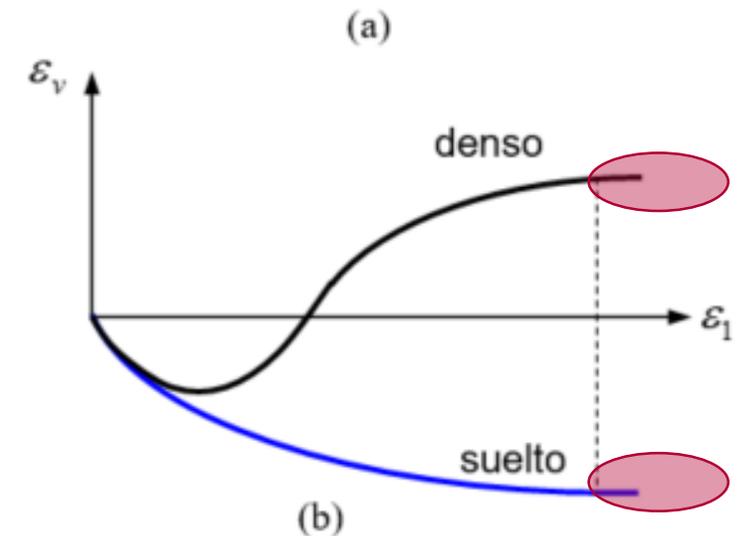
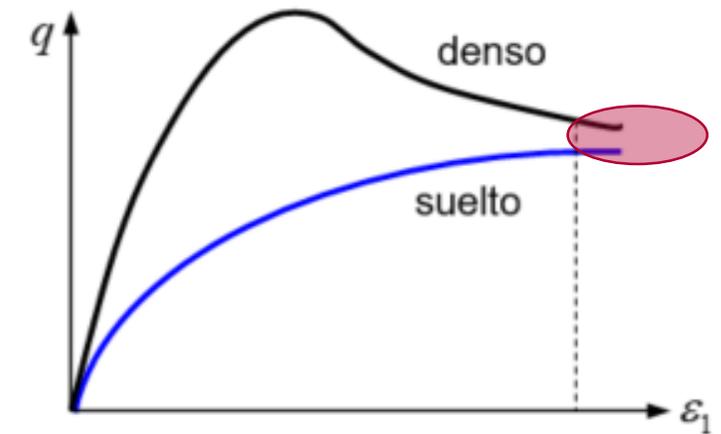


BASES DE LA TEORÍA DE ESTADO CRÍTICO

- En 1958, a partir de la **experiencia de laboratorio de suelos acumulada en Corte Triaxial**, el **Prof. Roscoe** de la universidad de Cambridge observó:

(En ensayos triaxiales convencionales drenados y no drenados en suelos cohesivos saturados. **Analiza evolución de e , p , q**):

- El suelo inicialmente experimenta aumento de resistencia con contracción o dilatancia (**e varia, p constante, q crece**).
- Con el incremento de la deformación axial, el suelo en cualquier caso *tiende a una resistencia final a volumen constante* (**e constante, p constante, q constante**).
- Este estado a volumen constante se denomina **estado crítico**.
- Los estados (e , p , q) críticos se alinean en torno a una **Línea de Estado Crítico (LEC o CSL)**, una suerte de envolvente critica.



MODELO COMPORTAMENTAL INTEGRADO

El Prof. Roscoe desarrolló un modelo para suelos integrando:

- los estados de tensión y deformación de suelos en TRIAXIAL y CONSOLIDACIÓN;
- los estados elástico y plástico, y la frontera dinámica entre ellos;
- La evolución de estados de carga hacia un estado crítico con volumen y resistencia al corte constante.
- El estado del suelo se define por **tres variables de estado**:

- **Volumen específico:**

$$v = 1 + e$$

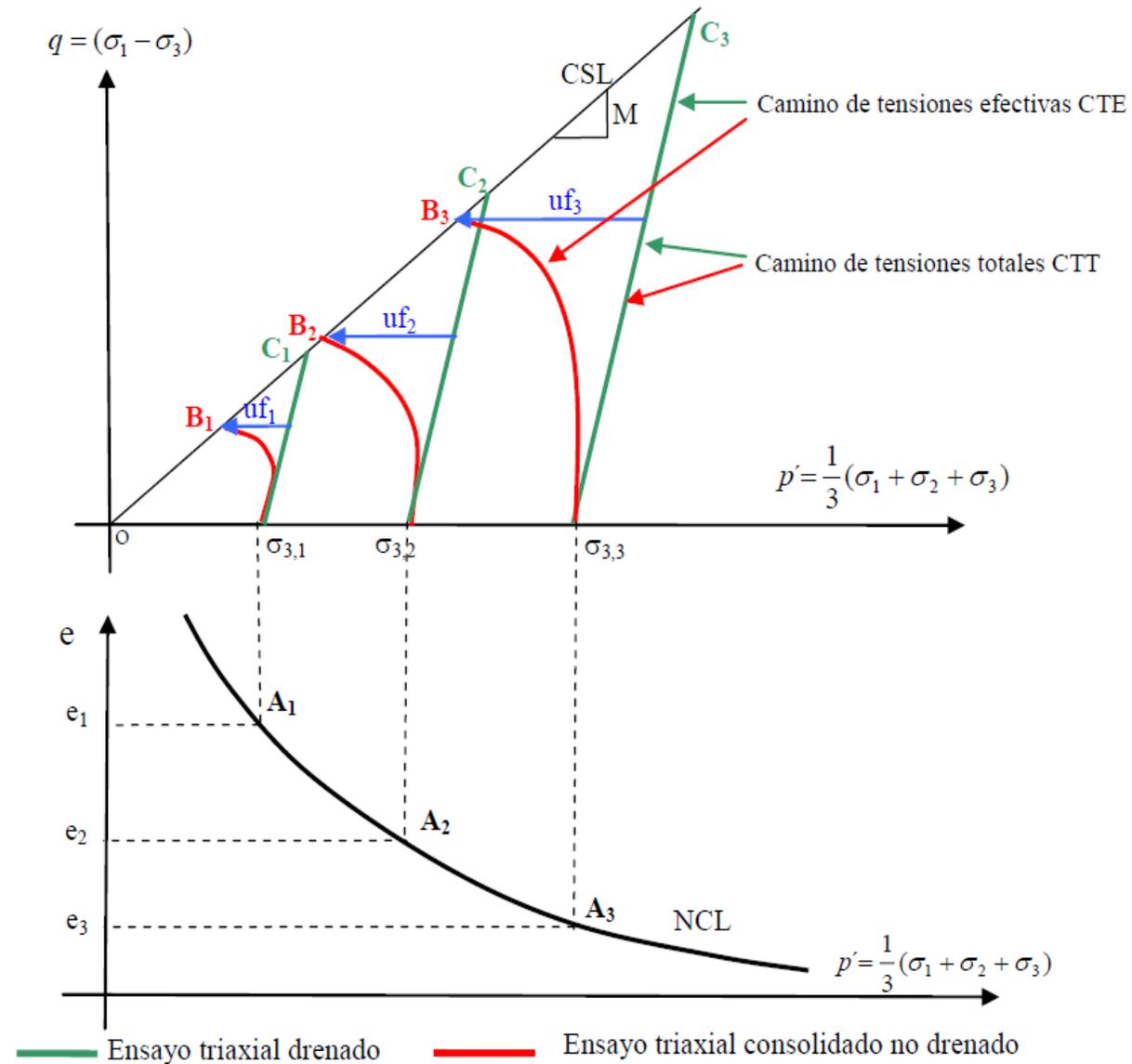
(siendo "e" la relación de vacíos)

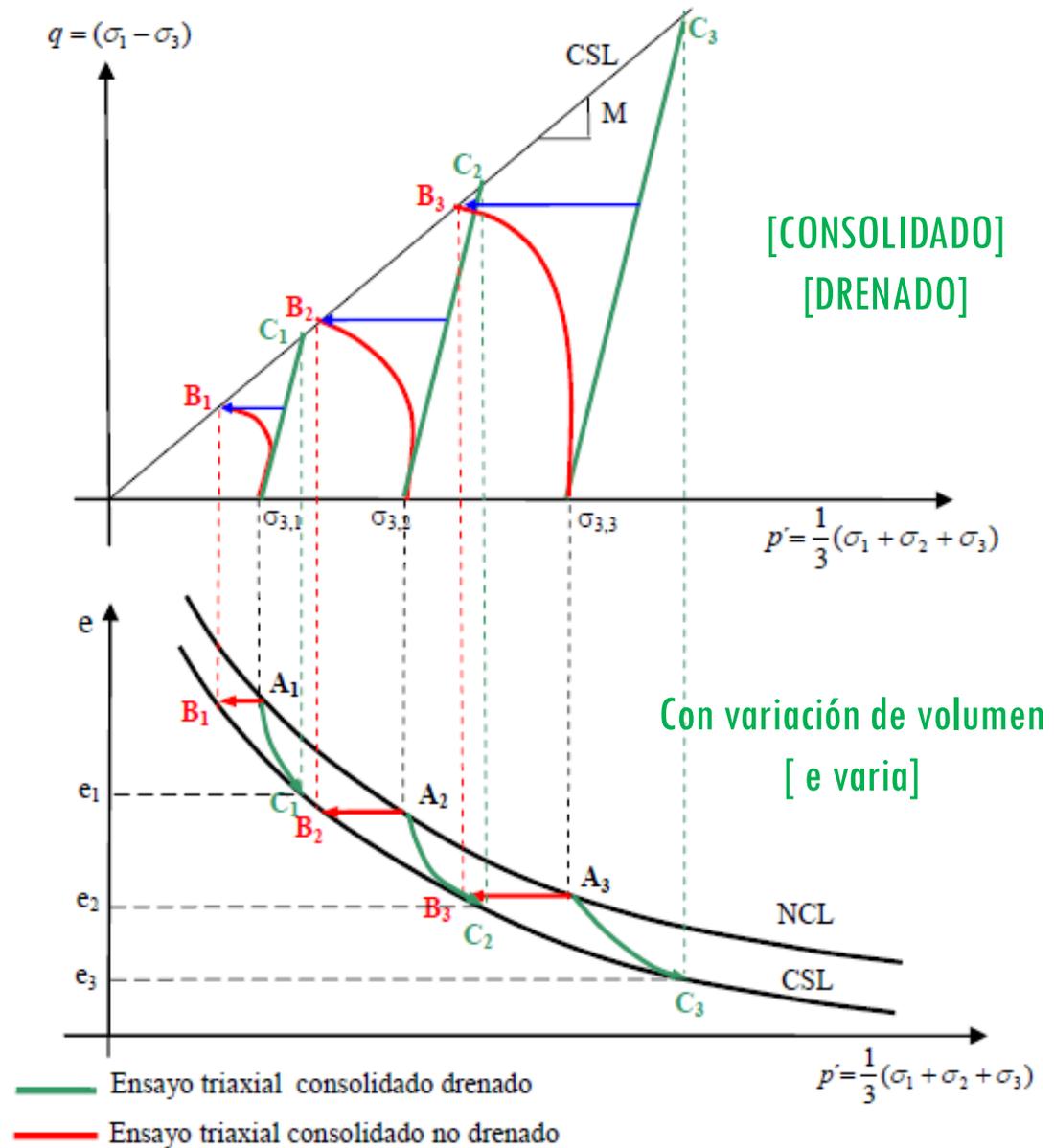
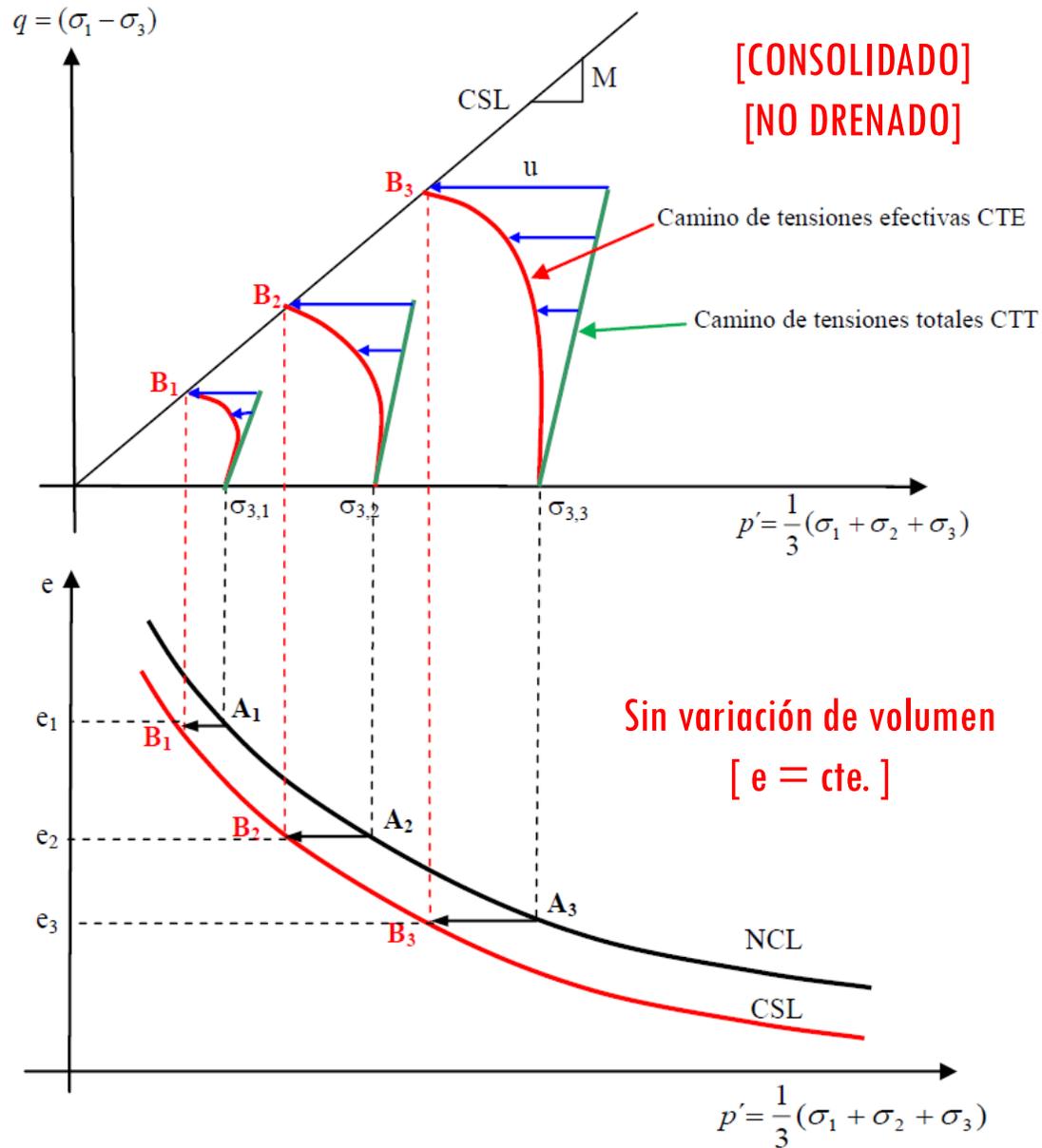
- **Tensión media efectiva:**

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$$

- **Tensión de desvío :**

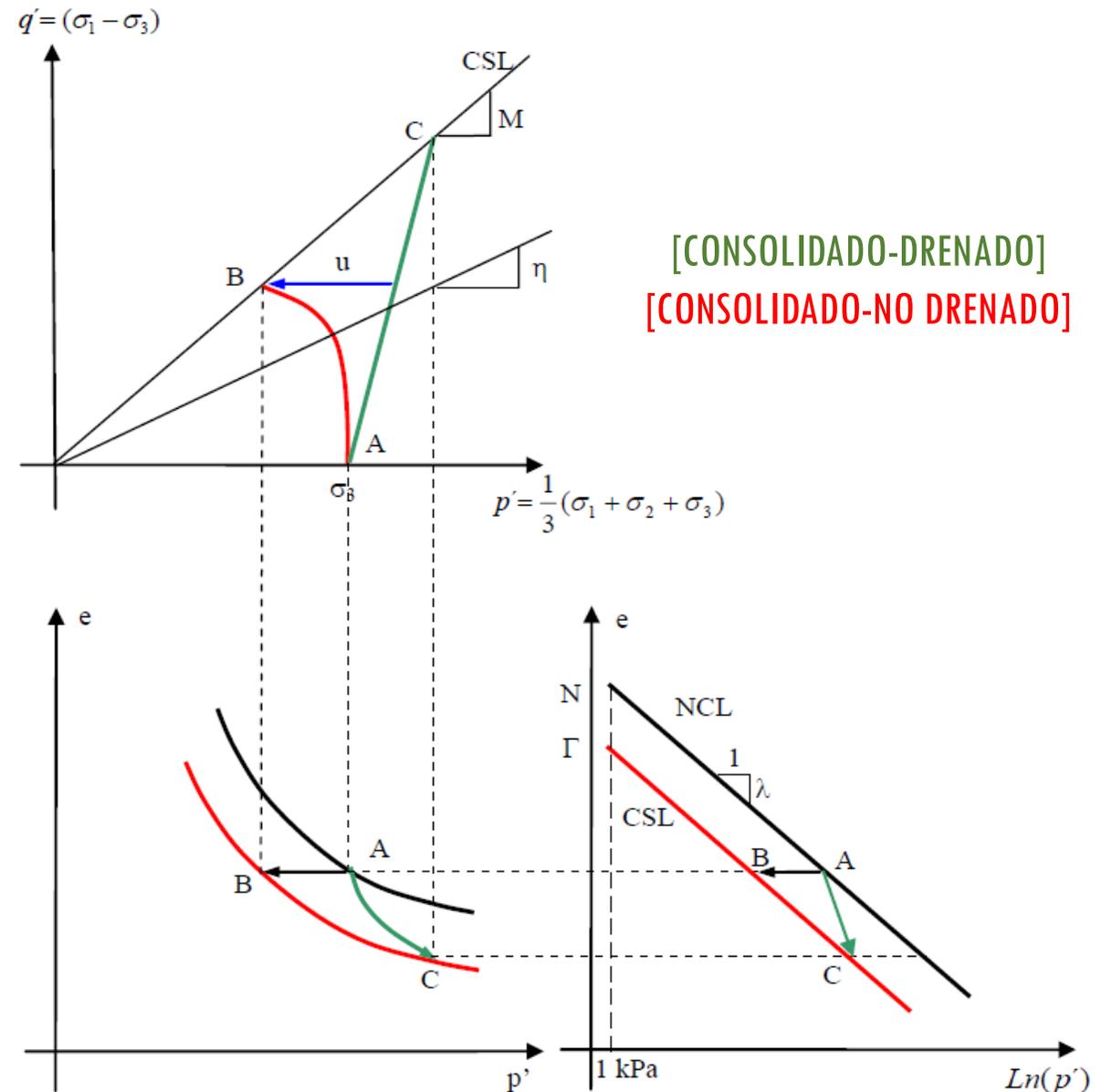
$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$$





LINEA DE ESTADO CRÍTICO (LEC) CRITICAL STATE LINE (CSL)

- En el **plano p-q** se asemeja a la línea envolvente de Mohr-Coulomb.
- En el **plano e-p'** o **e-lnp'** es paralela a la línea de consolidación virgen o noval (NCL) correspondiente a los estados normalmente consolidados.



NORMAL CONSOLIDATION LINE (NCL) CRITICAL STATE LINE (CSL)

- La **consolidación isotrópica** y la **consolidación unidimensional** (vertical) son procesos semejantes.
- A partir del ensayo de consolidación vertical obtenemos los parámetros C_c y C_s .



Pendiente del Tramo virgen o noval:

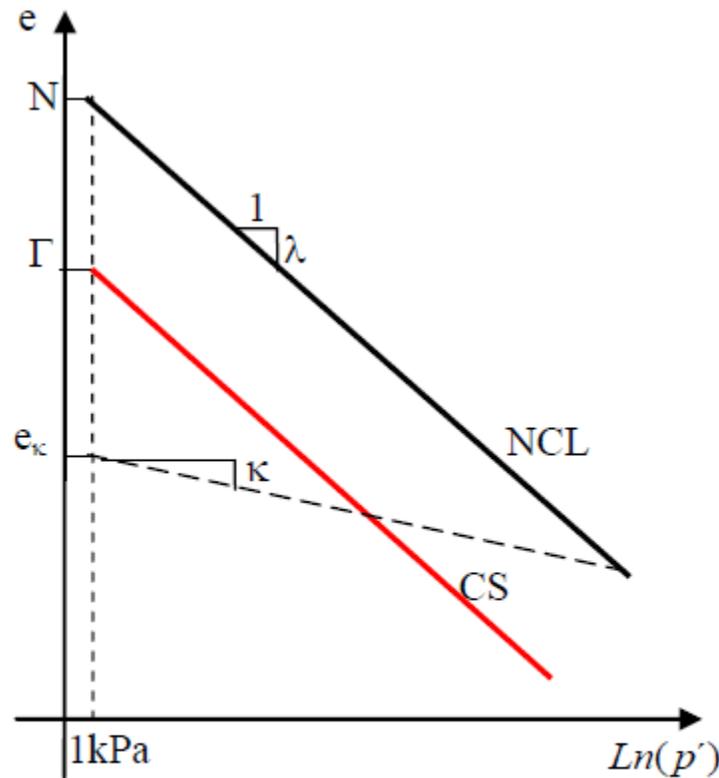
Índice de Compresión (C_c)

$$C_c = \frac{e_{inicial} - e_{final}}{\log\left(\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{inicial}}\right)}$$

Pendiente del Tramo descarga:

Índice de Hinchamiento (C_s)

$$C_s = \frac{e_{final} - e_{inicial}}{\log\left(\frac{\sigma'_{inicial}}{\sigma'_{final}}\right)}$$



N = Valor de la relación de vacíos e inicial correspondiente a a NCL para una presión $p' = 1 \text{ kN/m}^2$

Γ = Valor de la relación de vacíos e correspondiente a la CSL para una presión $p' = 1 \text{ kN/m}^2$

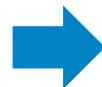
v_κ = Valor de la relación de vacíos e para una presión $p' = 1 \text{ kN/m}^2$ luego de la descarga.

λ = Pendiente de ambas curvas

κ = Pendiente de la curva de recuperación o de descompresión de la línea NCL

— Línea de consolidación isotrópica o de consolidación normal (NCL)

— Línea de estado crítico (CSL)



A partir de C_c y C_s obtenemos los parámetros de consolidación isotrópica.

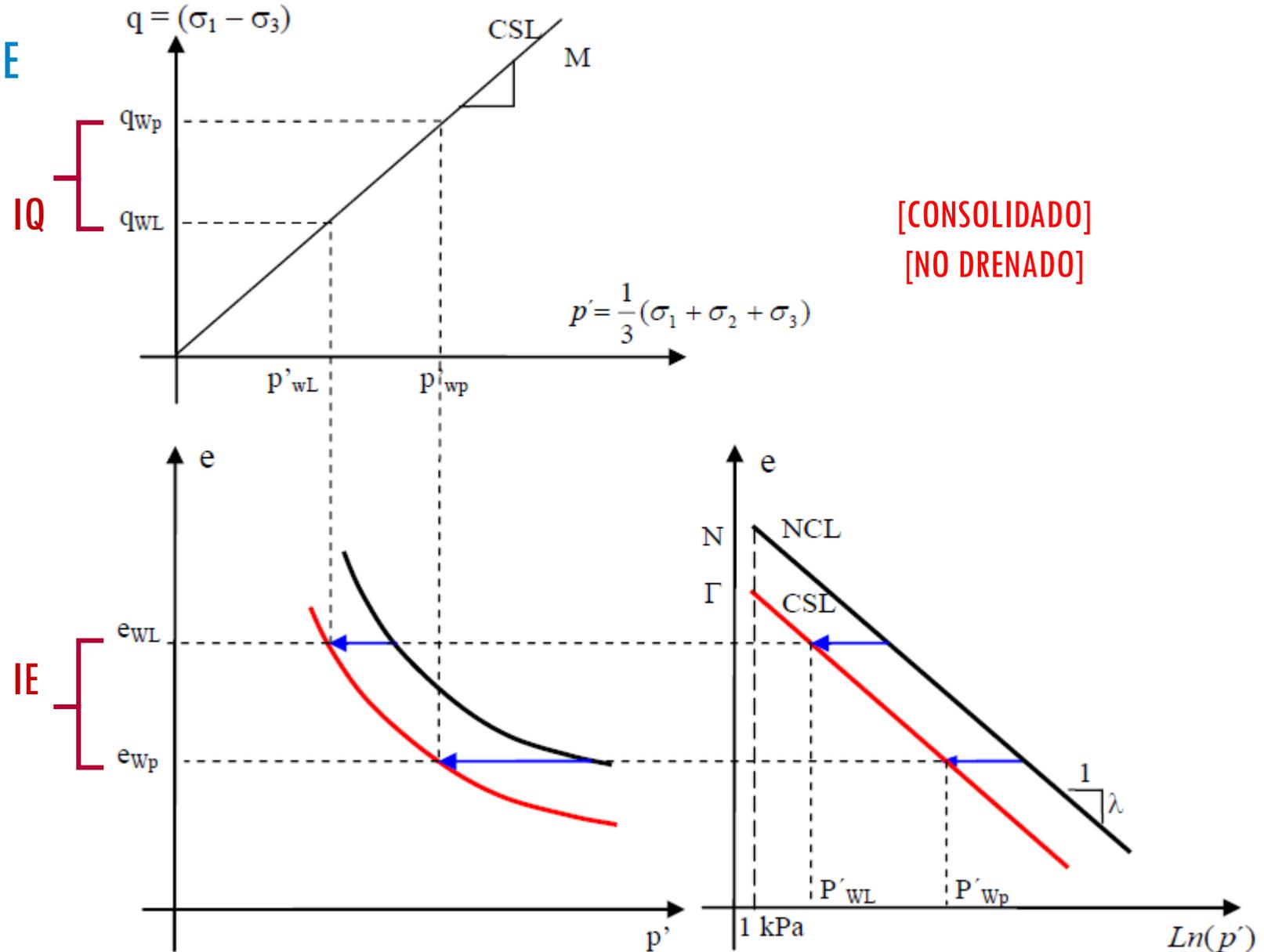
$$\lambda = \frac{C_c}{2,3}$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2,3}$$

ESTADO CRÍTICO y PROPIEDADES ÍNDICE

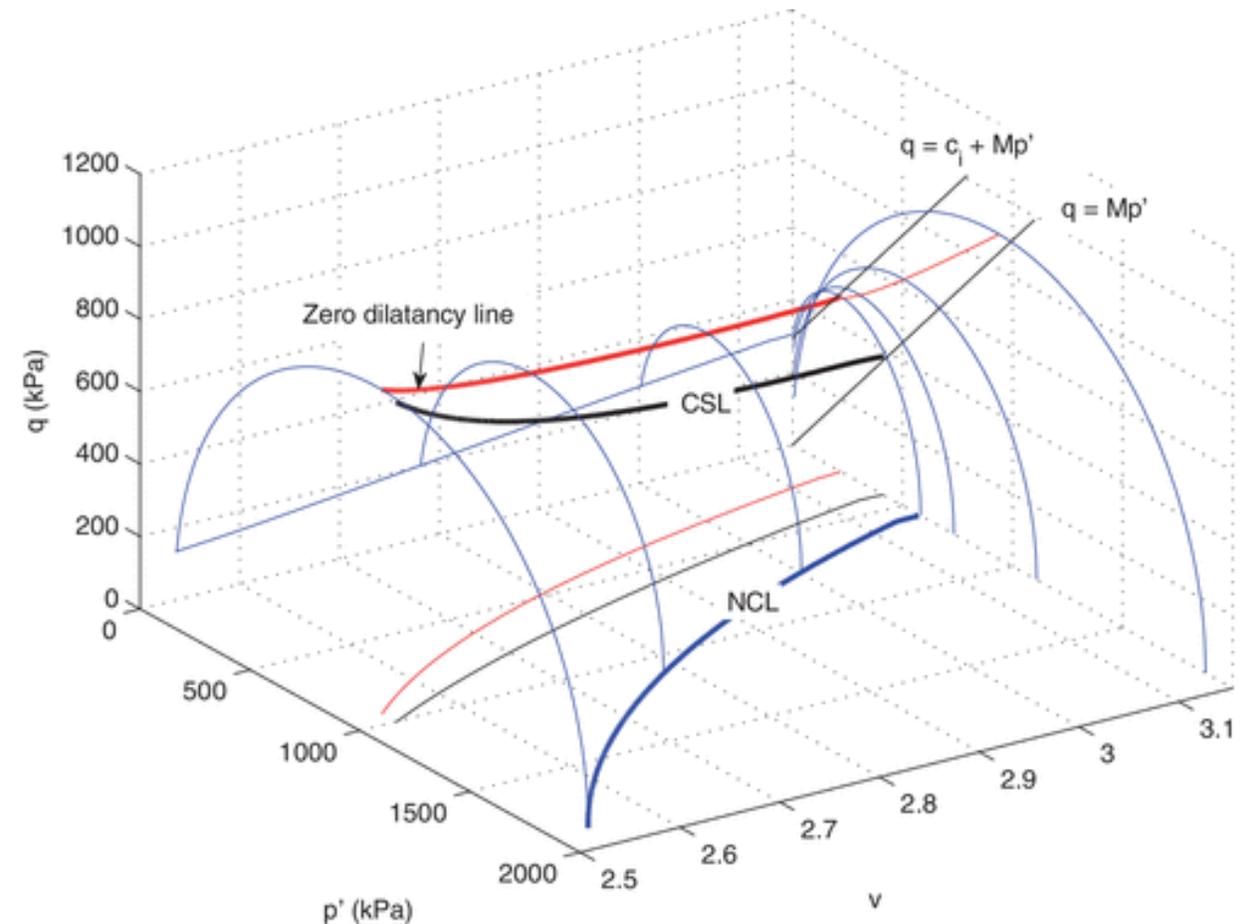
- Los estados **límite líquido** y **plástico** tienen sus respectivas relación de vacíos y resistencia al corte.
- El valor del **índice de plasticidad IP** es un indicador de la diferencia de resistencia al corte entre un estado y otro.

$$IP = \begin{cases} IE \\ IQ \end{cases}$$



SUPERFICIE DE ESTADO LÍMITE 3D

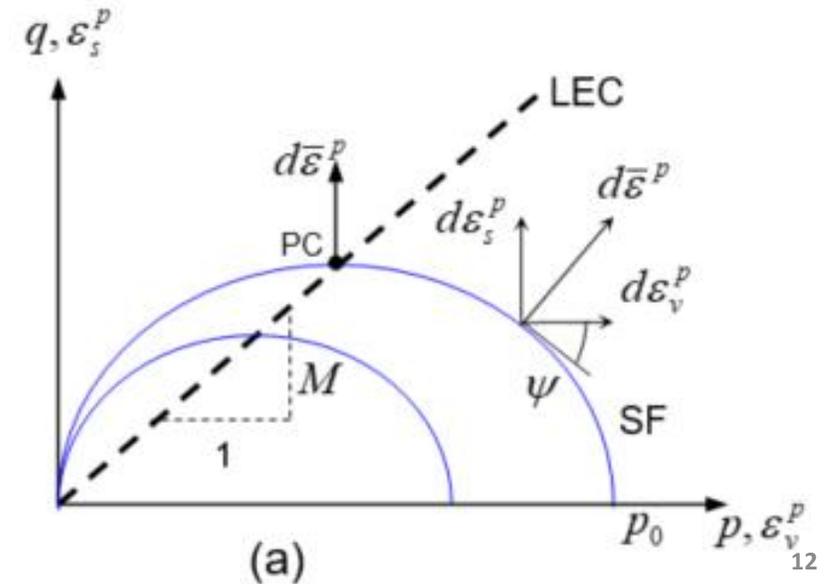
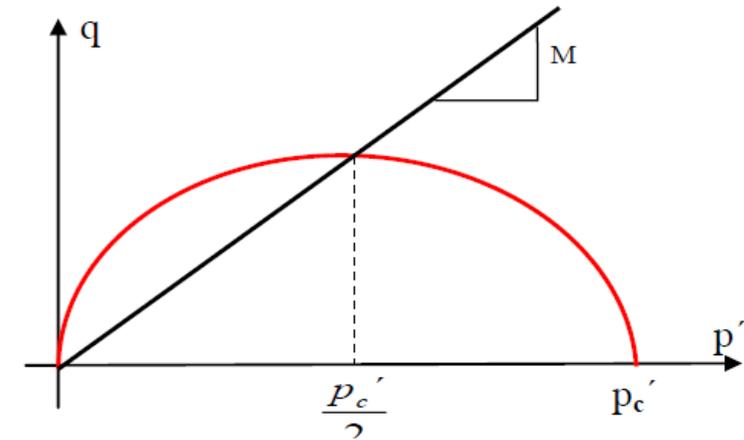
- En el espacio definido por las 3 variables de estado (v , p , q), se define una **Superficie de estado límite** tridimensional *de Roscoe*.
- Cuando un estado (v , p , q) llega a tocar esta superficie, la masa de suelo entra en fluencia y plastifica.
- Para combinaciones de (v , p , q) por debajo de la superficie, el suelo se comporta de forma elástica.
- En esa superficie de Roscoe se inscribe la **Línea de Estado Crítico (CSL o LEC)**.
- Para suelos dilatantes se suele modificar un sector de la superficies, incluyendo la **superficie de Hvorslev**.
- La **línea de no dilatación** pasa por la “divisoria de aguas” de la superficie de Roscoe.



CAM CLAY MODIFICADO (ROSCOE & BURLAND, 1968)

- Propone una **envolvente de ruptura**:
 - fija en el plano p-q, a través de la proyección de la línea de estado crítico (LEC o CSL)
 - como recta de inclinación "M" pasando por el origen.
- Propone, adicionalmente, una **superficie de fluencia SF**:
 - cerrada en forma de **elipse** expansible con la carga,
 - controlada por el valor de la tensión media "p₀" que actúa como parámetro de endurecimiento.
- Los vectores de **flujo plástico** son perpendiculares a la SF.
- La intersección entre SF y LEC es el **punto crítico PC**.
 - El flujo plástico en ese punto es a volumen constante (vector vertical).

$$M^2 p^2 - M^2 p_0 p + q^2 = 0$$

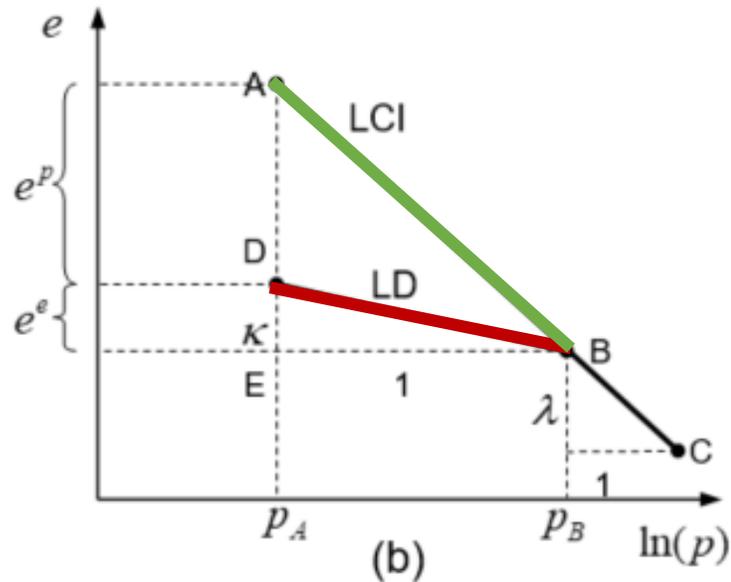


$$M = \frac{6 \cdot \text{sen}(\phi')}{3 - \text{sen}(\phi')}$$

$$M = \frac{\phi'}{23} - 0,1$$

CAM CLAY MODIFICADO (ROSCOE & BURLAND, 1968)

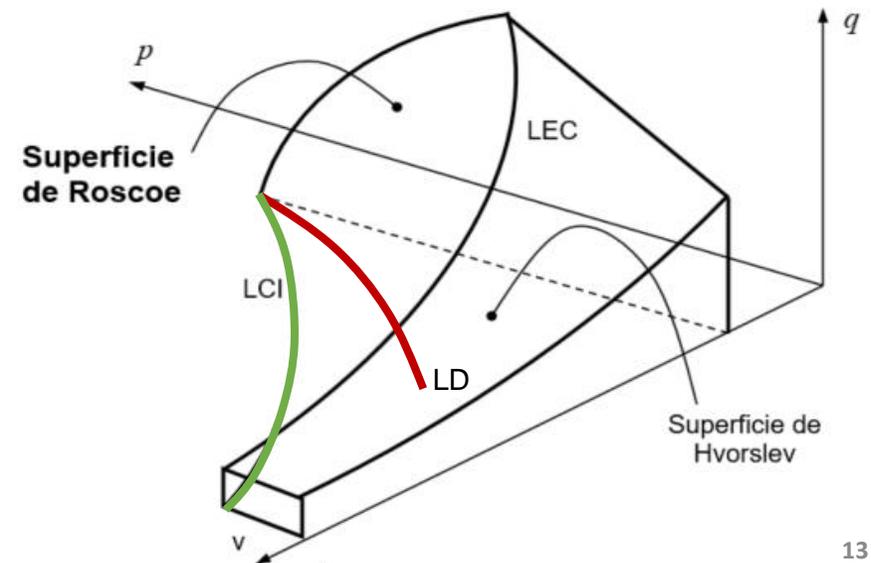
- Propone una **línea de consolidación isotrópica** curva en el plano e-p (recta en el plano e - ln p).
 - Controla el tamaño de la **superficie de fluencia SF** elíptica, pues la tensión media “p₀” (parámetro de endurecimiento) se sitúa siempre sobre la LCI.
- Asimismo se una **línea de descarga-recarga LD** isotrópica curva en el plano e-p (recta en el plano e - ln p).
 - Controla la recuperación elástica del material y describe las trayectorias preconsolidadas que se dan dentro de la SF.



$$e + \lambda(\ln p) = e_1$$

$$\lambda = \frac{Cc}{2,3} \quad \kappa = \frac{Cs}{2,3}$$

$$p' = \frac{q}{3} + (\sigma_3 - u)$$



CAM CLAY MODIFICADO (ROSCOE & BURLAND, 1968)

• Deformaciones

- volumétricas y de desvío
- plásticas y totales

$$\eta = q/p$$

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right)$$

$$d\varepsilon_v^e = -\frac{de^e}{1 + e_0} = \frac{\kappa}{1 + e_0} \frac{dp}{p}$$

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1 + e_0} \left[\frac{dp}{p} + \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda} \right) \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right]$$

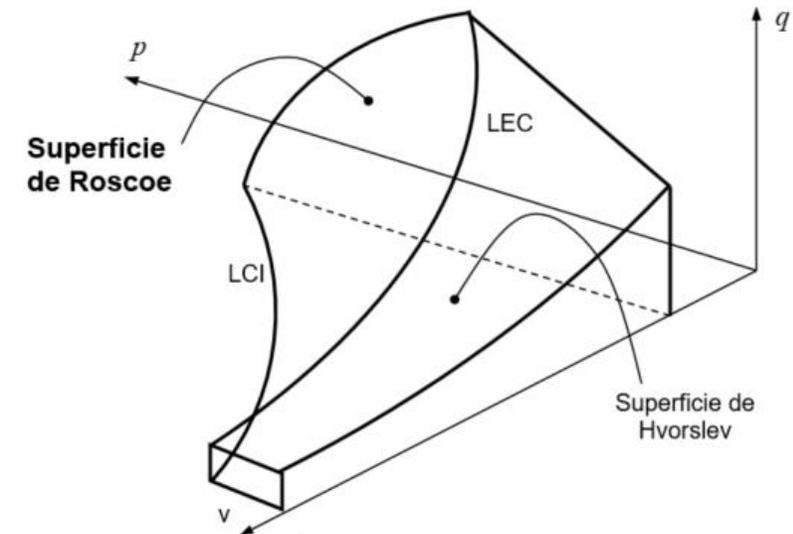
$$d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2}$$

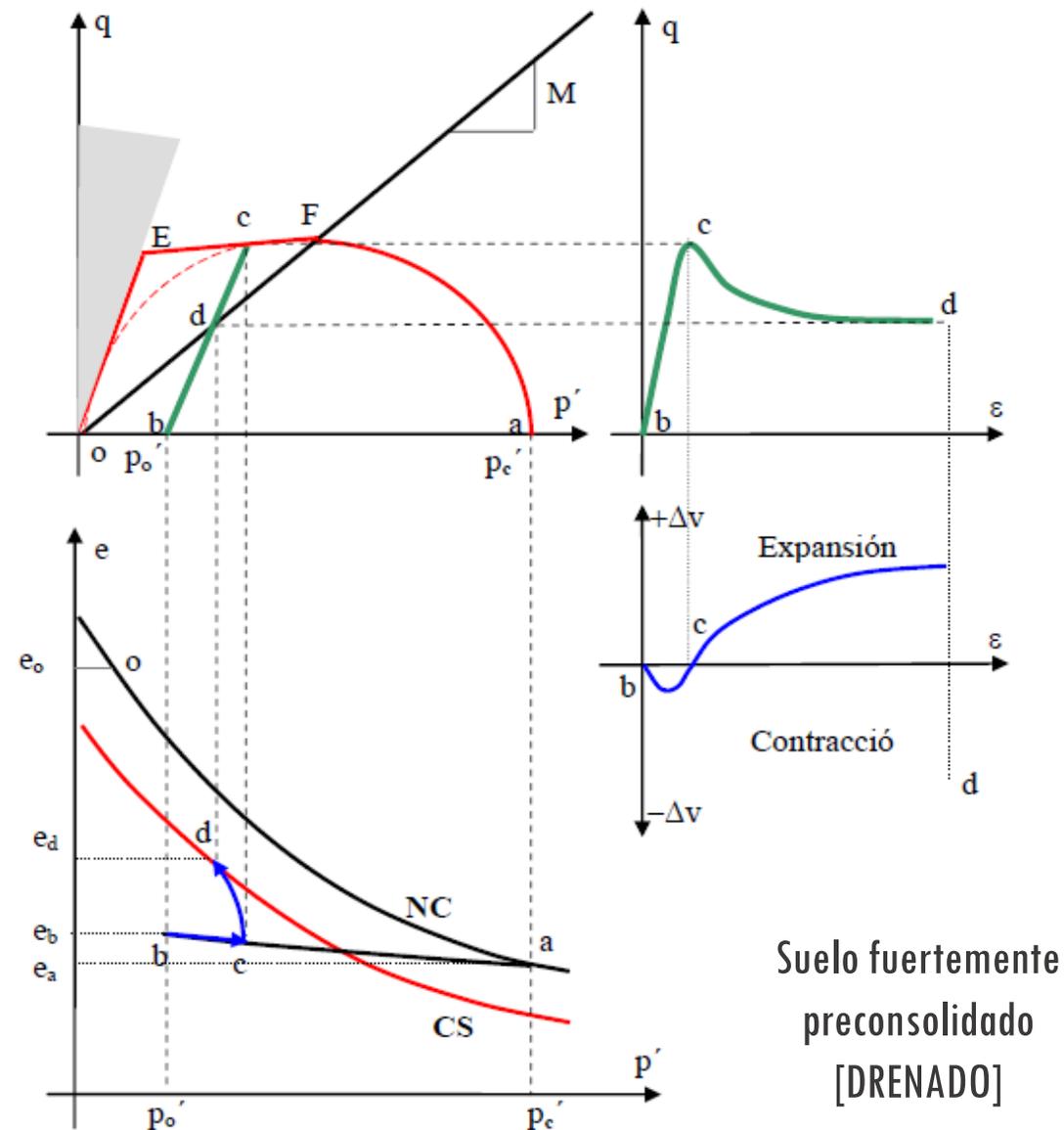
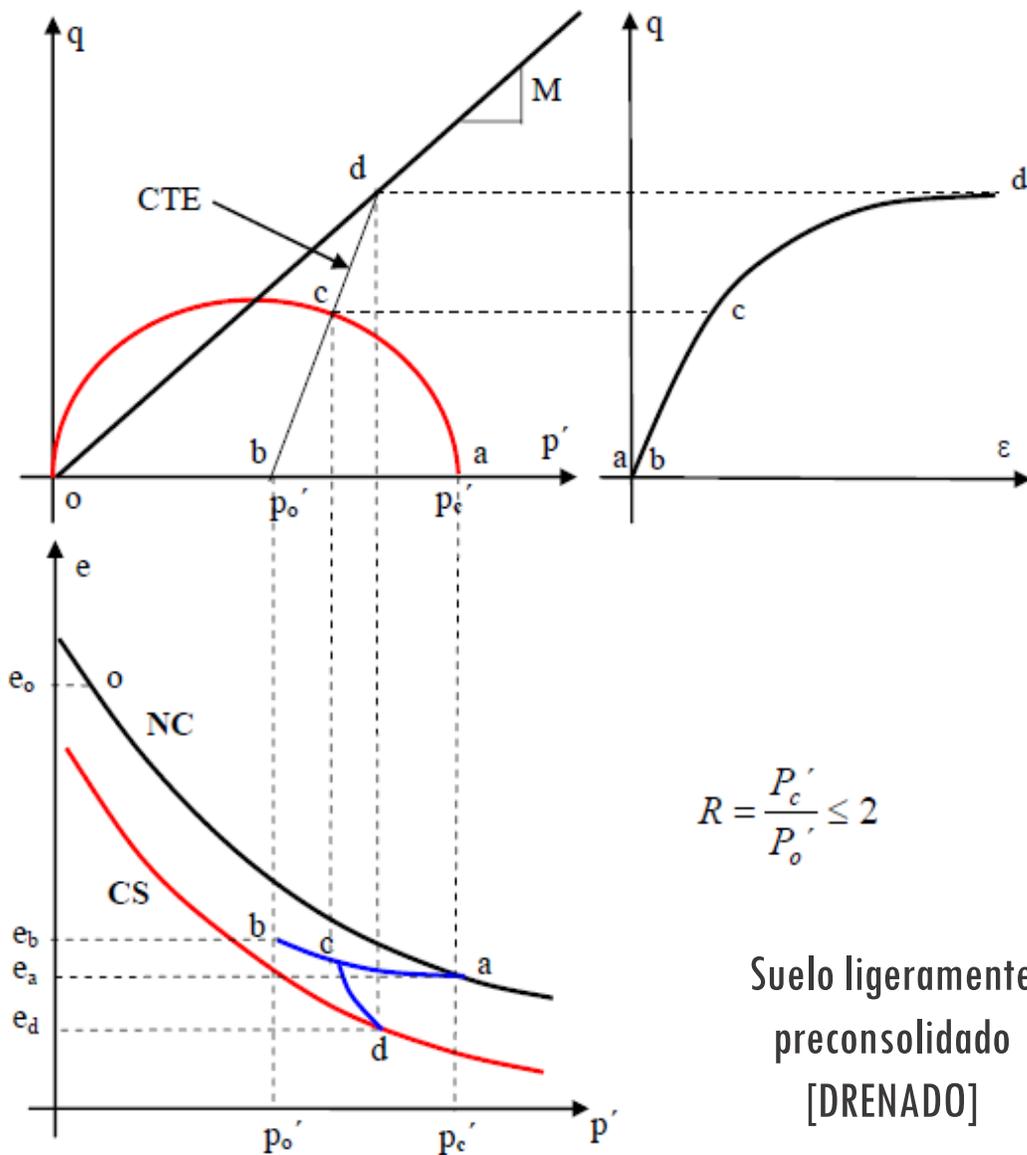
- Endurecimiento y ablandamiento plásticos: $\frac{dp_0}{p_0} = d\varepsilon_v^p \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa}$

- Módulo volumétrico para trayectorias elásticas: $K = \frac{dp}{d\varepsilon_v^e} = \frac{1 + e_0}{\kappa} p_0$

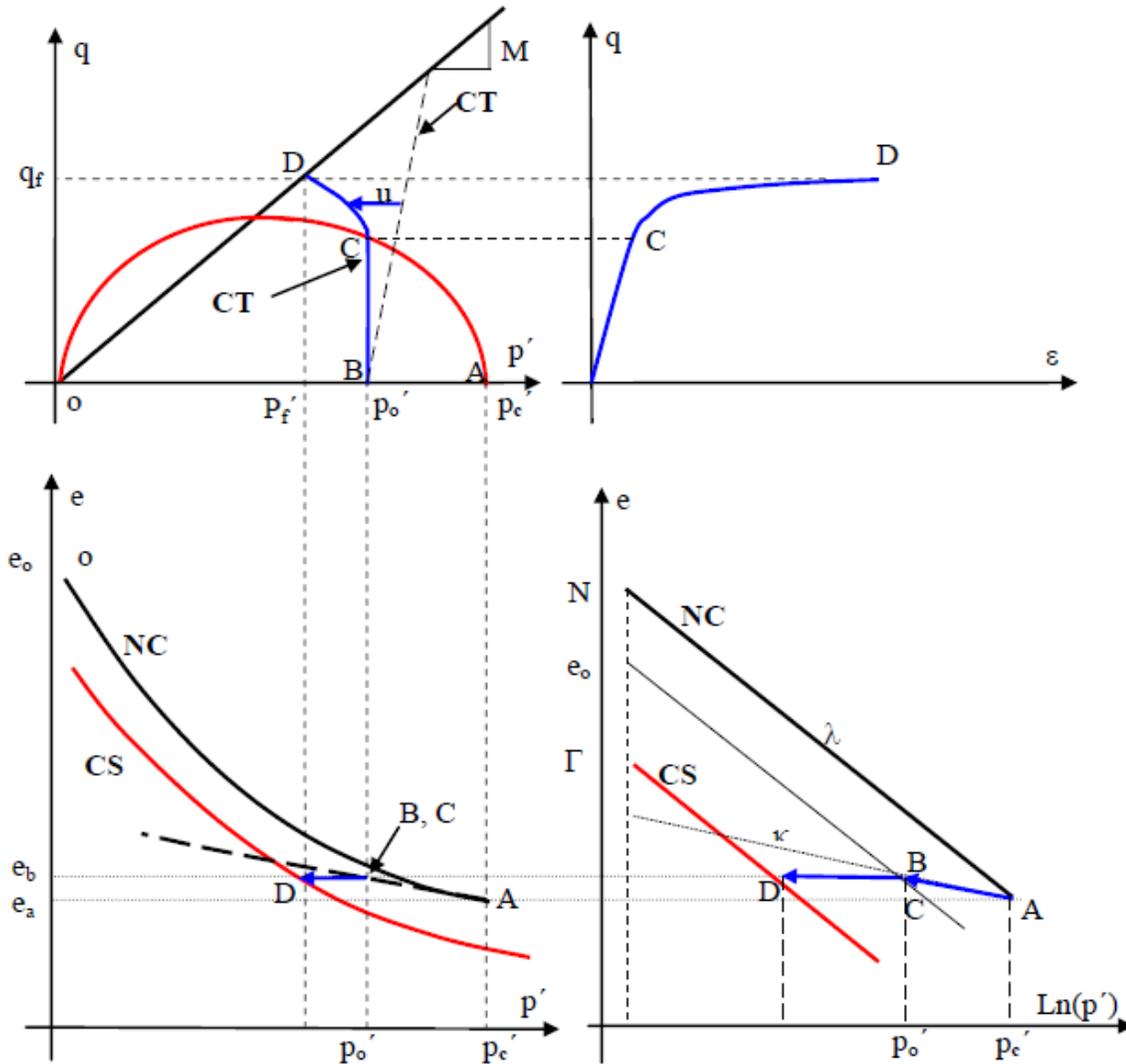
• Parámetros del modelo:

- e_0 (relación de vacíos inicial)
- λ (pendiente de la LCI)
- κ (pendiente para descarga y recarga)
- M (pendiente de la LEC en el plano p-q)
- p_c (presión de pre-consolidación)

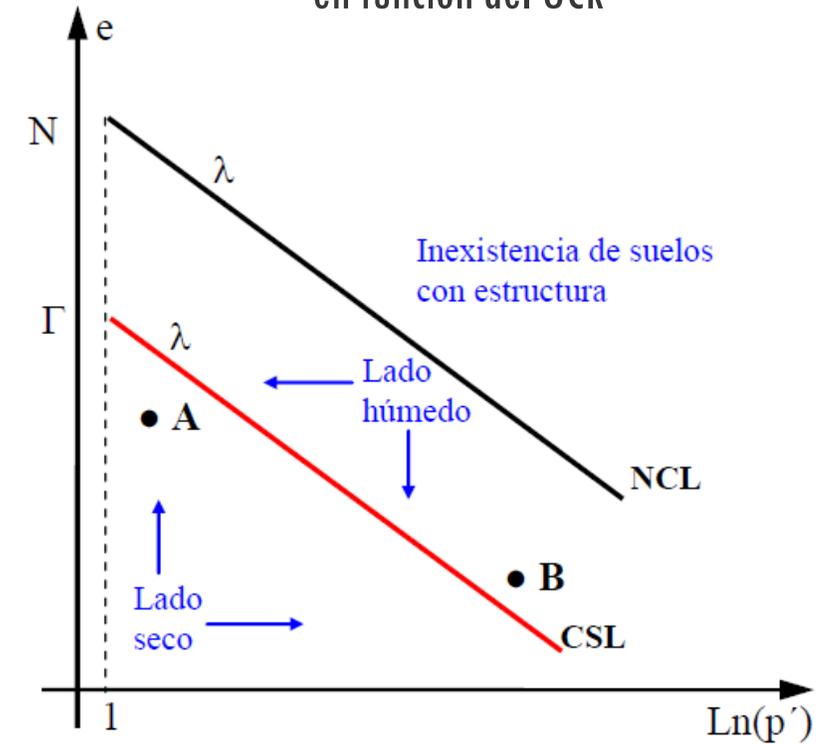




Suelo ligeramente preconsolidado
[CONSOLIDADO - NO DRENADO]



Regiones posibles de estado del suelo
en función del OCR



Línea de consolidación noval (NCL o LCN)

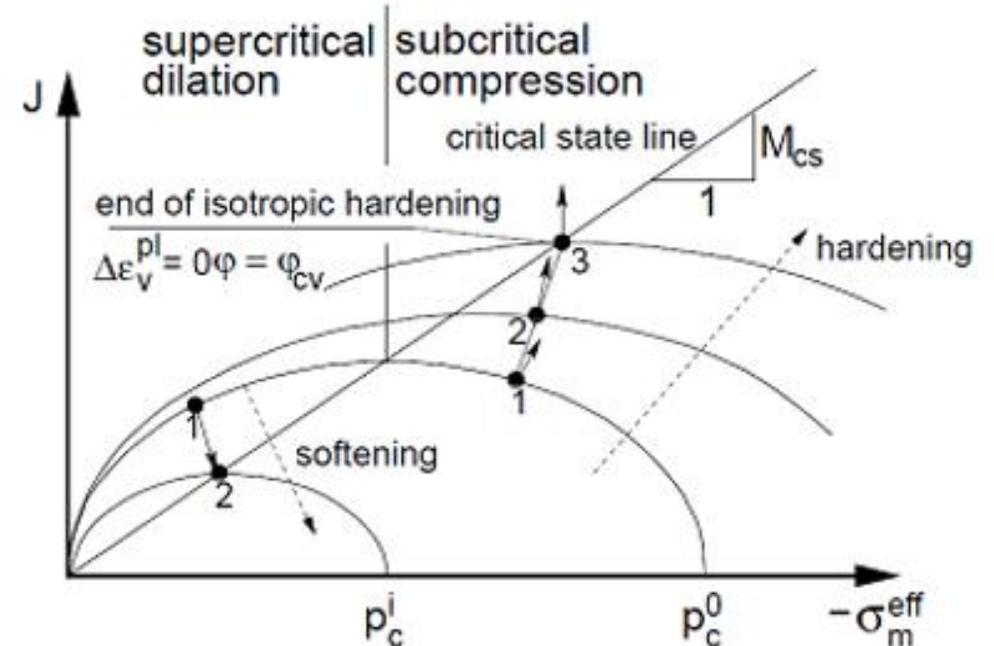
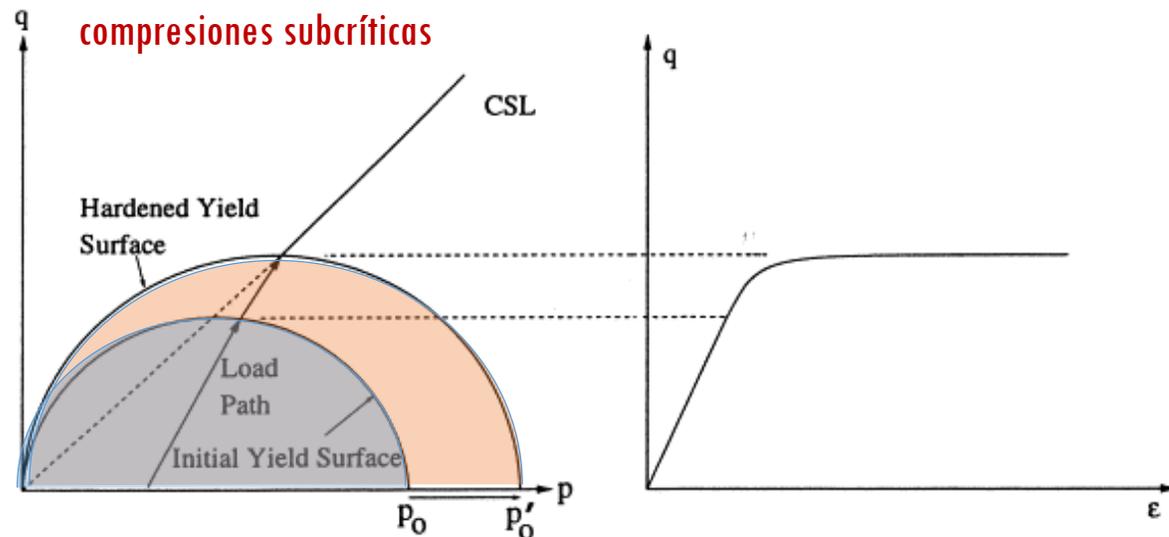
$$e = N - \lambda \ln(p')$$

Línea de estado crítico (LEC o CSL)

$$e = \Gamma - \lambda \ln(p')$$

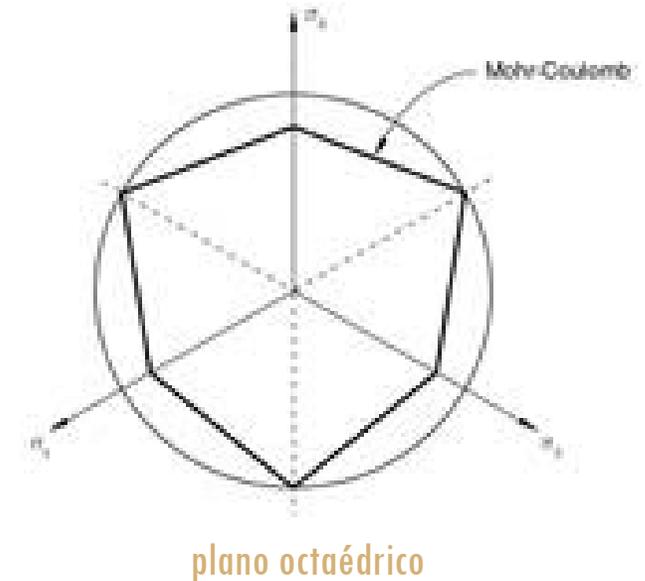
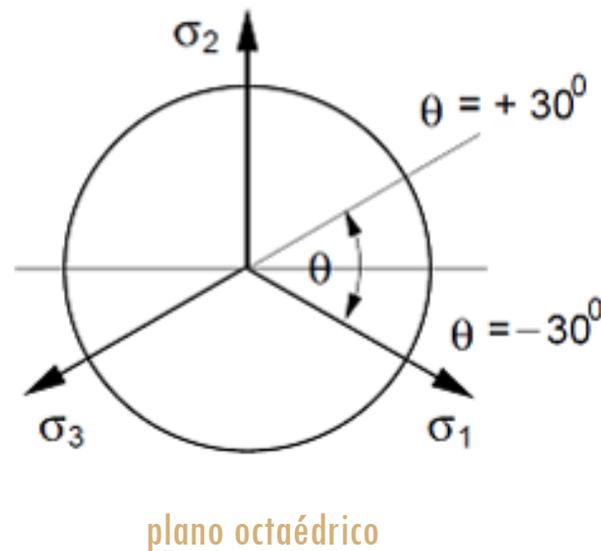
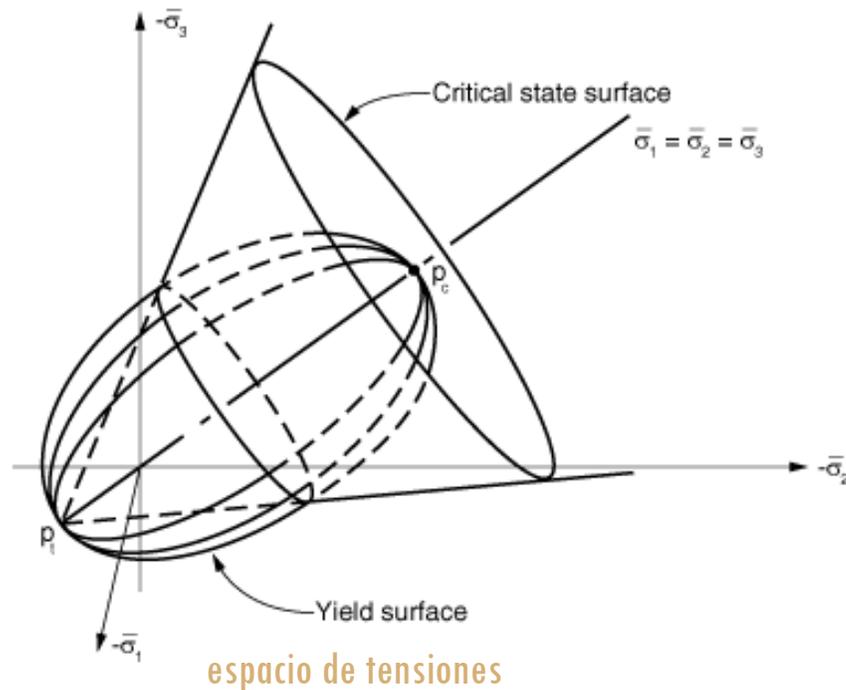
ENDURECIMIENTO Y ABLANDAMIENTO PLÁSTICOS

- La elipse marca el endurecimiento del suelo mediante su expansión para trayectorias de carga con aumento de la variable p .
 - Corresponde al caso de compresiones subcríticas.
- El ablandamiento sucede para trayectorias fuertemente preconsolidadas.
 - Corresponde al caso de compresiones supercríticas.



CAM CLAY EN EL ESPACIO DE TENSIONES

- La **Superficie de Estado Crítico** se representa como un Cono con eje en la diagonal principal un en el espacio de tensiones. Asimismo se representa como un círculo en el plano octaédrico.
- La tensión octaédrica de rotura es independiente de la trayectoria de tensión, lo que es una limitación para la mayoría de los suelos (comparar con Mohr - Coulomb).



TEORIA DE ESTADO CRÍTICO - RESUMEN

- La Teoría de Estado Crítico se desarrolló integralmente a partir de la experiencia de laboratorio acumulada sobre el comportamiento de suelos en consolidación y corte triaxial.
- El Modelo Cam Clay Modificado:
 - Utiliza parámetros con sentido físico que conectan al modelo con el suelo.
 - Considera fenómenos relevantes en suelos como:
 - la dilatancia,
 - el endurecimiento plástico.
 - La elasticidad modela ciertas etapas del comportamiento del suelo.
 - El modelo elastoplástico incluye endurecimiento y ablandamiento plástico con una ley de endurecimiento — ablandamiento isotrópica.