



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

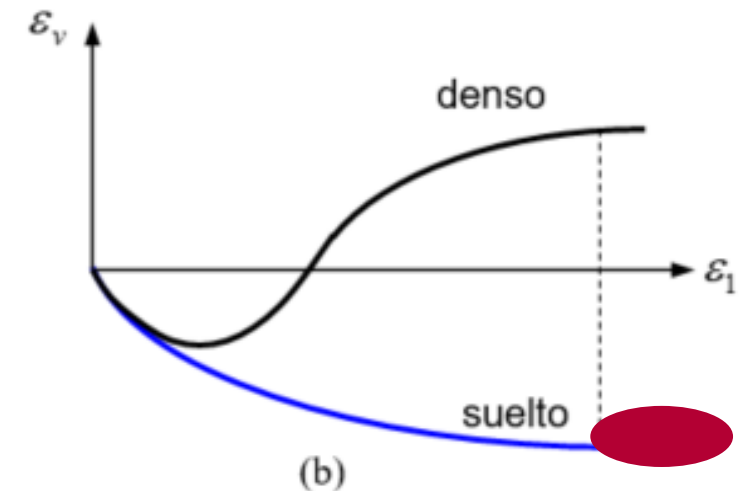
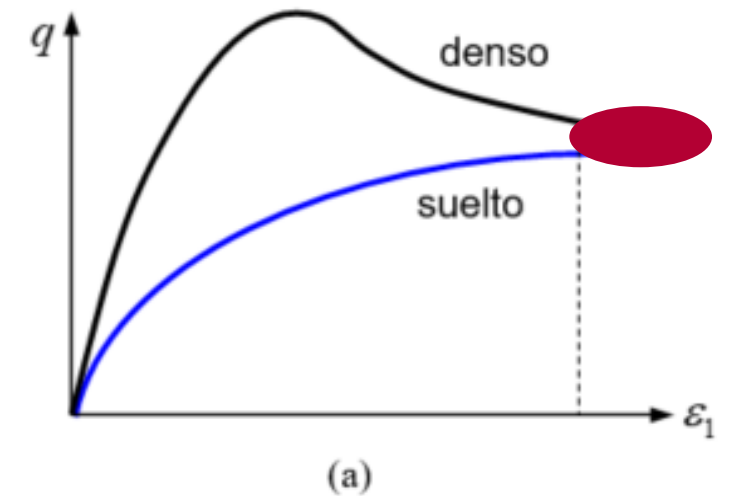
+54 261 5796326

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 (ej. **Mohr-Coulomb como modelo de Tresca extendido**).
- 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):

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



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:**

$$v = 1 + e$$

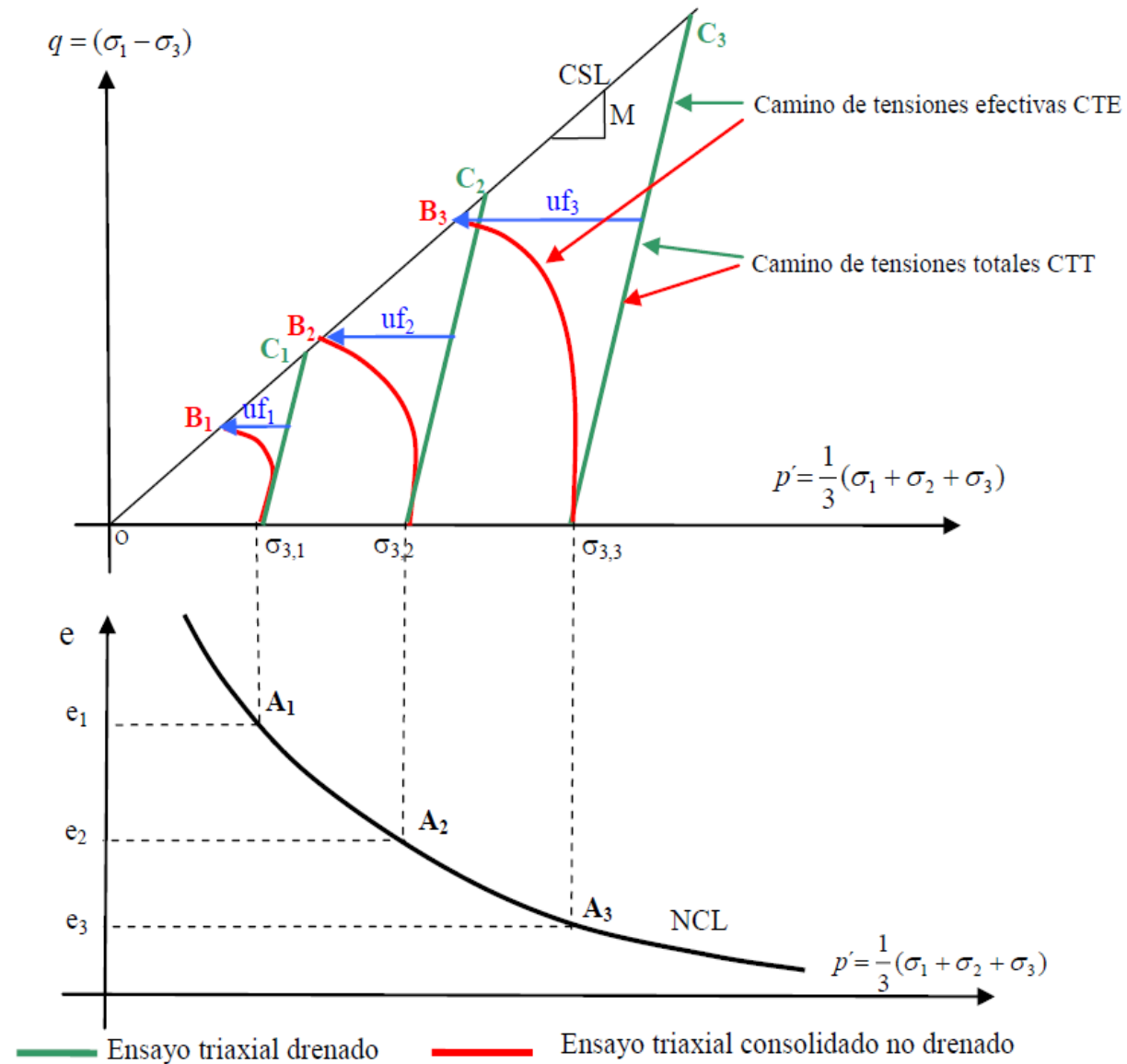
(siendo "e" la relación de vacíos)

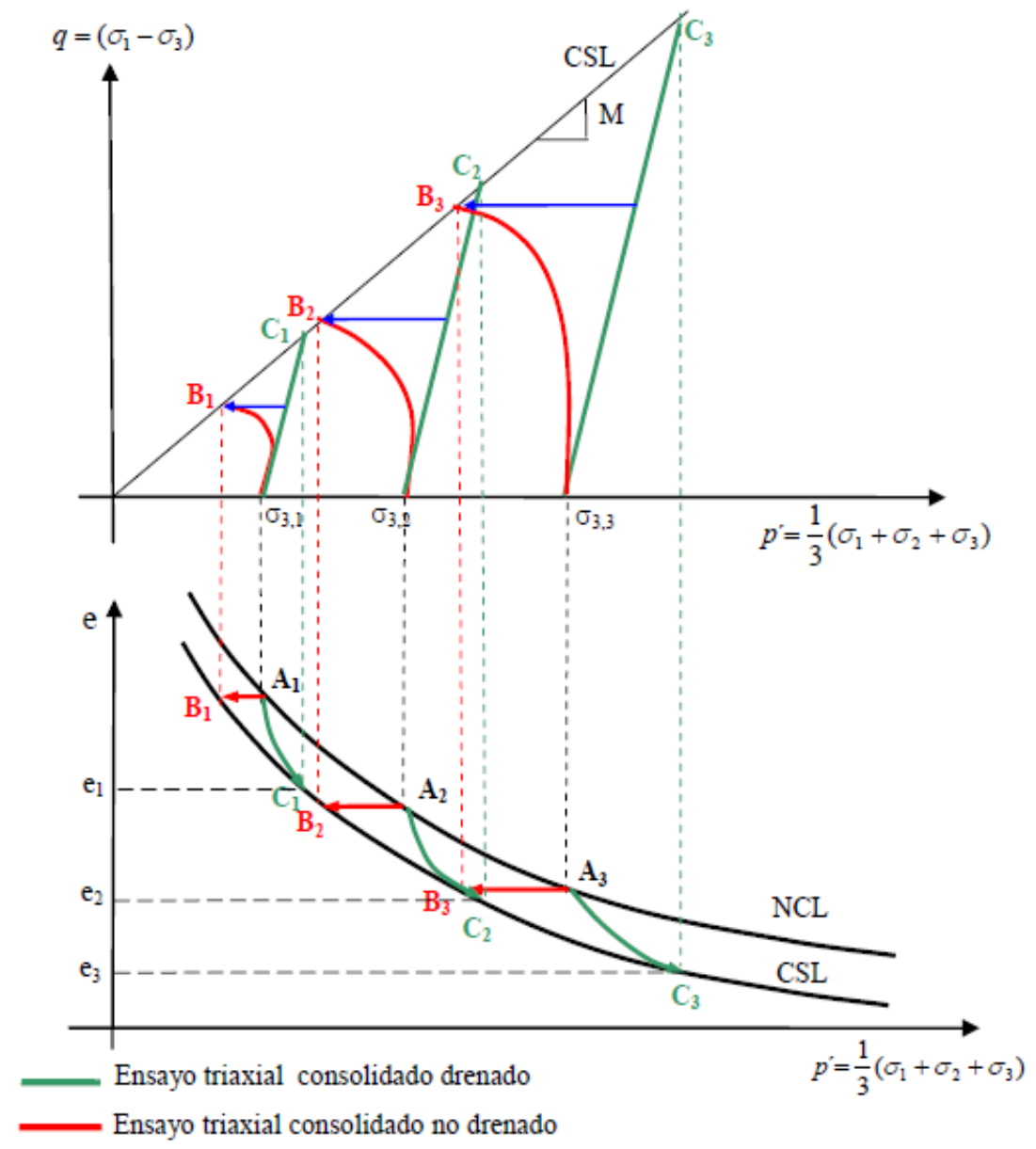
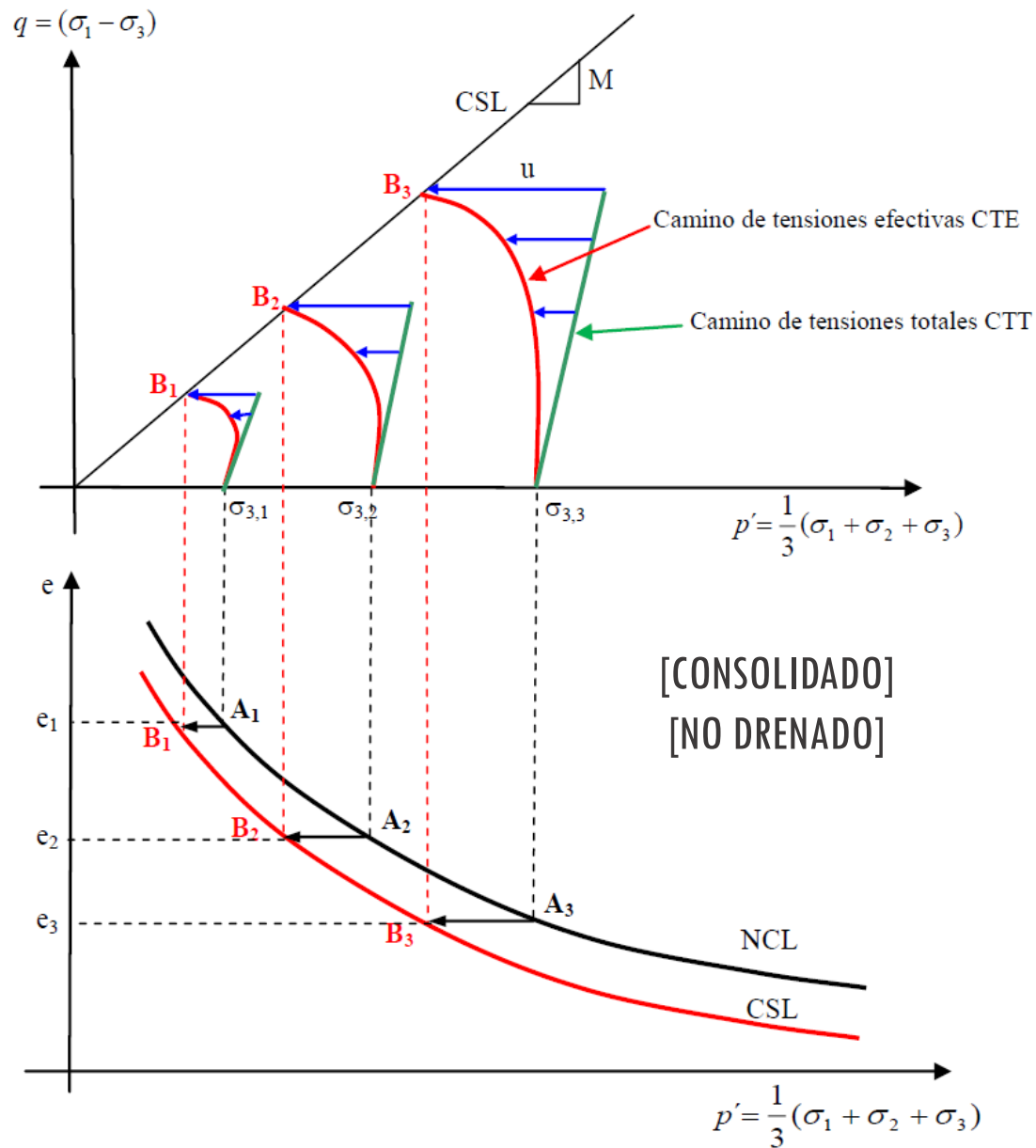
- **Tensión media efectiva:**

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

- **Tensión de desvío :**

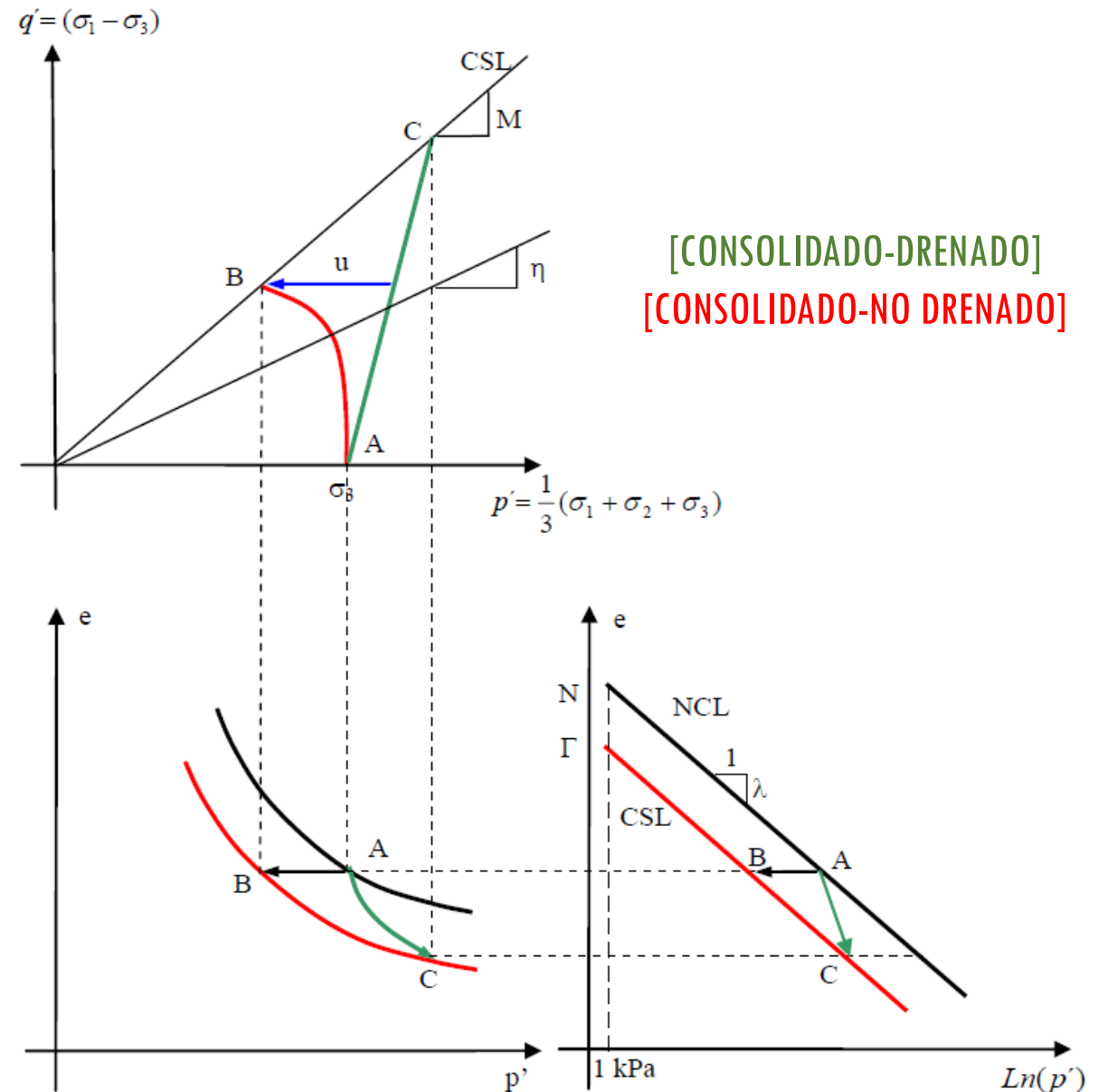
$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$$





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 - $\ln p'$ es paralela a la línea de consolidación virgen o noval (NCL) correspondiente a los estados normalmente consolidados.



ESTADO CRÍTICO (LEC) 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:

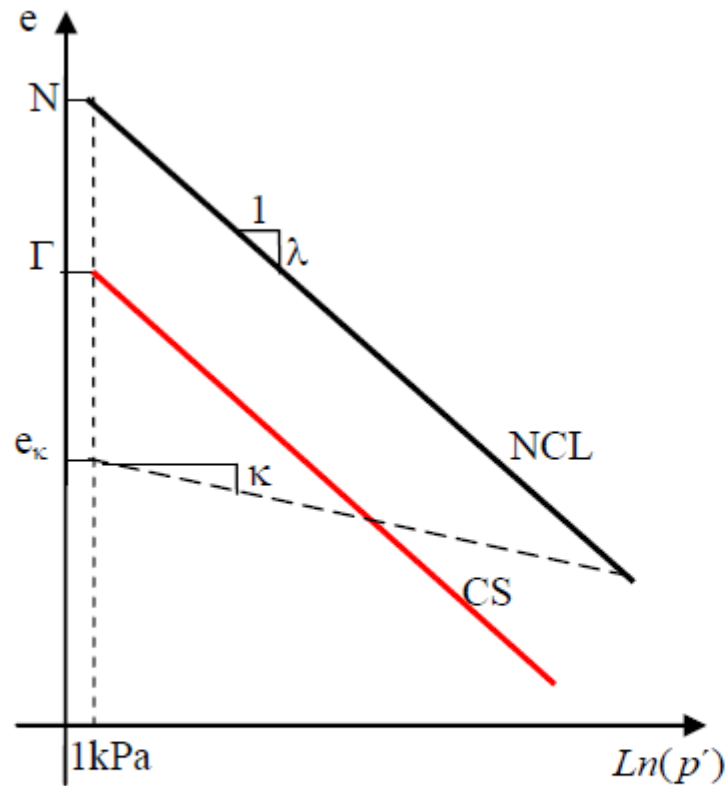
Índice de Compresión (C_c)

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

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)

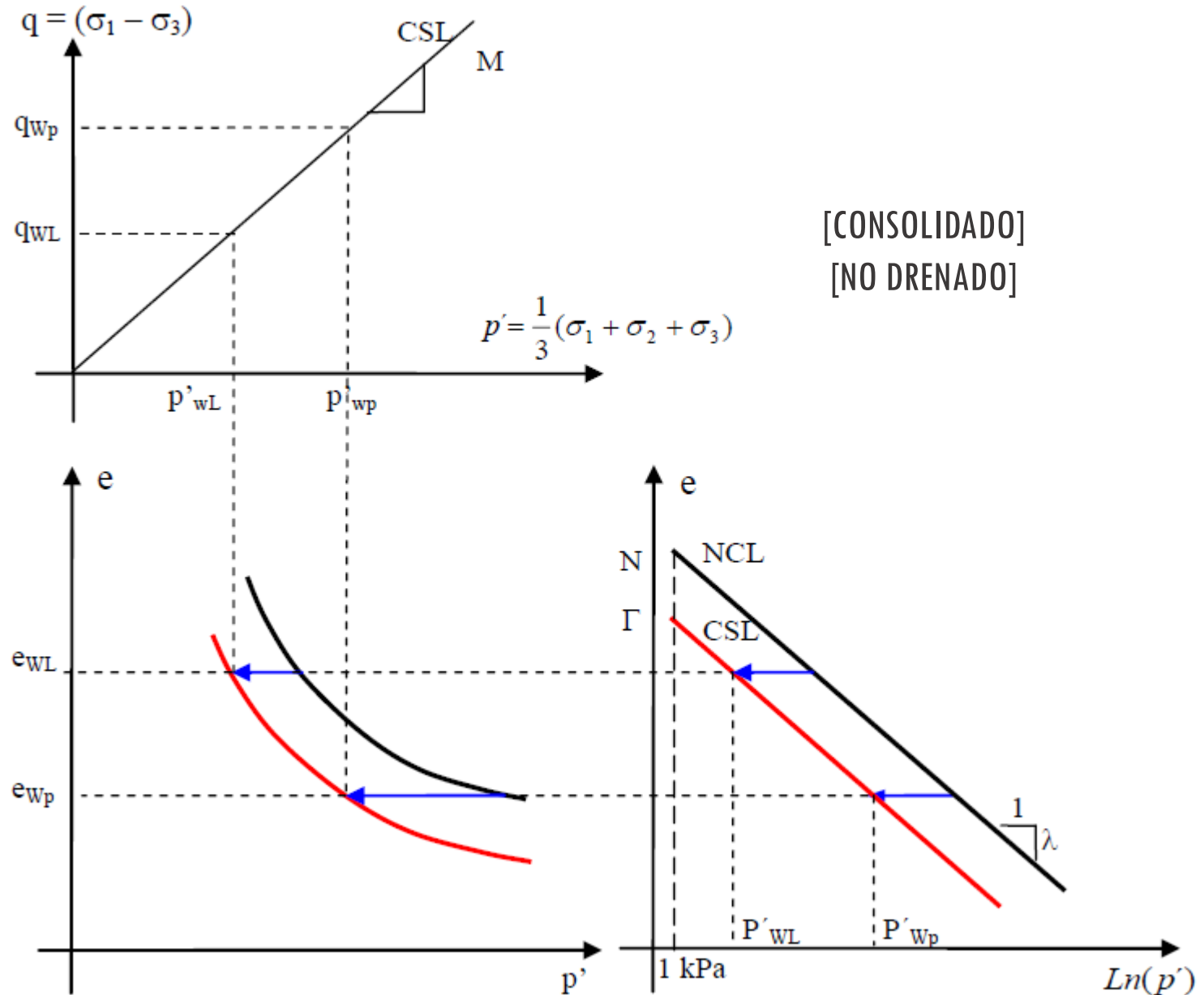
A partir de C_c y C_s obtenemos los parámetros de consolidación isotrópica.

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

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

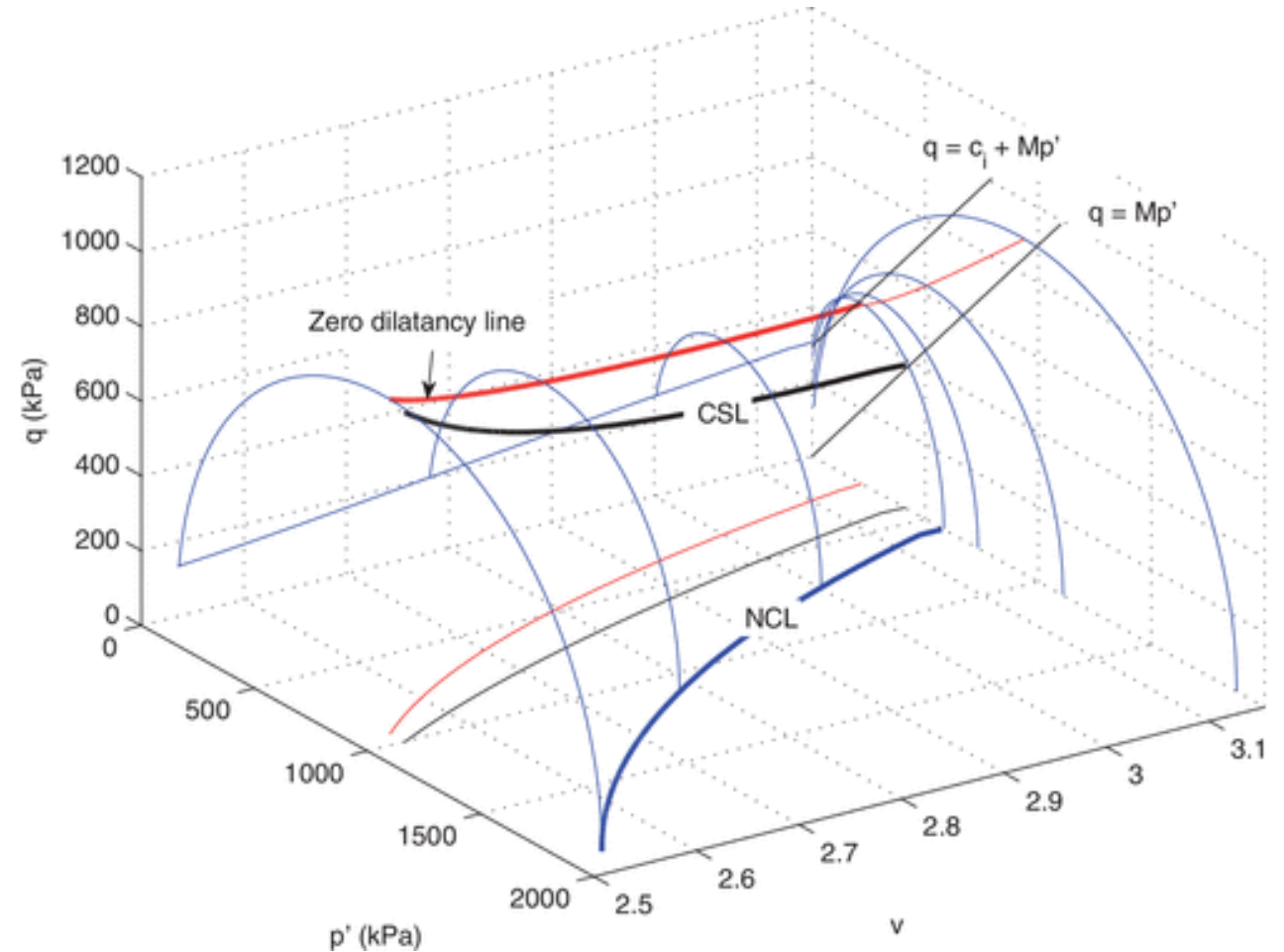
ESTADO CRÍTICO y PROPIEDAD ÍNDICE

- 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.



SUPERFICIE DE ESTADO LÍMITE 3D

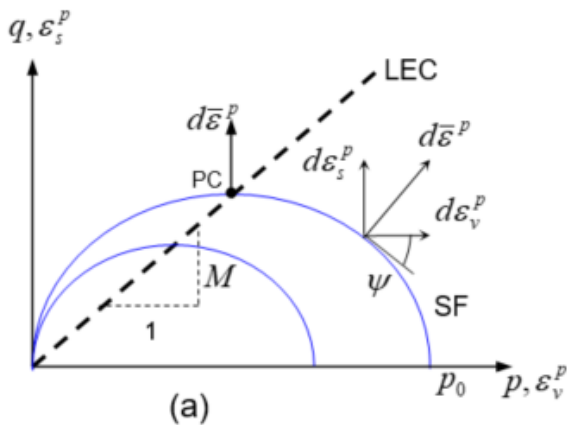
- En el espacio definido por las 3 variables de estado (v , p , q), se define una **Superficie de estado límite** tridimensional *de Roscoe*.
- Cuando un estado (v , p , q) llega a tocar esta superficie, la masa de suelo entra en fluencia y plastifica.
- Para combinaciones de (v , p , q) por debajo de 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**.



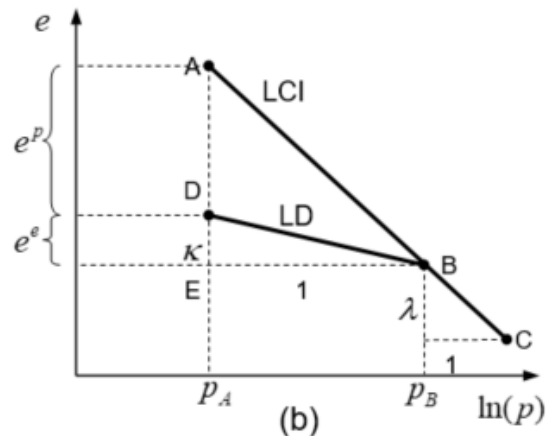
CAM CLAY MODIFICADO (ROSCOE & BURLAND, 1968)

- 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 y 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).

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



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

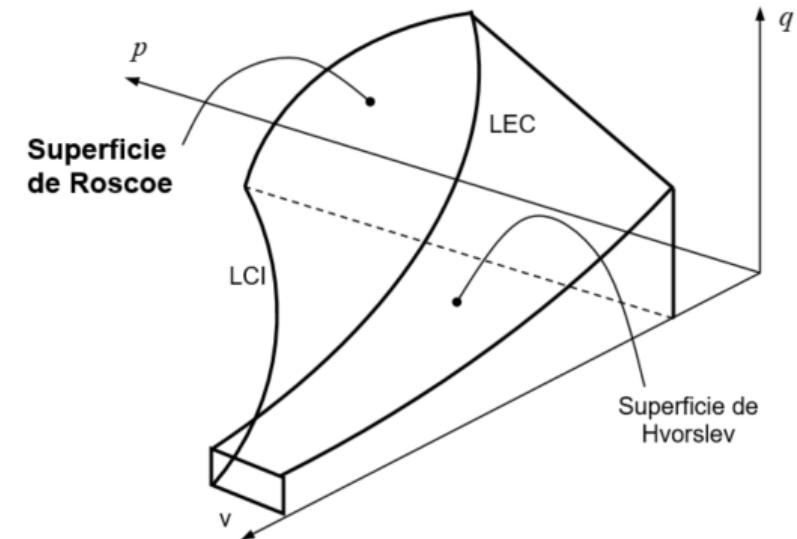


$$M = \frac{6 \cdot \text{sen}(\phi')}{3 - \text{sen}(\phi')}$$

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

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

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



CAM CLAY MODIFICADO (ROSCOE & BURLAND, 1968)

• Deformaciones

- volumétricas y de desvío
- plásticas y totales

$$\eta = q/p$$

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

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

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

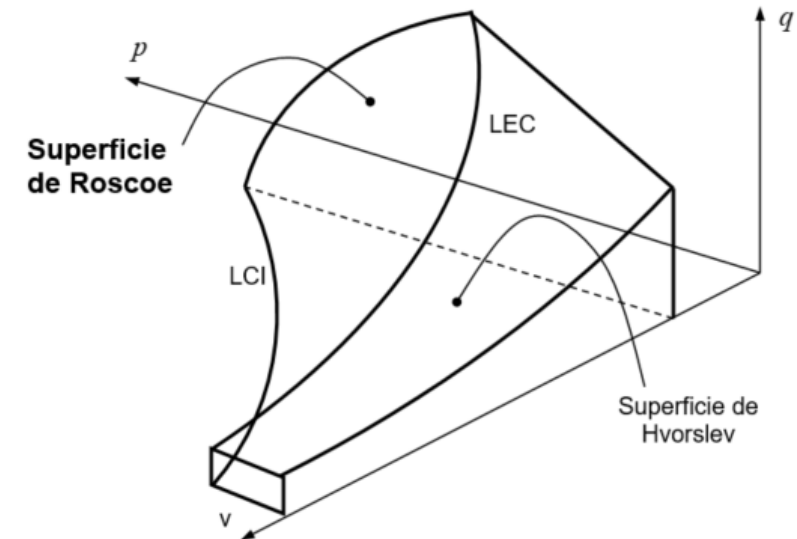
$$d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left(\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2}$$

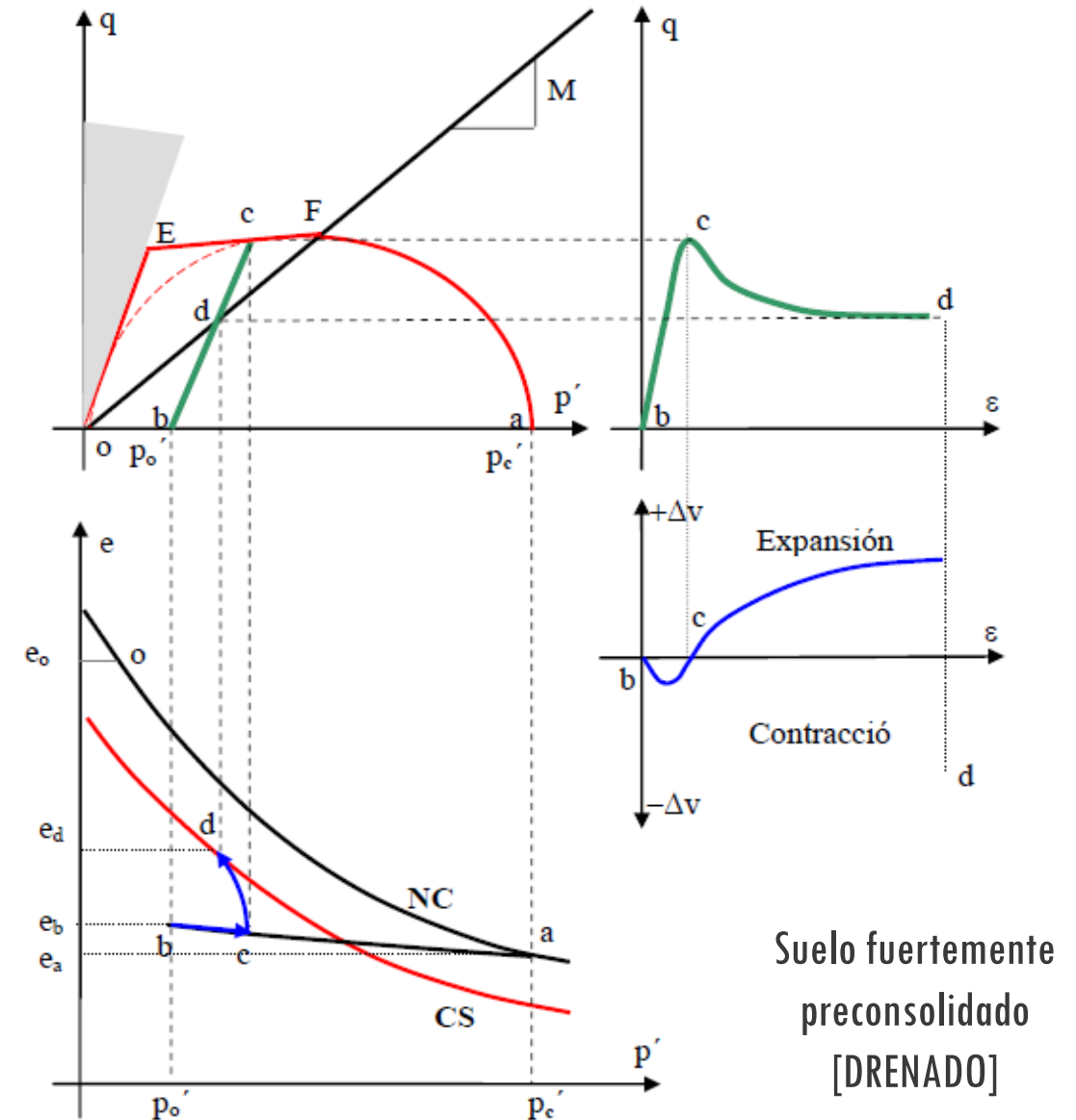
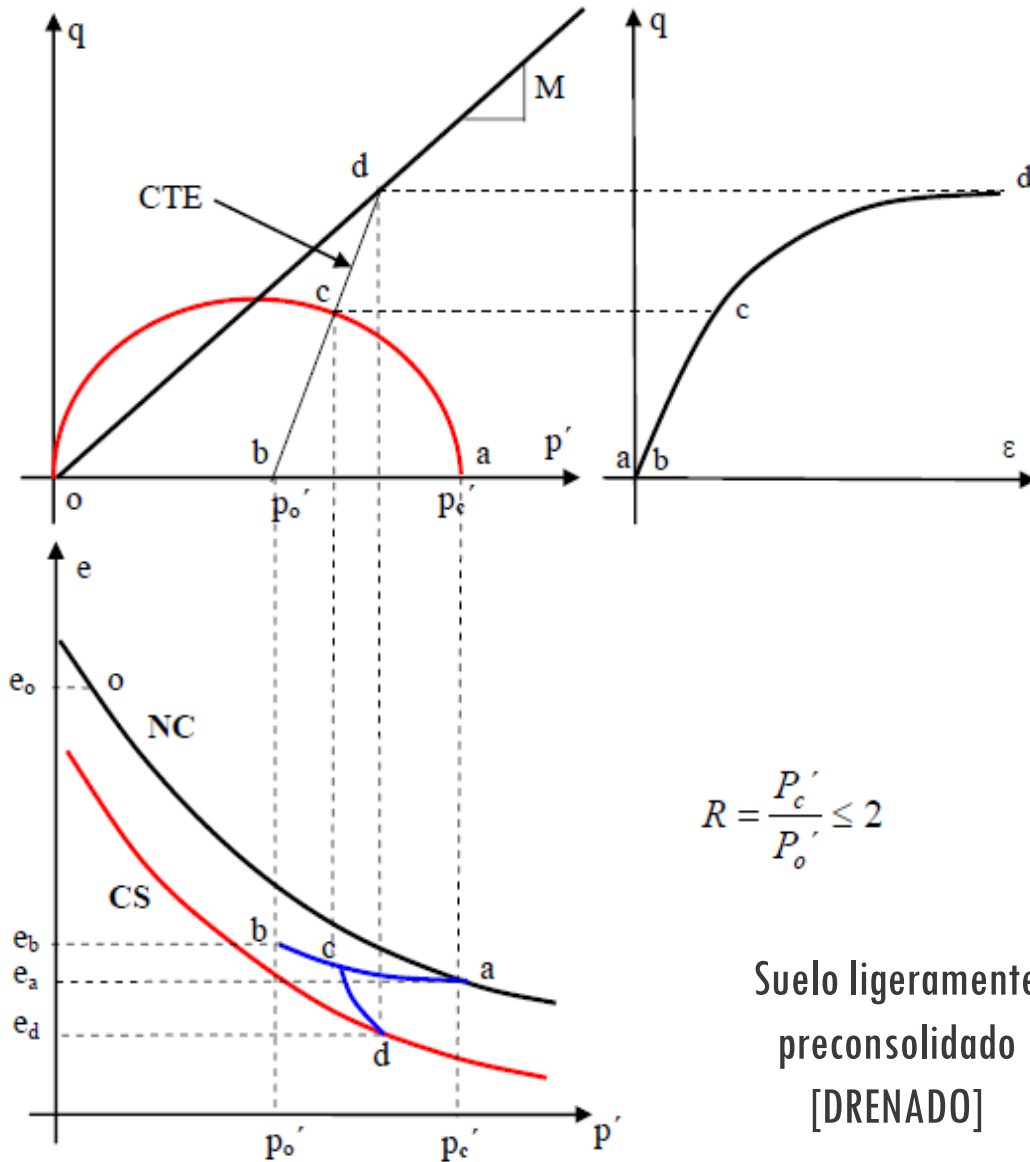
- Endurecimiento y ablandamiento plásticos: $\frac{dp_0}{p_0} = d\varepsilon_v^p \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa}$

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

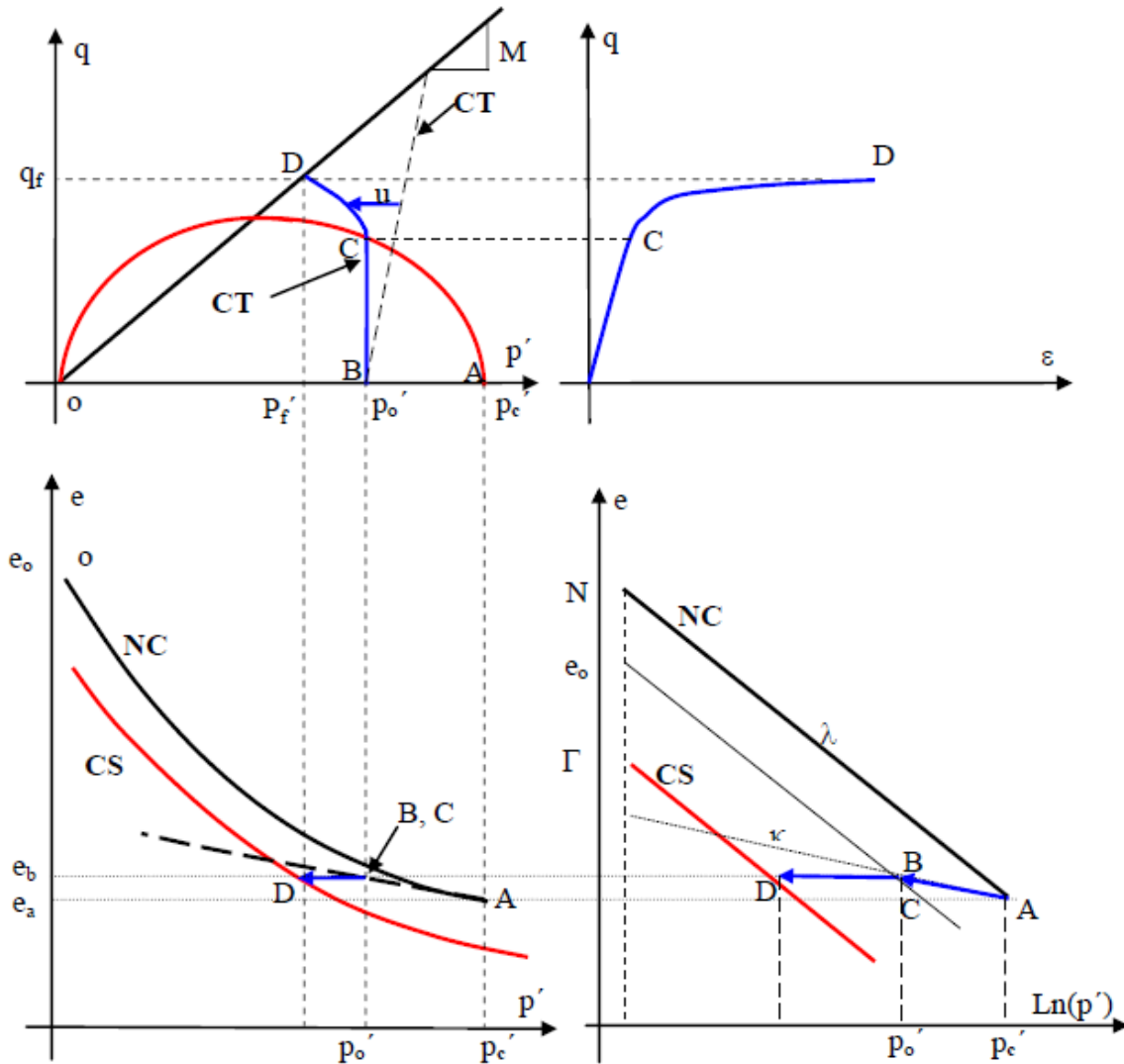
• Parámetros del modelo:

- 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)

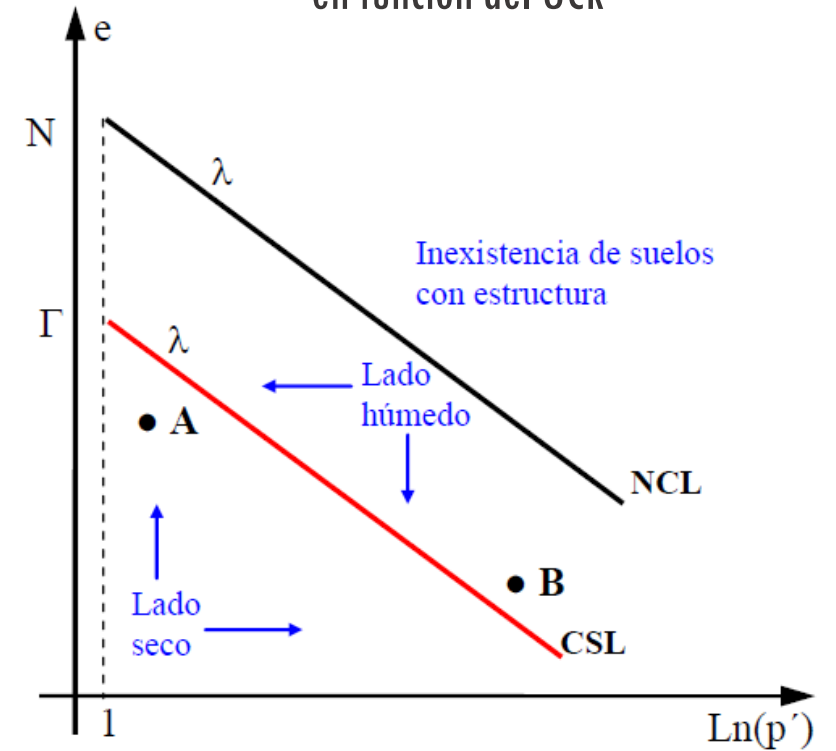




Suelo ligeramente preconsolidado
[CONSOLIDADO - NO DRENADO]



Regiones posibles de estado del suelo
en función del OCR



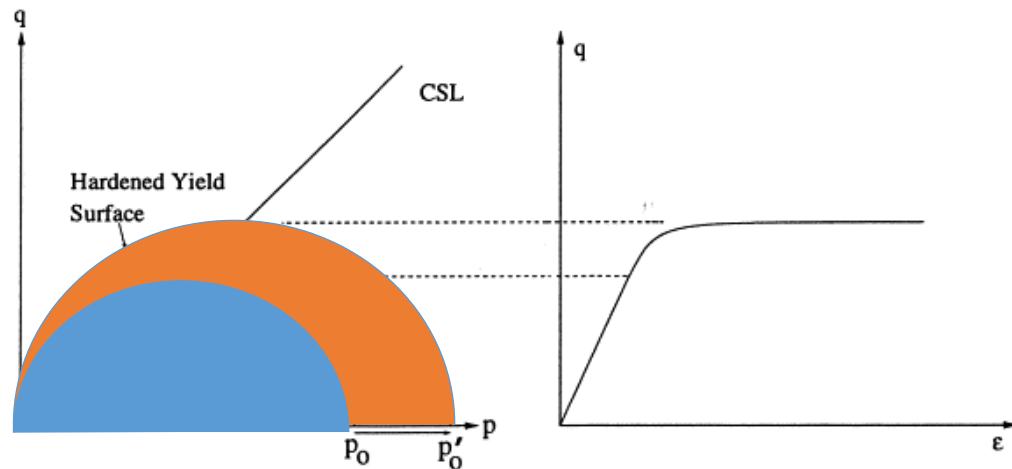
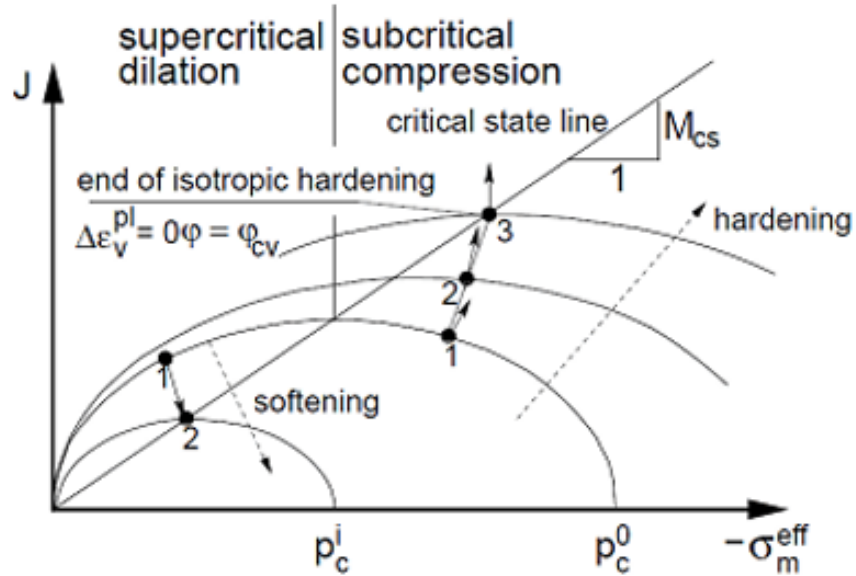
Línea de consolidación noval (NCL o LCN)

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

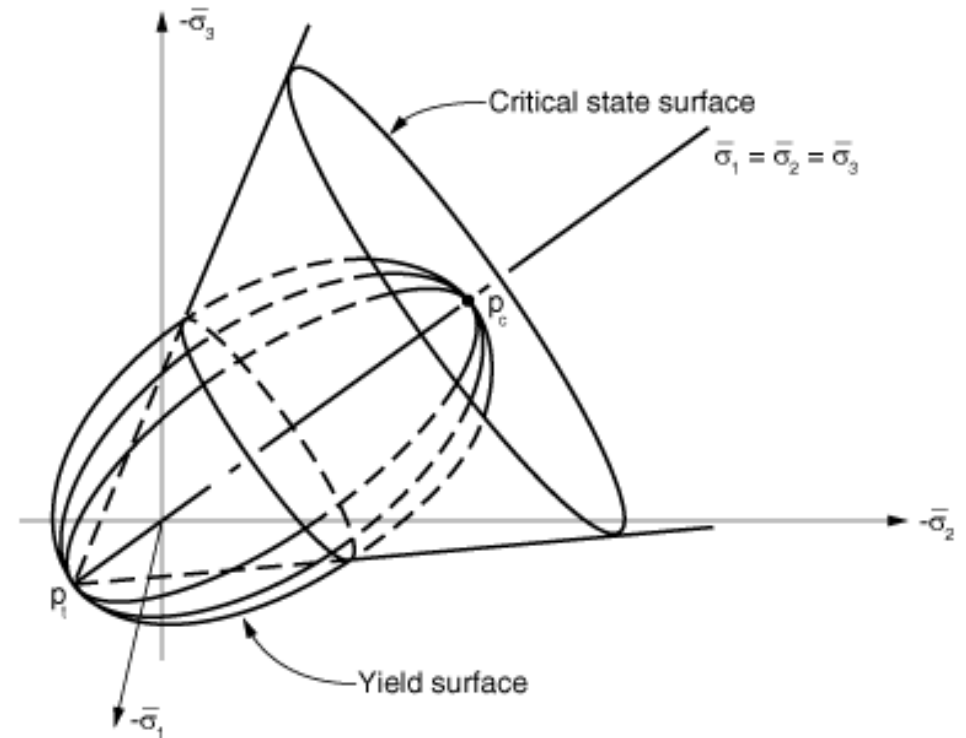
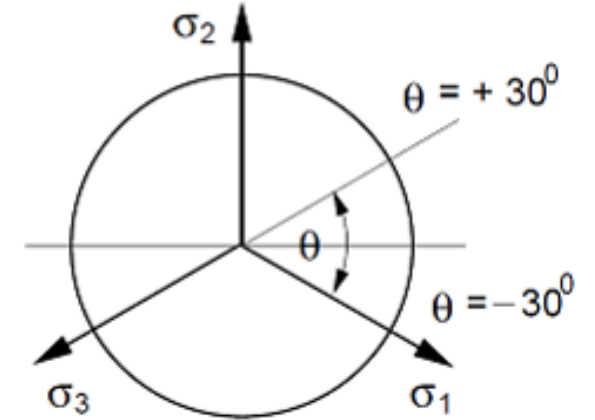
Línea de estado crítico (LEC o CSL)

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

ENDURECIMIENTO Y ABLANDAMIENTO PLÁSTICOS



CAM CLAY EN EL ESPACIO DE TENSIONES



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.

TRABAJO CST: Implementación de modelo Cam Clay Modificado

- PARTE A: Trayectoria drenada sin softening.
- PARTE B: Trayectoria no drenada sin softening.
- PARTE A: Trayectorias con softening.

Implementar en código o generar una Tabla de Cálculo.

Graficar:

Gráfico q x p incluyendo:

Trayectoria del ensayo

LEC de pendiente M ;

Tensión de desvío ($\sigma_1 - \sigma_3$) x deformación axial ε_1 ;

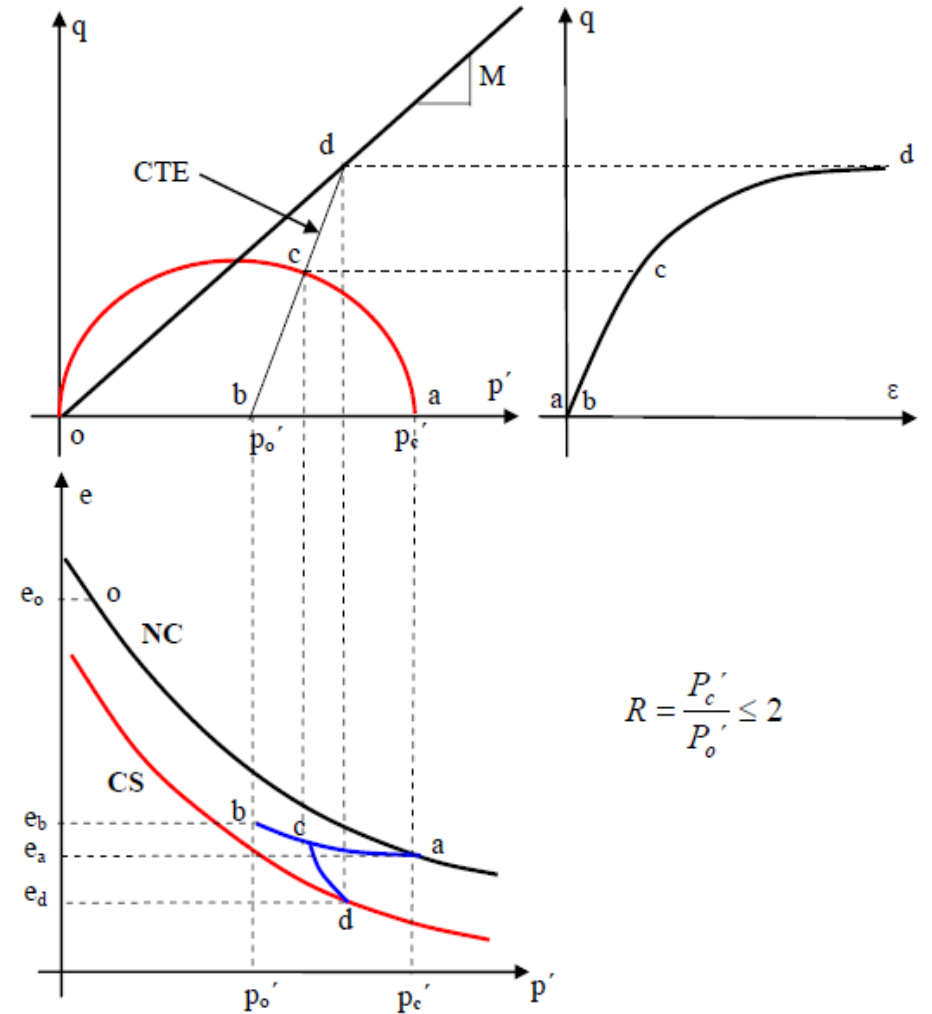
Curva $e - \ln(p)$ incluyendo trayectoria de ensayo y líneas NCL y CSL;

Deformaciones volumétricas x deformación axial ε_1 ;

Deformaciones de corte x deformación axial ε_1 ;

Trabajo CST: Aplicación de modelo Cam Clay Modificado.

- Datos de referencia:
 - $\lambda=0.448$; $\kappa=0.06$; $M=1.10$; $e_0=2.15$; $p_c=150\text{kPa}$;
- **Parte A: Ensayo Triaxial Consolidado-Drenado (sin dilatancia):**
 - Suelo preconsolidado a un valor p_{c_i} ;
 - $\sigma_3=75, 100$ y 125kPa (presiones de cámara);
 - $\Delta\sigma_1=5\text{kPa}$ (intervalo de carga desviadora);



Trabajo CST: Aplicación de modelo Cam Clay Modificado.

- Tabla de Cálculo de trayectorias drenadas:

- Columna 1 a 4: σ_1, σ_3, p' y q ; $p' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$

- Columna 5 y 6: $\eta, d\eta$; $\eta = q/p'$ $d\eta = \eta(i) - \eta(i-1)$

- Columna 7: p_0 ; (valor de referencia de la SF elíptica) $\frac{M^2 + \eta^2}{M^2} = \frac{p_0}{p}$

- Columna 8: Control p_0 vs. p_c

- (Si $p_0 < p_c$ comportamiento elástico) calculo sólo def. volumétricas elásticas (columna 9)

- (Si $p_0 > p_c$ comportamiento plástico) calculo sólo def. volumétricas totales (columna 10)

- Columna 9: Incremento de deformaciones volumétricas elásticas; $d\varepsilon_v^e = -\frac{de^e}{1+e_0} = \frac{\kappa}{1+e_0} \frac{dp}{p}$

- Columna 10: Incremento de deformaciones volumétricas totales; $d\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \left[\frac{dp}{p} + \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda}\right) \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right]$

- Columna 11: Deformaciones volumétricas acumuladas: $\varepsilon_v = \varepsilon_v(i-1) + d\varepsilon_v(i)$

- Columna 12: disminución de la relación de vacíos e ; $de = d\varepsilon_v(1+e_0)$

- Columna 13: relación de vacíos e ; $e(i) = e(i-1) - de$

calcular dp/p como:
 $(p' - p'_{-1}) / p'$

Trabajo CST: Aplicación de modelo Cam Clay Modificado.

- Tabla de Cálculo de trayectorias drenadas:

- Columna 14: Incremento de deformaciones de desvío totales, $d\varepsilon_s = d\varepsilon_s^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left(\frac{dp}{p} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \frac{2\eta}{M^2 - \eta^2}$

- Columna 15: Deformaciones de desvío totales; $\varepsilon_s(i) = \varepsilon_s(i-1) + d\varepsilon_s$

- Columna 16: Deformación axial ε_1 ; $\varepsilon_1 = \varepsilon_s + \varepsilon_v/3$

- Línea LCN (LCI):

- Obtener N a partir de e_0 , p_0 y p_c $e_0 = N - (\lambda - \kappa) \cdot \text{Ln}(p_c') - \kappa \cdot \text{Ln}(p_0')$
- Graficar la recta con: $e = N - \lambda \ln(p')$

- Línea CSL (LEC):

- Obtener Γ a partir de N $\Gamma = N - (\lambda - \kappa) \text{Ln}(2)$
- Graficar la recta con $e = \Gamma - \lambda \cdot \text{Ln}(p')$