FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

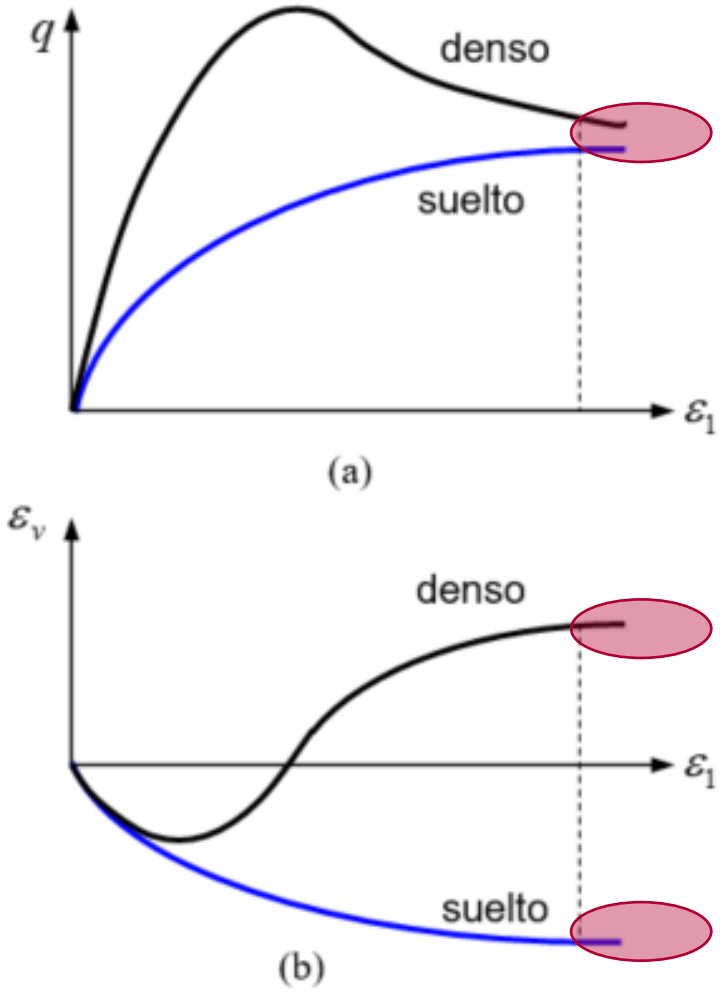
+54 261 5796326

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.
- La Mecánica de Suelos clásica optó primeramente por adaptar modelos aplicados a metales, del tipo elástico con criterio de rotura para la plastificación:
  - Mohr-Coulomb como criterio de Tresca extendido.
  - Dricker-Prager como criterio de Von Mises extendido.
  - Pocos resultados de laboratorio en suelos acumulados como para permitir el desarrollo de una teoría independiente de suelos.
- En 1958 el Prof. Roscoe de la universidad de Cambridge realizó una extensa investigación de LABORATORIO principalmente con:
  - ensayos triaxiales convencionales drenados y no drenados en suelos cohesivos saturados.
  - Complementando con ensayo de consolidación unidimensional.

ESTADO CRÍTICO: QUE ES?

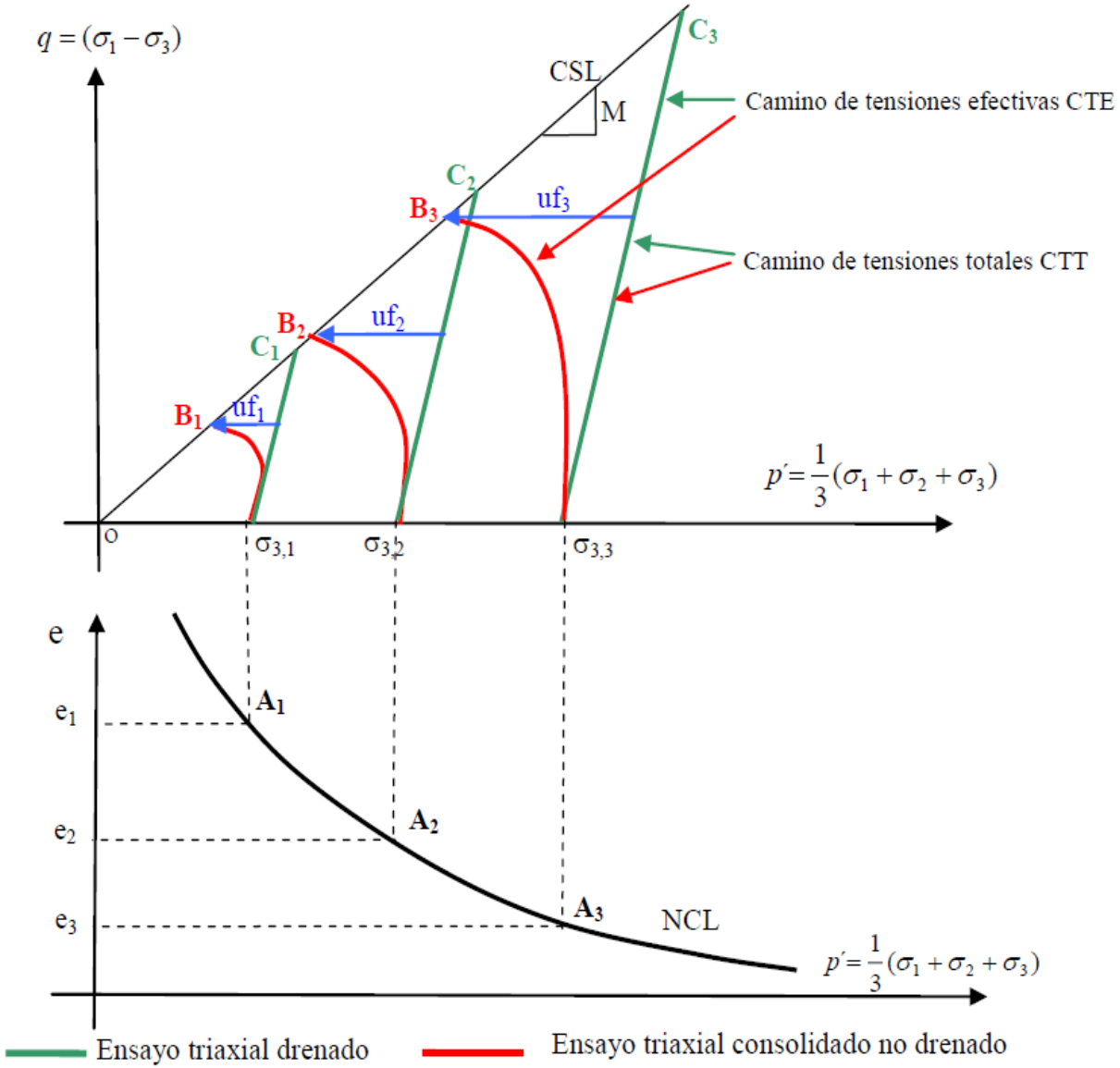
- Se observó que:
- El suelo inicialmente experimenta aumento de resistencia con contracción o dilatancia.
- Con el incremento de la deformación axial, el suelo en cualquier caso *tiende a una resistencia final a volumen constante*.
- Este estado a volumen constante se denomina estado crítico y los estados de tensión y volumen de suelo 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.



MODELO COMPORTAMENTAL INTEGRADO

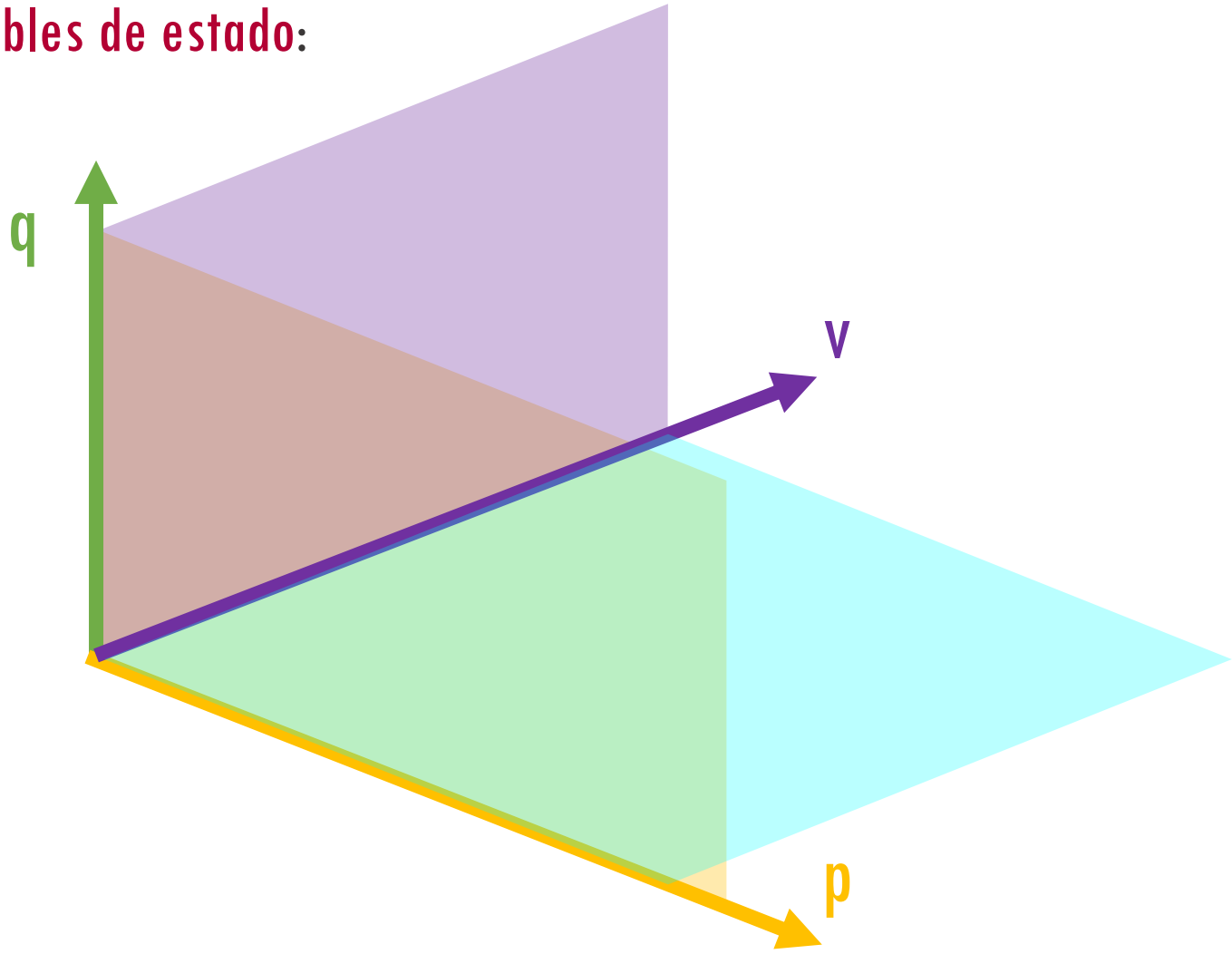
- El estado del suelo se define por tres variables de estado:
  - Volumen específico:

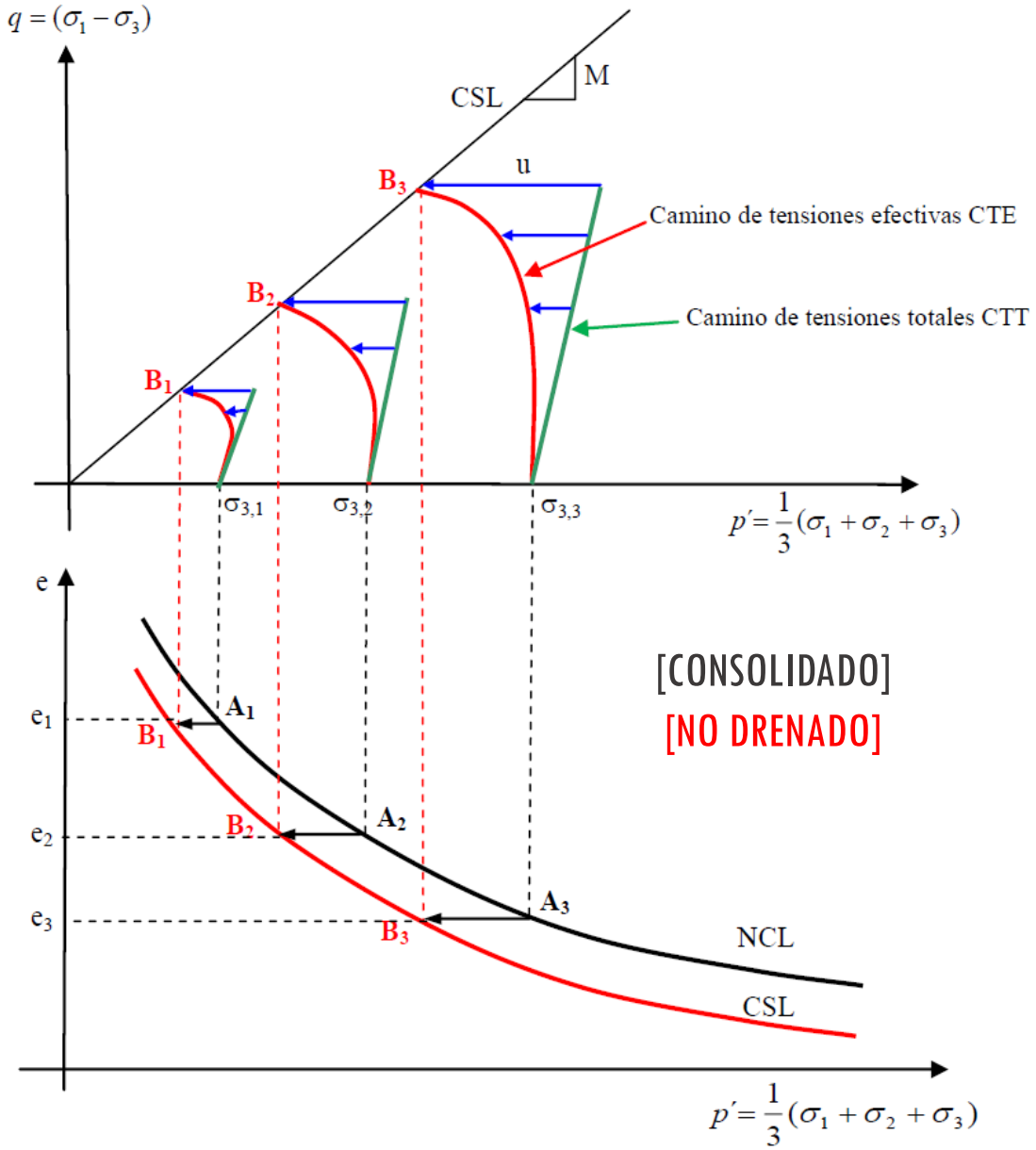
    $v = 1 + e$

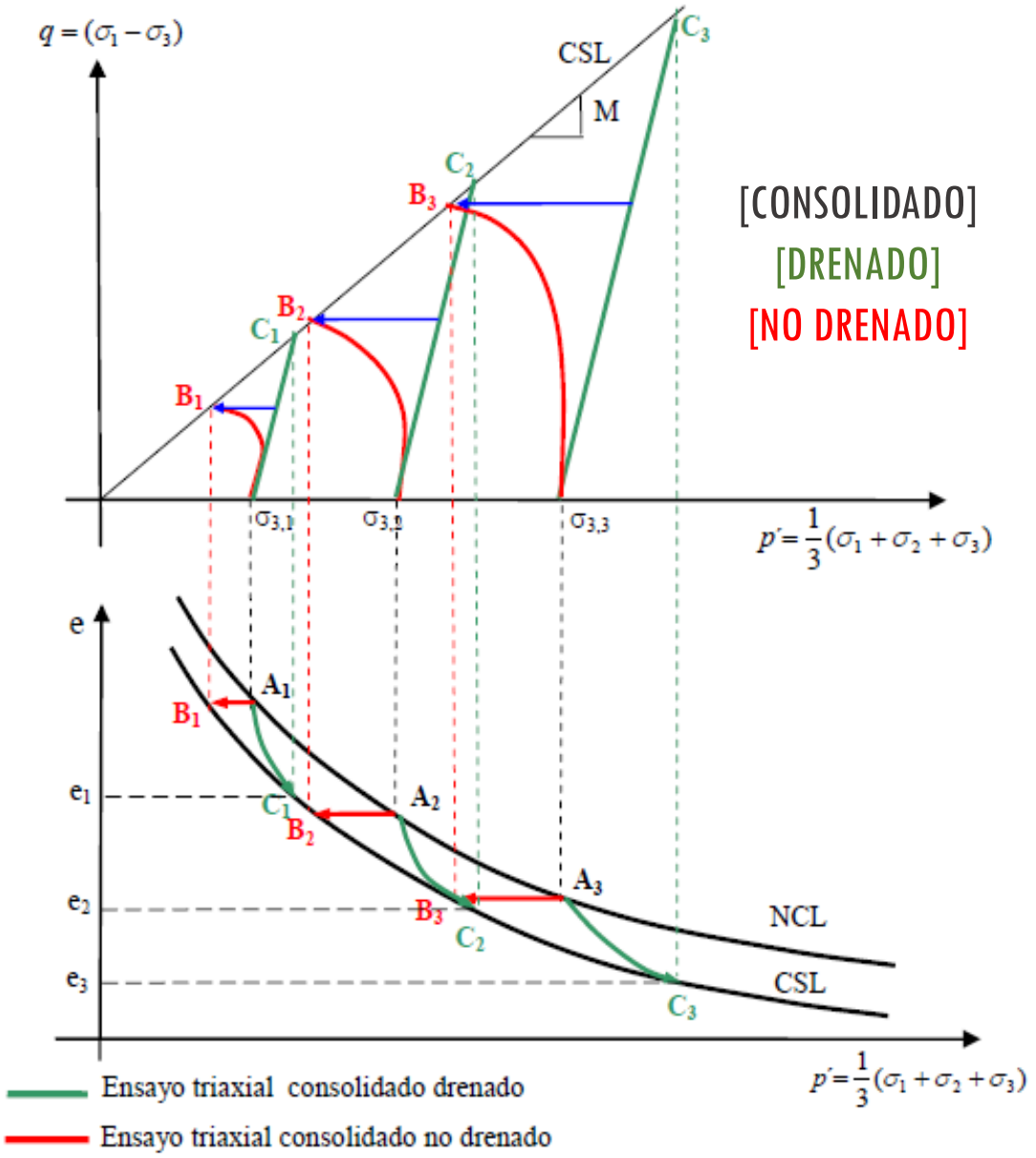
    (siendo "e" la relación de vacíos)
  - Tensión media efectiva:

    $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
  - Tensión de desvío :

    $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$

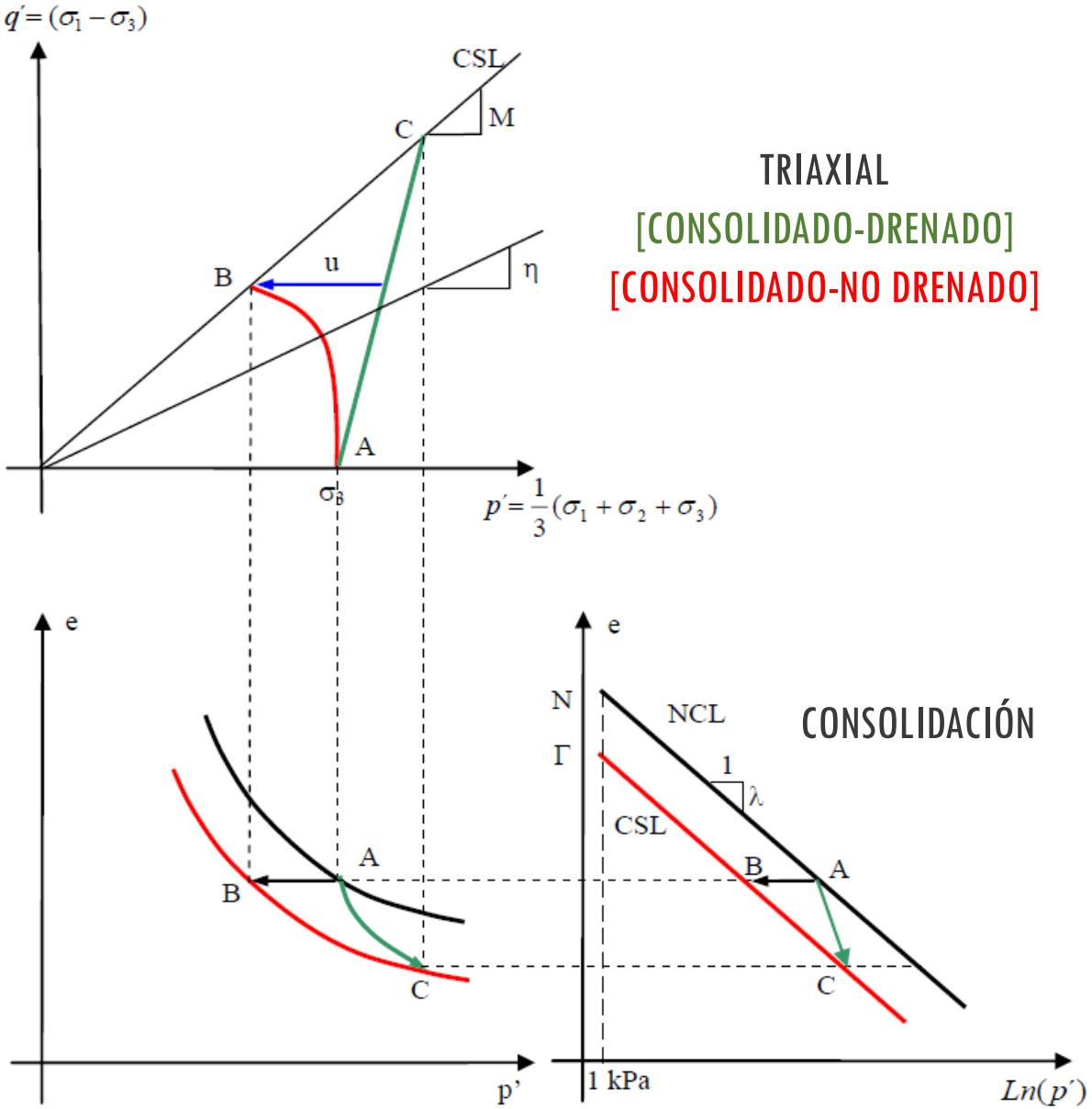



$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$
CSL
M
u
B_3
B_2
B_1
Camino de tensiones efectivas CTE
Camino de tensiones totales CTT
$\sigma_{3,1}$
$\sigma_{3,2}$
$\sigma_{3,3}$
$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
e
e_1
e_2
e_3
A_1
A_2
A_3
B_1
B_2
B_3
NCL
CSL
[CONSOLIDADO]
[NO DRENADO]


$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$
CSL
M
C_3
C_2
B_3
B_2
C_1
B_1
$\sigma_{3,1}$
$\sigma_{3,2}$
$\sigma_{3,3}$
$p' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
[CONSOLIDADO]
[DRENADO]
[NO DRENADO]
e
e_1
e_2
e_3
A_1
A_2
A_3
B_1
C_1
B_2
B_3
C_2
C_3
NCL
CSL
Ensayo triaxial consolidado drenado
Ensayo triaxial consolidado no drenado

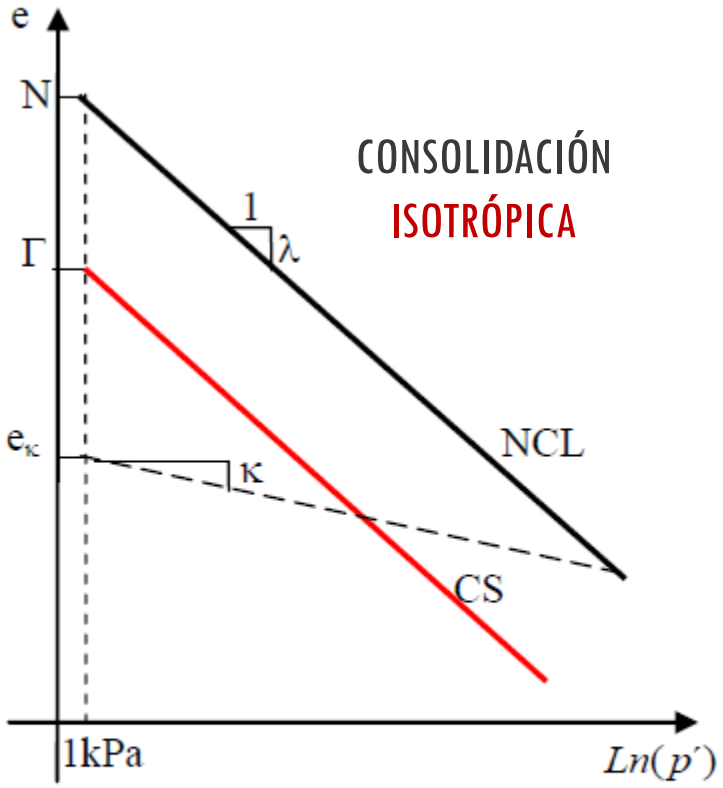
LINEA DE ESTADO CRÍTICO (LEC)
CRITICAL STATE LINE (CSL)

- 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.



LINEA DE 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 Cc y Cs.



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

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

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

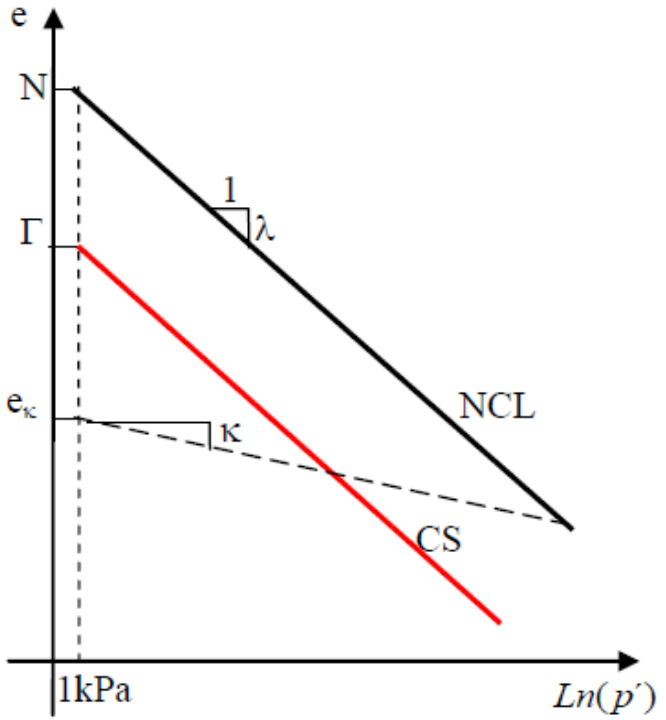
λ = Pendiente de ambas curvas

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)

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



Línea de consolidación isotrópica o de consolidación normal (NCL)

Línea de estado crítico (CSL)

- consolidación unidimensional (vertical):

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)

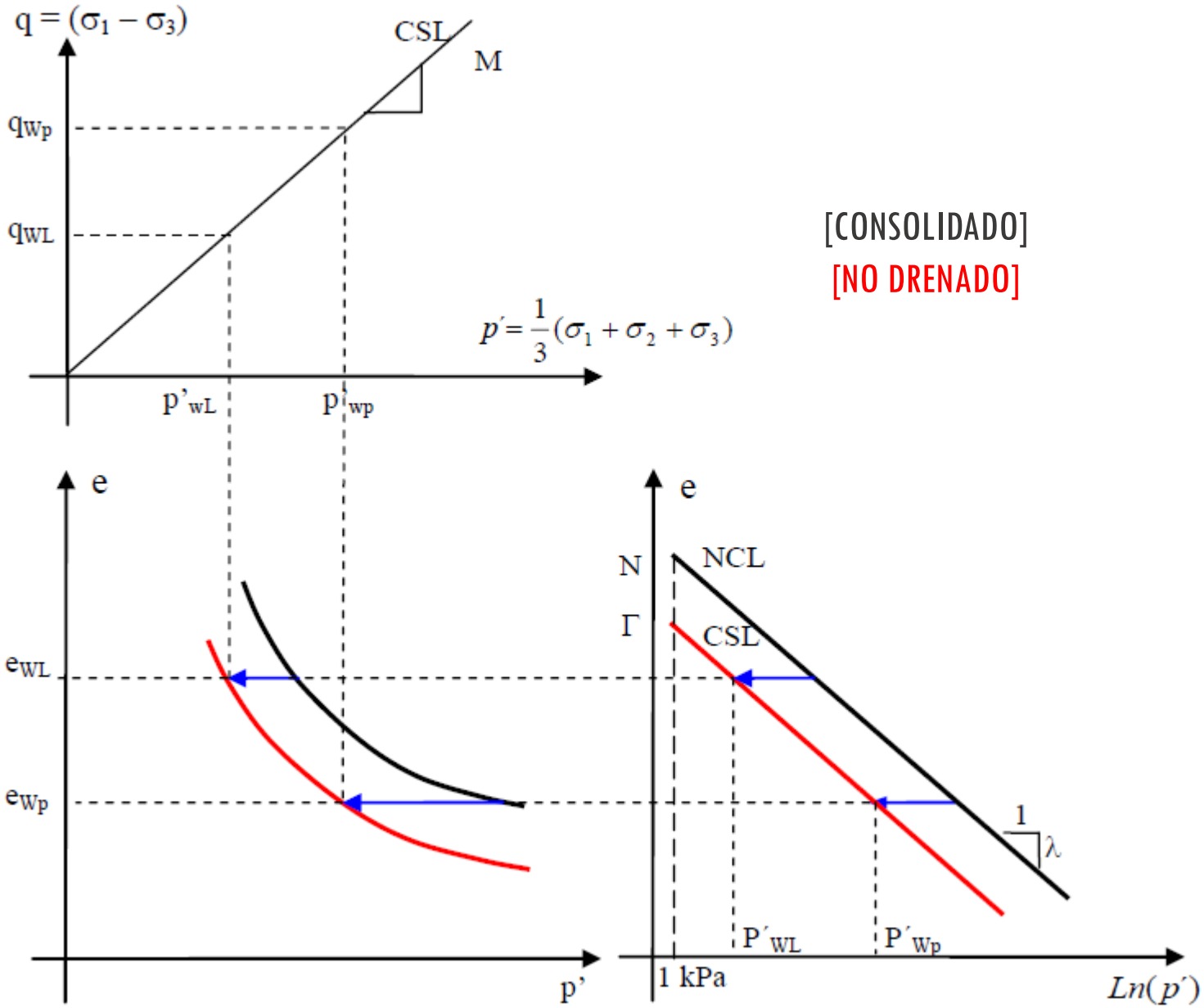
$$C_s = \frac{e_{final} - e_{inicial}}{\log\left(\frac{\sigma'_{inicial}}{\sigma'_{final}}\right)}$$

A partir de Cc y Cs obtenemos los parámetros de consolidación isotrópica.

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

ESTADO CRÍTICO y PROPIEDADE ÍNDICE

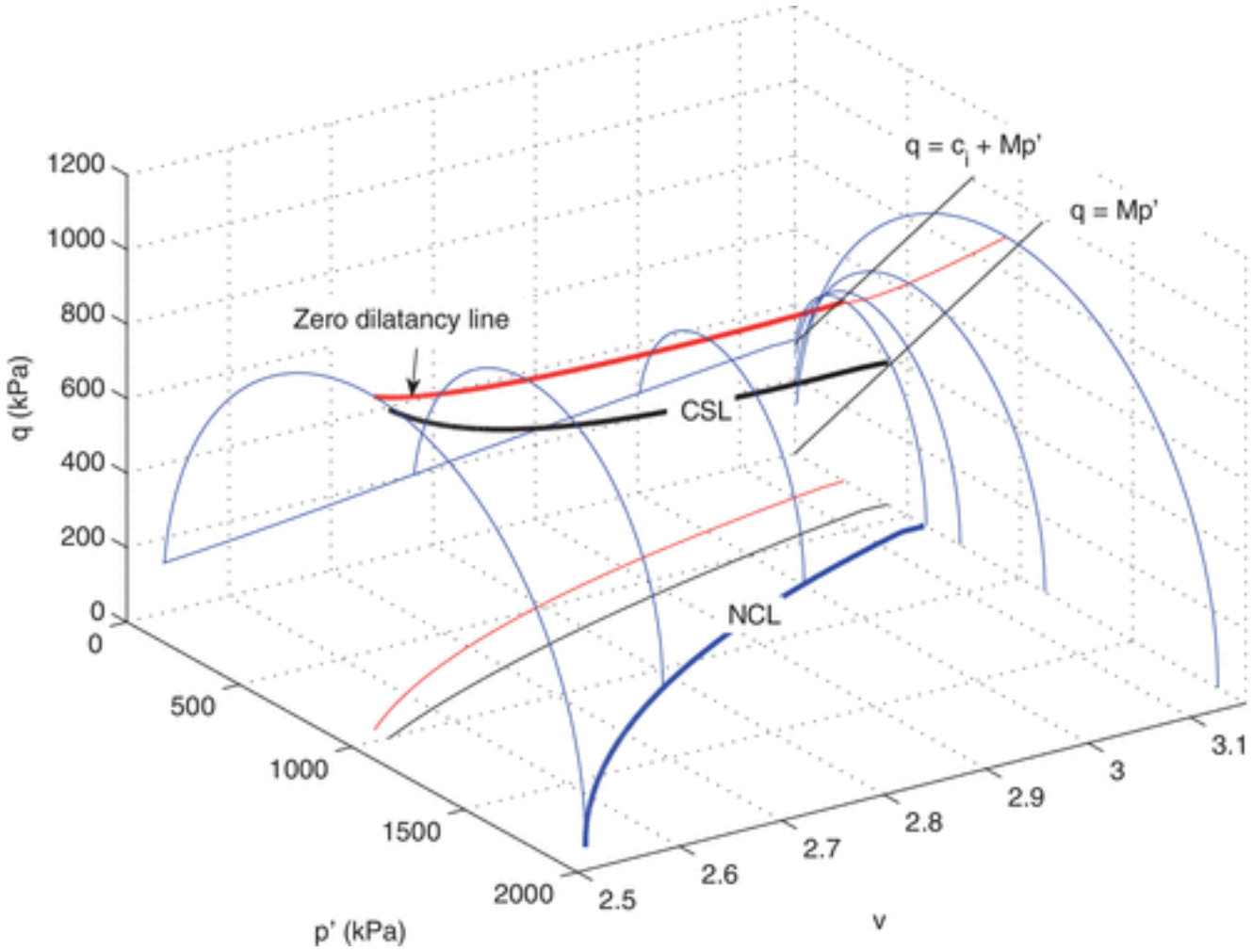
- Los estados límite líquido y plástico tienen sus respectivas relación de vacíos y resistencia al corte.
- El valor del índice de plasticidad IP es un indicador de la diferencia de resistencia al corte entre un estado y otro.



[CONSOLIDADO]
[NO DRENADO]

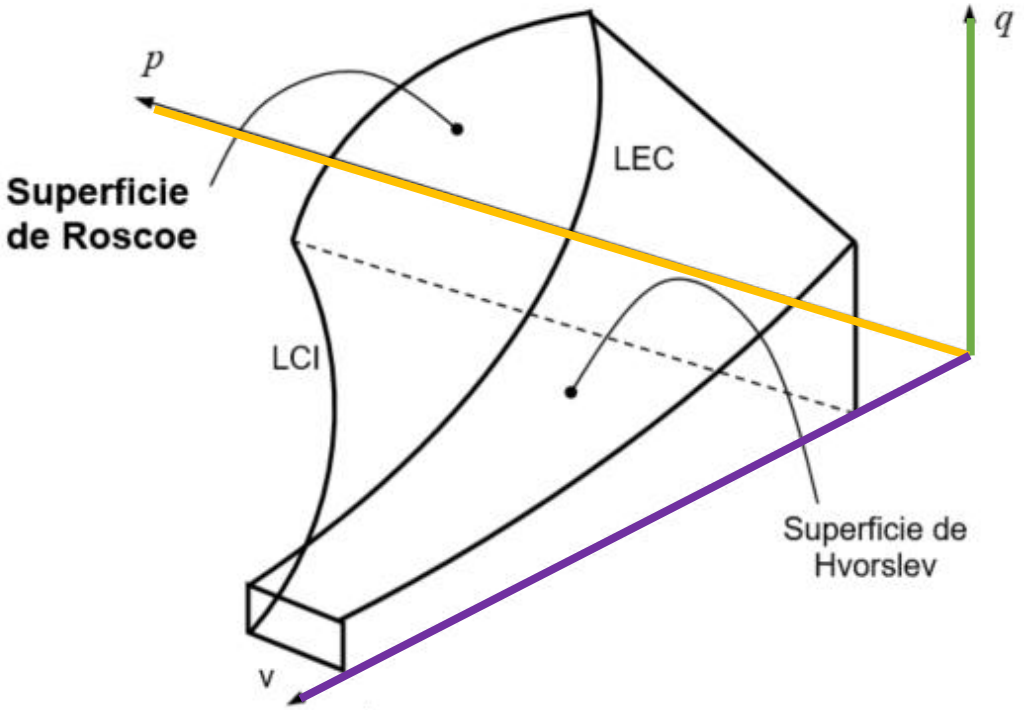
SUPERFICIE DE ESTADO LÍMITE 3D

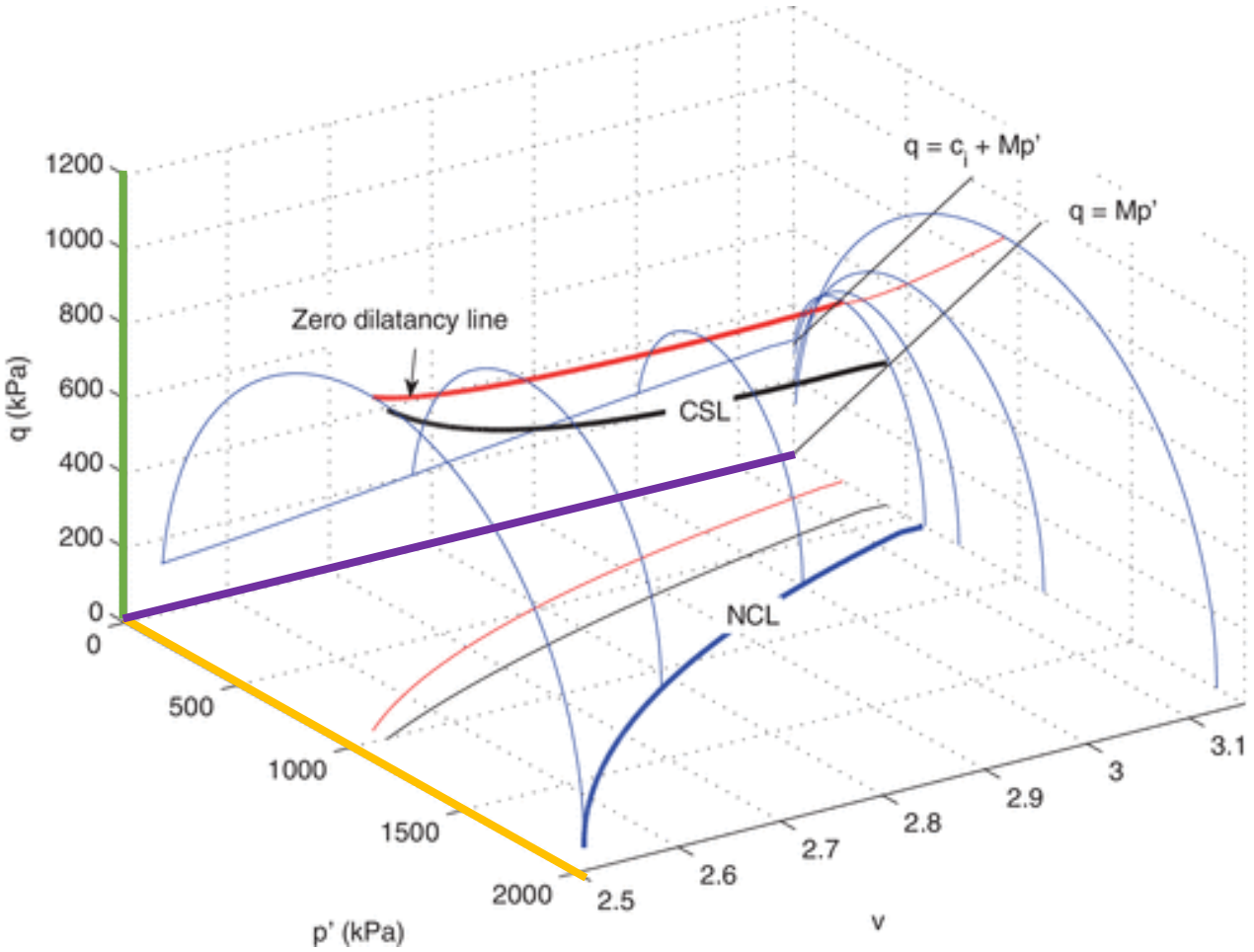
- En el espacio definido por las 3 variables de estado (v, p, q), se define una Superficie de estado límite tridimensional *de Roscoe*.
- Cuando un estado (v, p, q) llega a tocar esta superficie, la masa de suelo entra en fluencia y plastifica.
- Para combinaciones de (v, p, q) por debajo de la superficie,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



SUPERFICIE DE ESTADO LÍMITE 3D

- Para suelos dilatantes se suele modificar un sector de la superficie de Roscoe incluyendo un plano denominado como la *superficie de Hvorslev*.





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
- Es un modelo para suelos integrando:
  - los estados de tensión y deformación de suelos en TRIAXIAL y CONSOLIDACIÓN,
  - los estados elástico y plástico,
  - 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: v, p, q.