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

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

Modelos Constitutivos para Suelos

Modelos Elastoplásticos

ACMIG03: Comportamiento Mecánico de Suelos

Dr. Juan Pablo Ibañez

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

+54 261 5796326

MODELO:

- Formulación matemática que **idealiza** el comportamiento *mecánico* de un material (suelo, roca) en lo que respecta a la relación entre tensiones e deformaciones.

PARÁMETROS:

- El modelo se calibra a cada tipo de material a través de sus parámetros, los cuales deben ser adoptados en base a:
    - Información de laboratorio o campo (ensayos);
    - Correlaciones;
    - Valores empíricos;
    - Valores de la literatura sugeridos;
    - Valores adoptados con algún criterio específico;
- Sobre los parámetros del modelo se pueden realizar **análisis de sensibilidad**, consistentes en la variación controlada de cada parámetro relevante para el análisis a fin de obtener *tendencias de variación* en el resultado obtenido.

DESPLAZAMIENTOS

- Los desplazamientos en el suelo constituyen el efecto visible de un proceso mecánico.

DEFORMACIONES

- Las deformaciones en cada punto se relacionan con los desplazamientos y con las condiciones de compatibilidad.

MODELO CONSTITUTIVO

- Leyes de constitución mecánica, basadas en la elasticidad y plasticidad, relacionan deformaciones con tensiones, incorporando las características del material.

TENSIONES

- Se obtienen a partir de las deformaciones mediante la matriz constitutiva.

FUERZAS

- Acciones en el suelo resultantes de la integración de las tensiones.

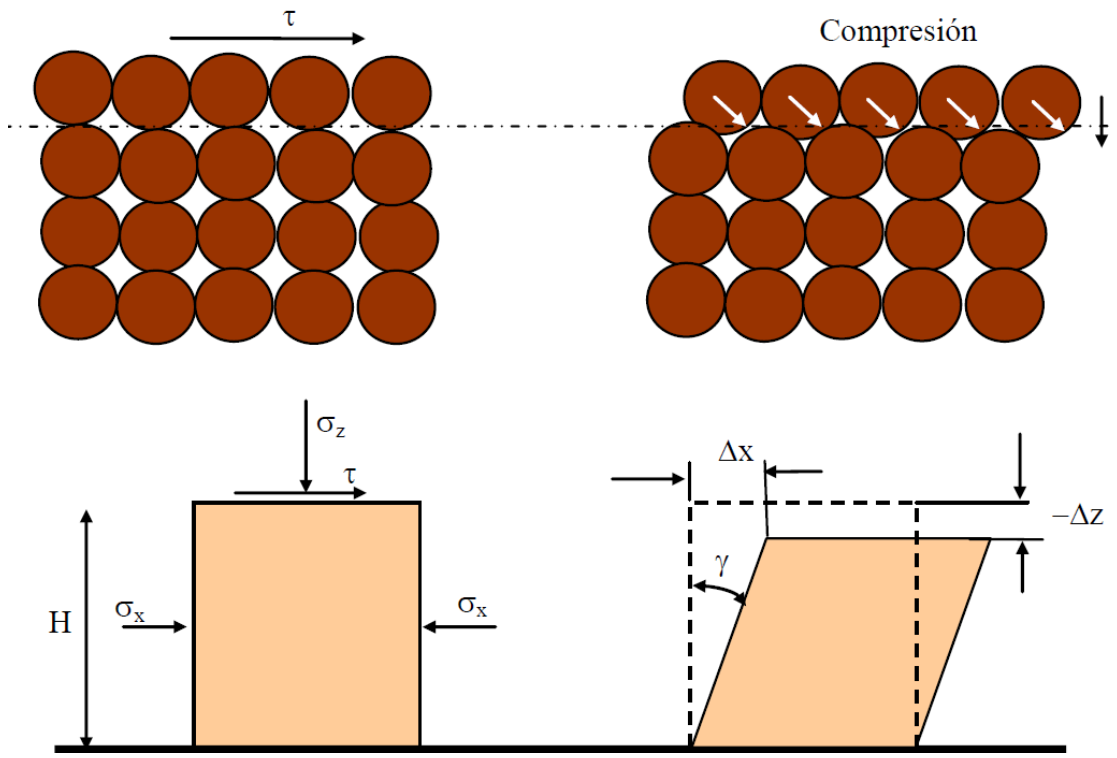
MODELOS PARA SUELOS:

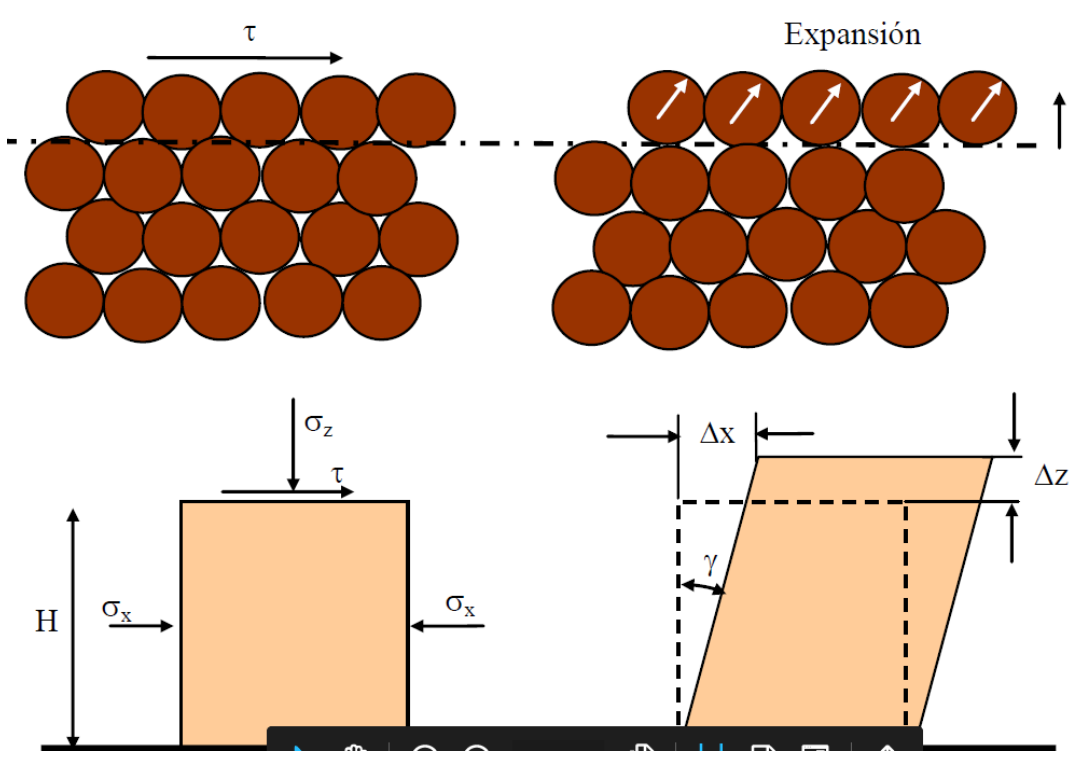
- Los modelos deben considerar e incluir de alguna forma:
- LAS FASES: Los suelos son compuestos por tres fases, sólido, agua y aire. La interacción entre las fases es relevante al comportamiento mecánico del suelo (presión de poros, succión, colapso, hinchamiento).
- GRANULOMETRIA: Dependiendo de la granulometría, el comportamiento será del tipo granular o cohesivo.
- CONSOLIDACIÓN: En suelos finos y cohesivos incluyendo variación en las presiones de poros, deformaciones diferidas en el tiempo y rigidización del suelo.
- DILATANCIA y CONTRACCIÓN: Los suelos granulares en general son materiales de comportamiento *acoplado:*
  - Deformaciones volumétricas asociadas a tensiones normales;
  - Distorsiones angulares asociadas a tensiones de corte;
  - Acoplamiento: Deformaciones volumétricas asociadas a tensiones de corte;

DILATANCIA y CONTRACCIÓN:

DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA $\varepsilon_v = \dfrac{-\Delta z}{H}$

DISTORSIÓN ANGULAR $\gamma = \dfrac{\Delta x}{H}$

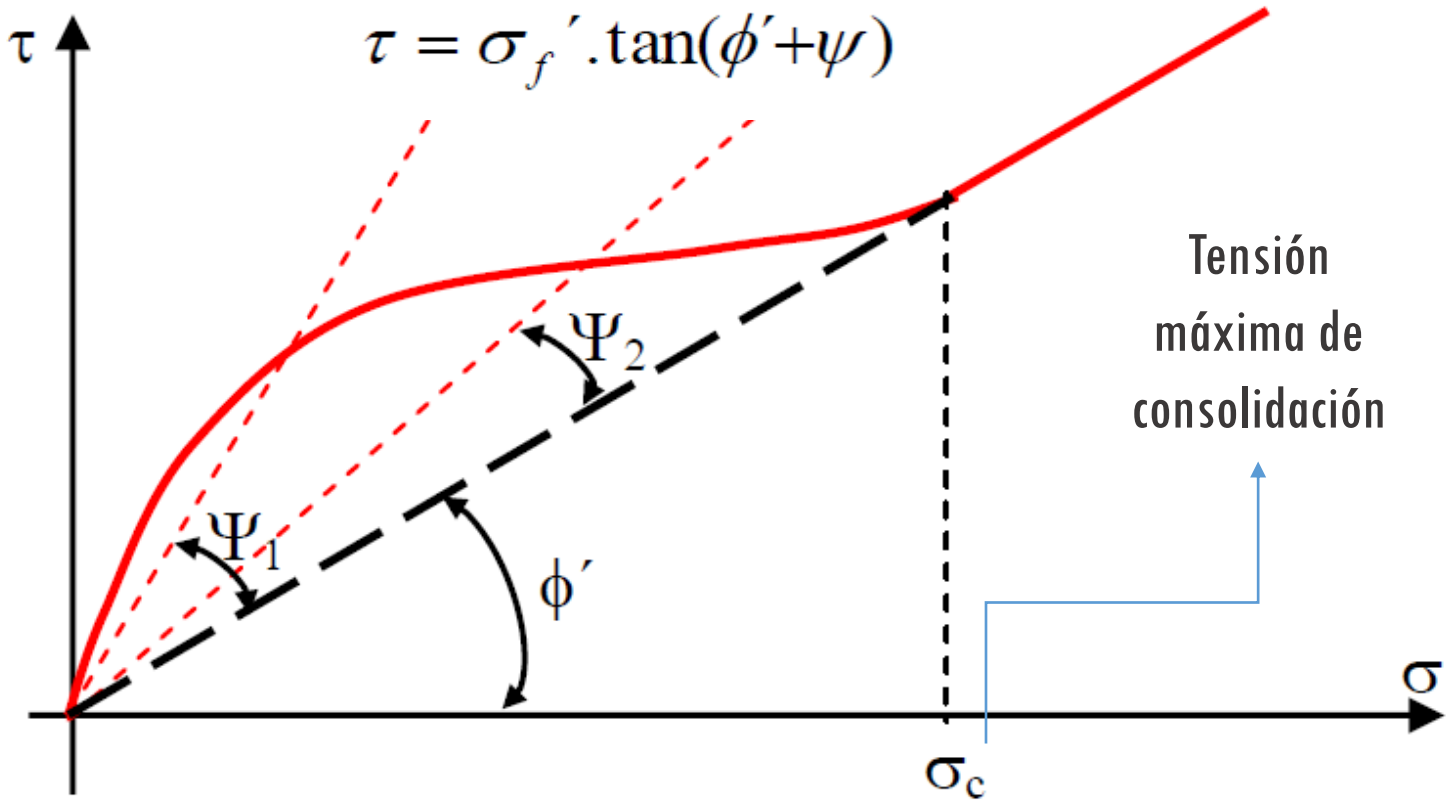




DILATANCIA y CONTRACCIÓN:

DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA $\varepsilon_v = \frac{-\Delta z}{H}$

DISTORSIÓN ANGULAR $\gamma = \frac{\Delta x}{H}$



Tensión máxima de consolidación

Se producirá dilatancia en arcillas preconsolidadas con OCR > 2

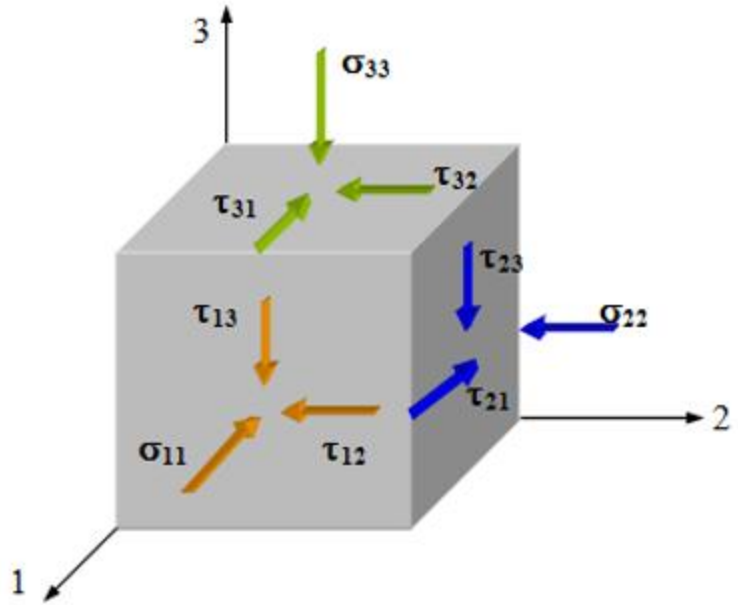
TENSOR (MATRIZ):

Ente matemático que es independiente de los ejes de referencia.

- Las constantes son tensores de orden “0”.
- Los vectores son tensores de orden “1”.
- Las matrices son tensores de orden “2”.

TENSOR DE TENSIONES

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$



TENSIÓN DE DEFORMACIONES

$$T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \frac{1}{2}\gamma_{12} & \frac{1}{2}\gamma_{13} \\ \frac{1}{2}\gamma_{21} & \varepsilon_{22} & \frac{1}{2}\gamma_{23} \\ \frac{1}{2}\gamma_{31} & \frac{1}{2}\gamma_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

σ = Tensión normal

τ = Tensión de corte

ESTADO HIDROSTÁTICO (mean stress):

Las tensiones normales son iguales (en módulo y signo) en las tres direcciones:

- No hay tensiones de corte (ej. condición de *presión de cámara* en el ensayo triaxial).
- Representa un estado de confinamiento y equilibrio para el suelo (con una "tensión esférica").

ESTADO DE DESVÍO (deviatoric stress):

Estado de tensiones resultante de restar a un dado estado de tensiones cualquiera el tensor de estado hidrostático.

- Existen tensiones de corte (ej. *Desviador* del ensayo triaxial).
- Representa un estado que puede llevar a la rotura o plastificación.

Tensión esférica: $p = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ Deformación volumétrica: $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{11} - p & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} - p & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} - p \end{bmatrix}$$

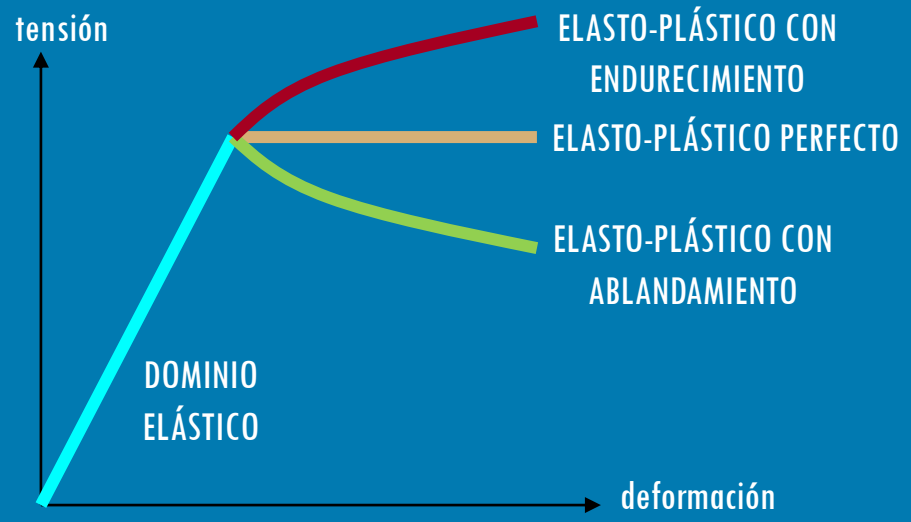
HIDROSTATICO DESVIO

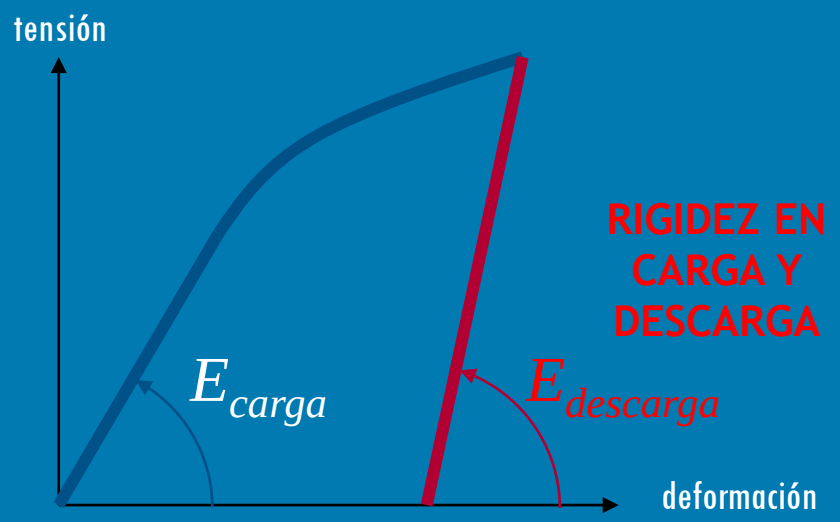
$$T_\varepsilon = \tfrac{1}{3}\varepsilon_v \delta_{ij} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}$$

HIDROSTATICO DESVIO

MODELOS ELATOPLÁSTICOS

- Los suelos en general experimentan DEFORMACIONES PLÁSTICAS desde bajos niveles de carga, con lo cual se van apartando gradualmente del comportamiento elástico;
- El modelo elástico debe tener un LÍMITE para ser aplicable a los suelos;
- Ese límite viene dado por un CRITERIO DE RUPTURA que debe asumirse;
- A partir de este límite, comienza el comportamiento plástico del suelo.
- Una LEY DE PLASTIFICACIÓN es necesaria para controlar el comportamiento plástico.





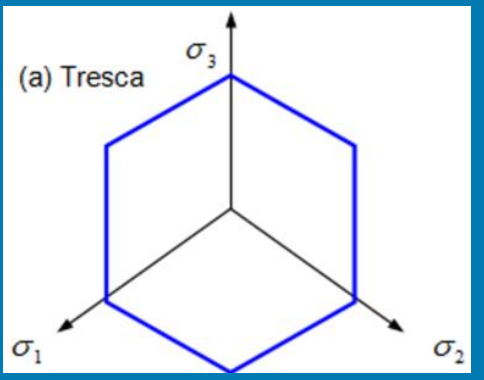
CRITERIOS DE ROTURA PARA METALES

- Dependen solo del tensor de desvío (independientes del confinamiento).
- En suelos, los criterios de ruptura deben depender del tensor hidrostático.
  - Pero sirven para análisis con condición $\phi = 0$, en arcillas saturadas en condición no drenada.

CRITERIO DE TRESCA:

- El flujo plástico ocurre cuando la máxima tensión de corte alcanza el valor de la máxima tensión de corte que ocurre en el ensayo de tracción uniaxial;

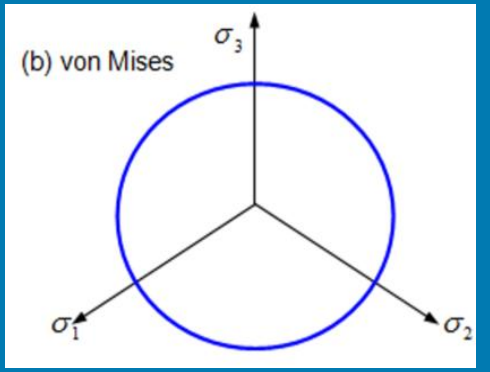
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm\sigma_0 \quad o \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \pm\sigma_0 \quad o \quad \sigma_3 - \sigma_1 = \pm\sigma_0$$



CRITERIO DE VON MISES:

- El flujo plástico se inicia cuando la energía de distorsión alcanza el valor de la energía de distorsión de plastificación observada en el ensayo de tracción uniaxial.

$$U_d = GE_{ij}E_{ij}$$



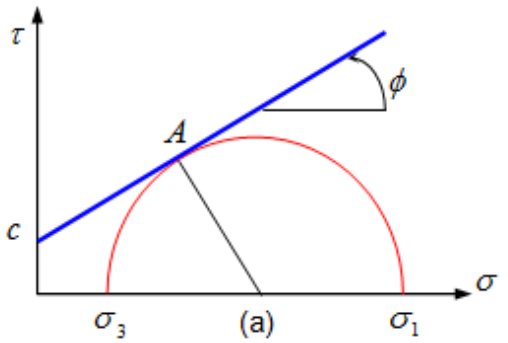
CRITERIO DE ROTURA DE MOHR COULOMB

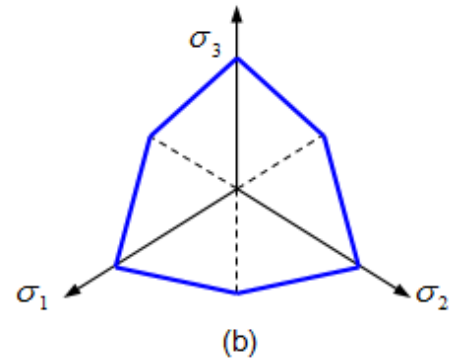
- Basado en la ecuación de resistencia al corte.
- Es formulado a partir del círculo de Mohr.
- Depende de las tensiones normales máxima y mínima.
- Este criterio incluye
  - El efecto del confinamiento, expresado por el estado hidrostático.
  - El fenómeno de dilatancia para las deformaciones plásticas.

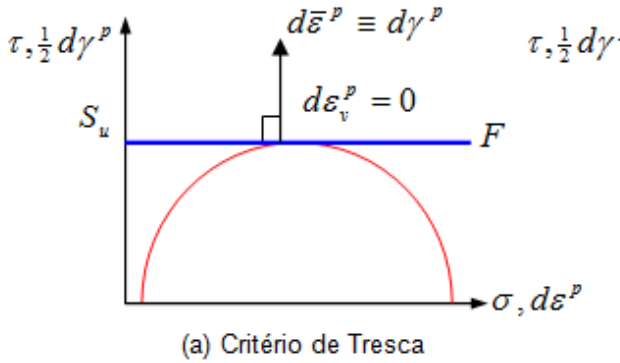
Modelo Mohr-Coulomb es un modelo de Tresca extendido

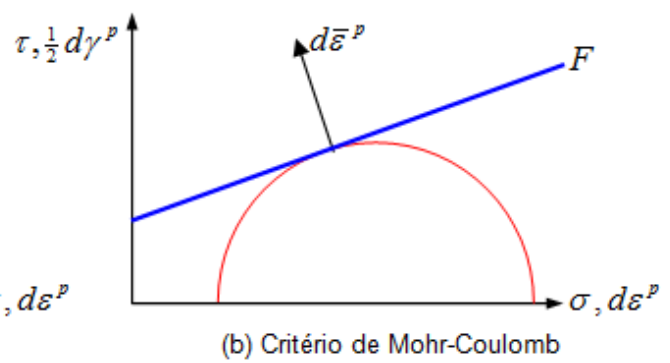
$$\tau = c + \sigma \tan\phi$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\operatorname{sen}\phi + c\cos\phi$$









TIPOS DE ENDURECIMIENTO PLÁSTICO

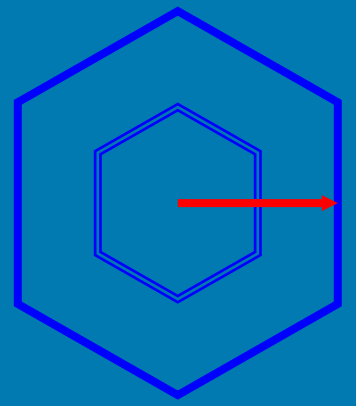
ENDURECIMIENTO ISOTRÓPICO:

- La superficie de plastificación inicial se expande con la historia de cargas y deformaciones aplicadas al material.
- Pero conserva su forma original.

ENDURECIMIENTO CINEMÁTICO:

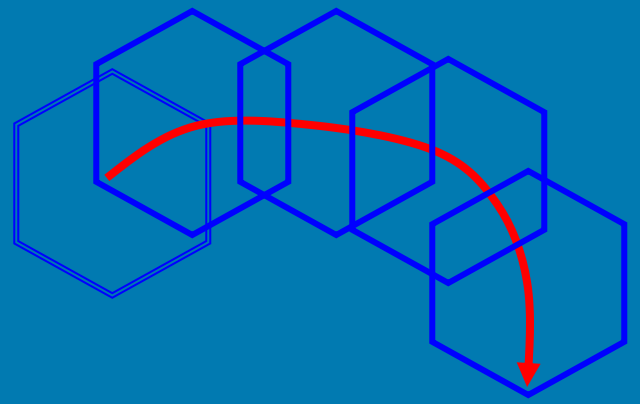
- La superficie de plastificación inicial se traslada según sea la historia de cargas y deformaciones, sin aumentar su tamaño.
- El dominio elástico permanece constante.
    - Efecto Bauchinger: apunta que la superficie de plastificación tiende a disminuir en el sector opuesto al que se expande durante el endurecimiento (comportamiento cinemático).

Ley de endurecimiento isotrópico



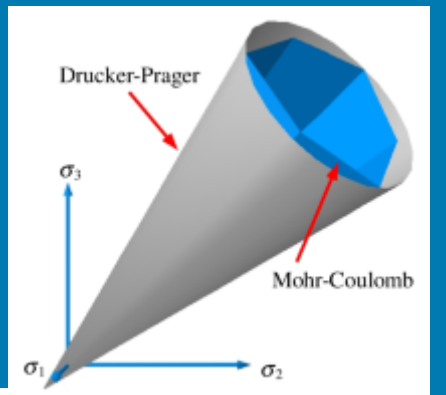
Historia de cargas

Ley de endurecimiento cinemático



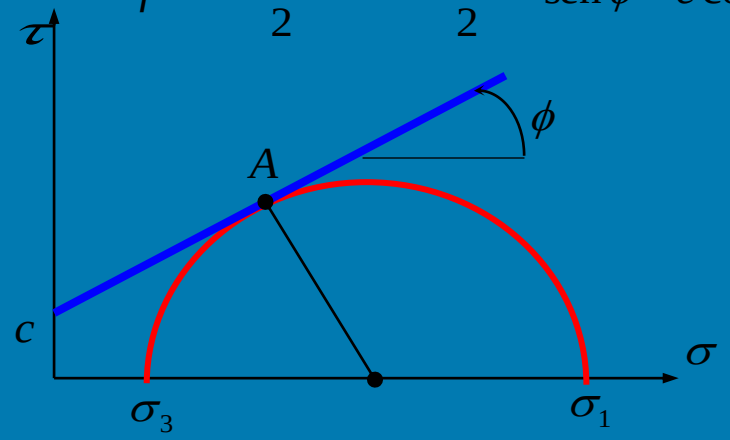
MODELO MOHR COULOMB

- Modelo elastoplástico perfecto: = La Ley de Hooke + Criterio de rotura;
- Criterio de ruptura incluye el efecto de la tensión esférica (p);
- Parámetros de fácil ajuste, con sentido físico;

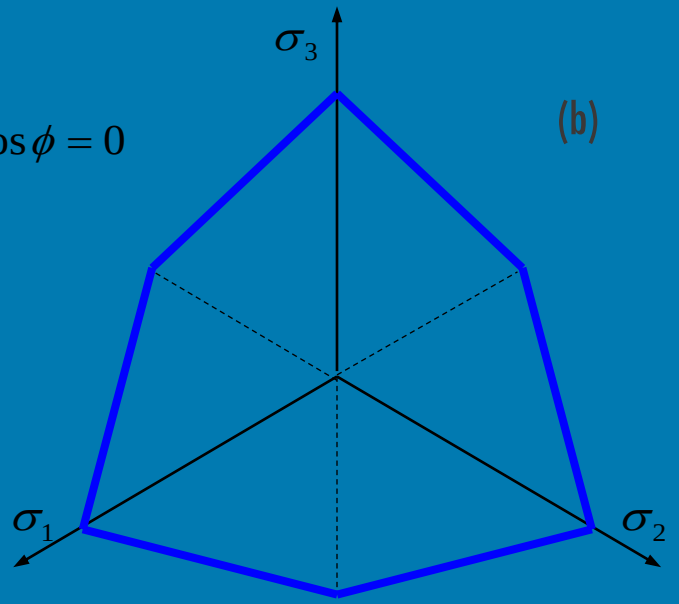


(a)

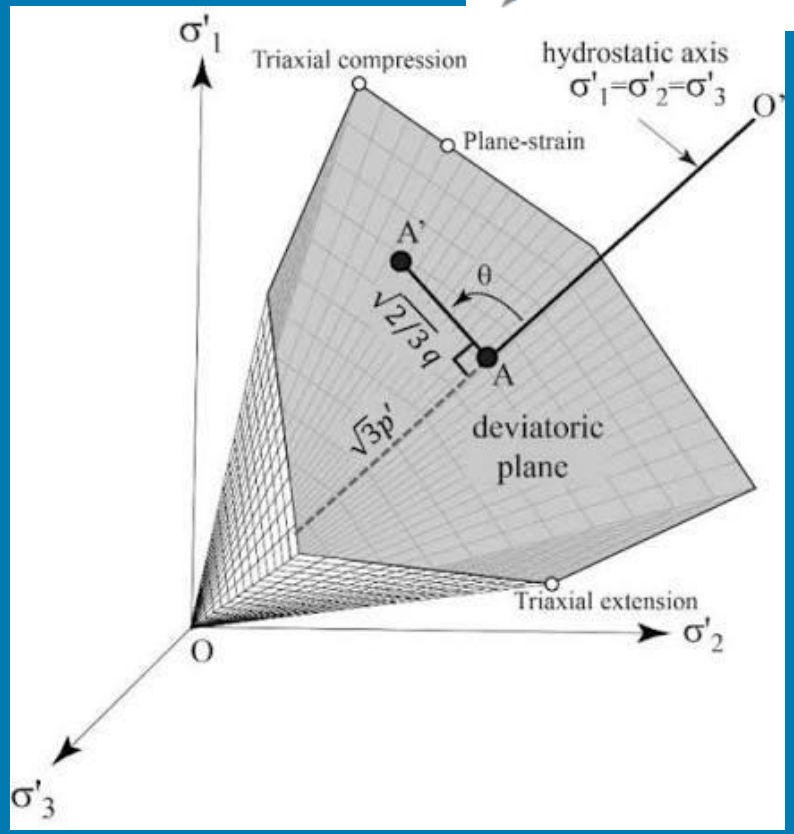
$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\,\text{sen}\,\phi - c\cos\phi = 0$$



(b)



Criterio de rotura Mohr-Coulomb: a) plano (σ-τ); b) plano octaédrico.



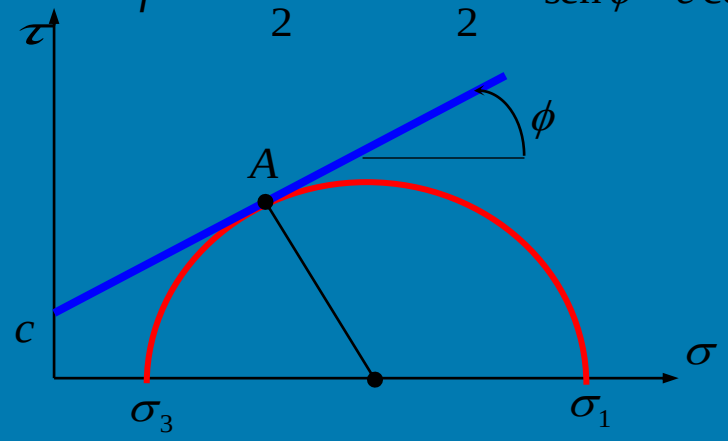
MODELO MOHR COULOMB

- Modelo elastoplástico perfecto: = La Ley de Hooke + Criterio de rotura;
- Criterio de ruptura incluye el efecto de la tensión esférica (p);
- Parámetros de fácil ajuste, con sentido físico;

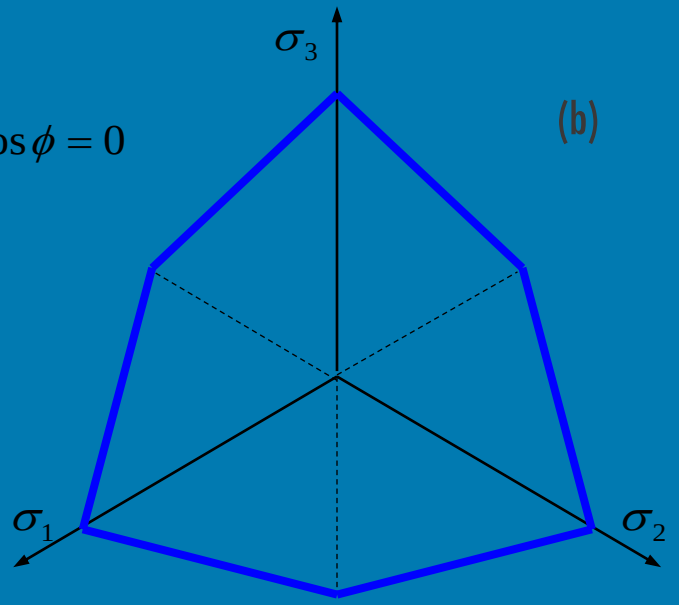
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
  - E: Módulo de Young (E_{30});
  - ν: Coeficiente de Poisson;
- PARÁMETROS DE RUPTURA
  - c: Cohesión;
  - ϕ: Ángulo de fricción interna;
- PARÁMETROS AVANZADOS
  - ψ: Ángulo de dilatancia;
  - Otros;

(a)

$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\operatorname{sen}\phi - c\cos\phi = 0$$



(b)



Criterio de rotura Mohr-Coulomb: a) plano (σ-τ); b) plano octaédrico.

- Incluye efecto de dilatancia;
- Diferente respuesta para compresión y extensión;
- No incluye el efecto de la tensión intermedia (σ2);

MODELOS CONSTITUTIVOS - RESUMEN

- Los modelos constitutivos idealizan la relación entre tensiones e deformaciones.
- Son un conjunto de ecuaciones y criterios relacionando las variables.
- Incluyen parámetros que conectan al modelo con el material específico.
- En suelos es relevante considerar la dilatancia y el "efecto acoplado".
- Por eso es útil hablar de estados y trayectorias isotrópica y de desvío.
- La elasticidad modela ciertas etapas del comportamiento del suelo.
- Es necesario utilizar modelos elastoplásticos incluyendo criterios de rotura.
- El comportamiento plástico puede ser perfecto o incluir endurecimiento o ablandamiento.
- La ley de endurecimiento – ablandamiento puede ser isotrópica o cinemática.