



# 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](mailto: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](mailto: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;**

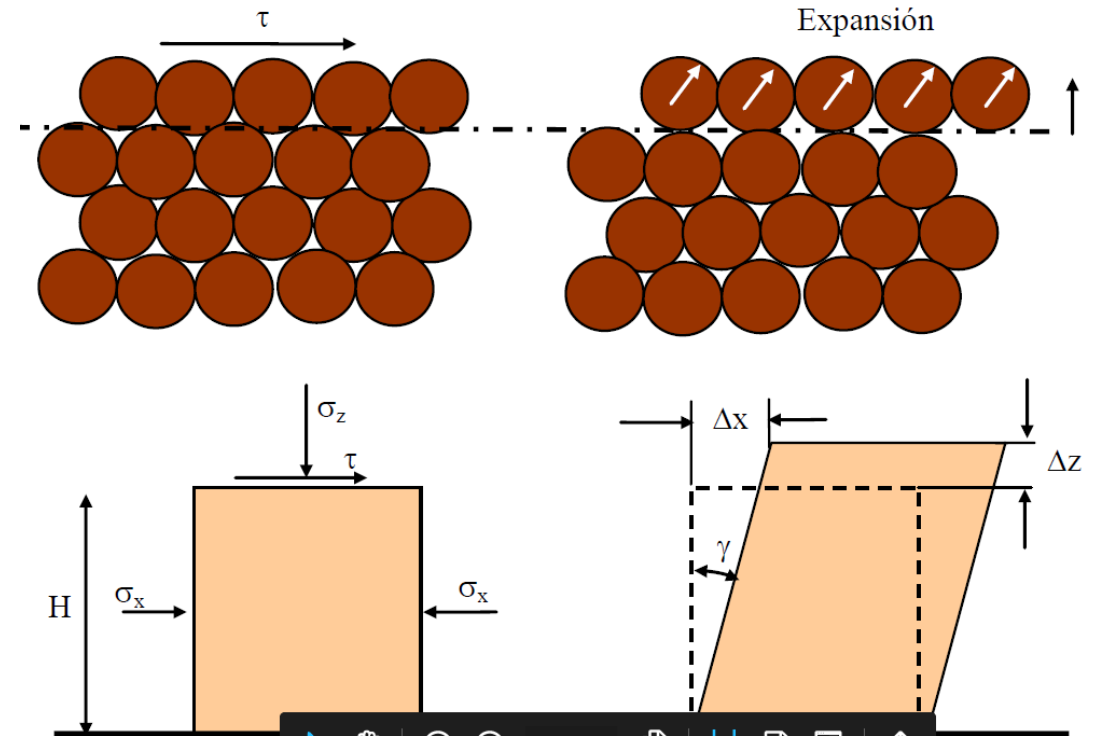
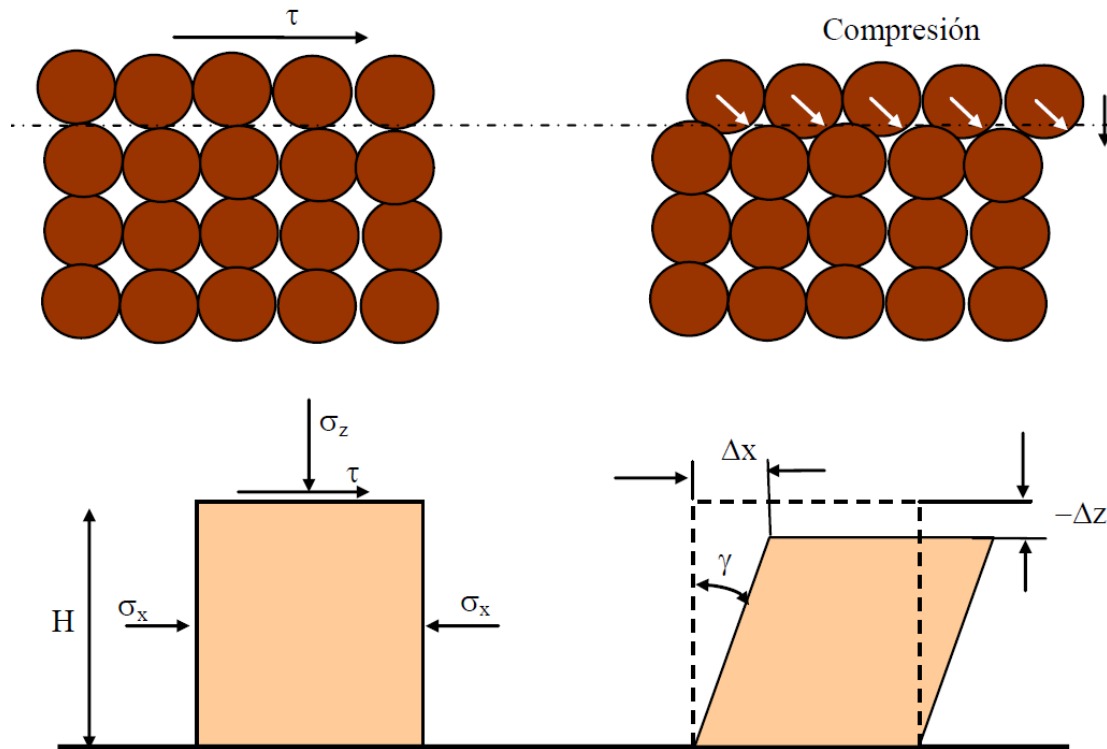
## DILATANCIA y CONTRACCIÓN:

DEFORMACIÓN  
VOLUMÉTRICA

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

DISTORSIÓN  
ANGULAR

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



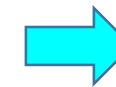
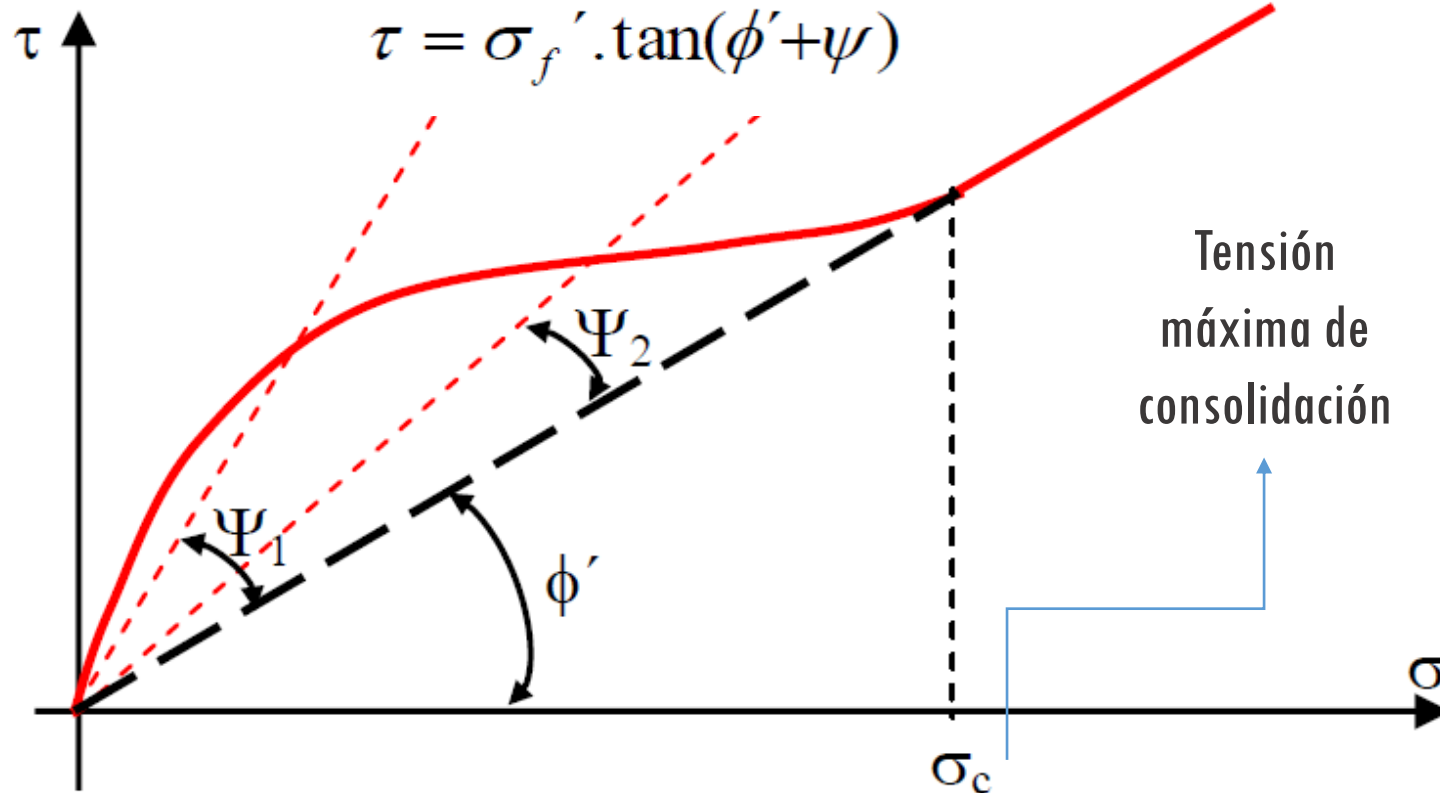
## DILATANCIA y CONTRACCIÓN:

DEFORMACIÓN  
VOLUMÉTRICA

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

DISTORSIÓN  
ANGULAR

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



Se producirá dilatación en arcillas preconsolidadas con  $OCR > 2$

## TENSOR (MATRIZ):

Ente matemático que es independiente de los ejes de referencia.

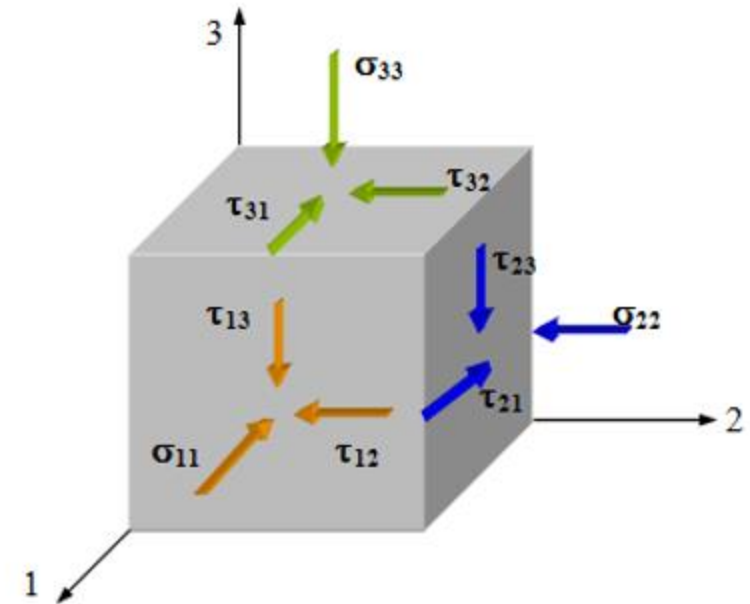
- Las constantes son tensores de orden "0".
- Los vectores son tensores de orden "1".
- Las matrices son tensores de orden "2".

## 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

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



$\sigma$  = Tensión normal  
 $\tau$  = 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.

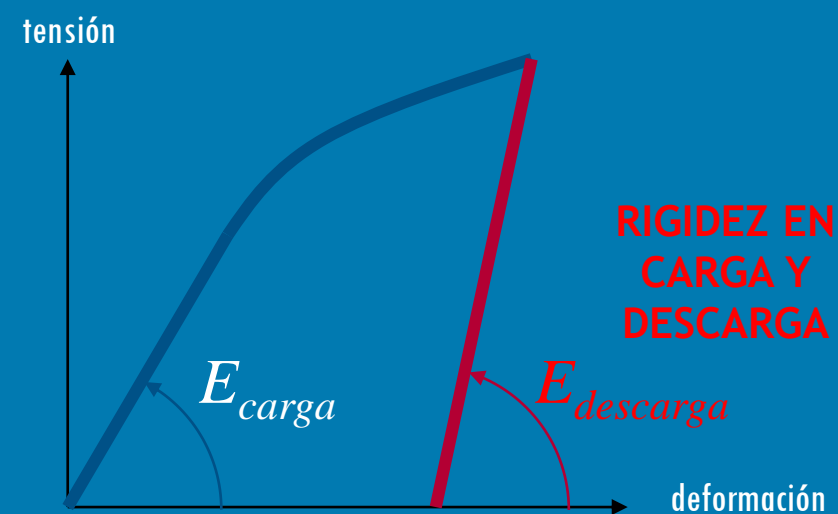
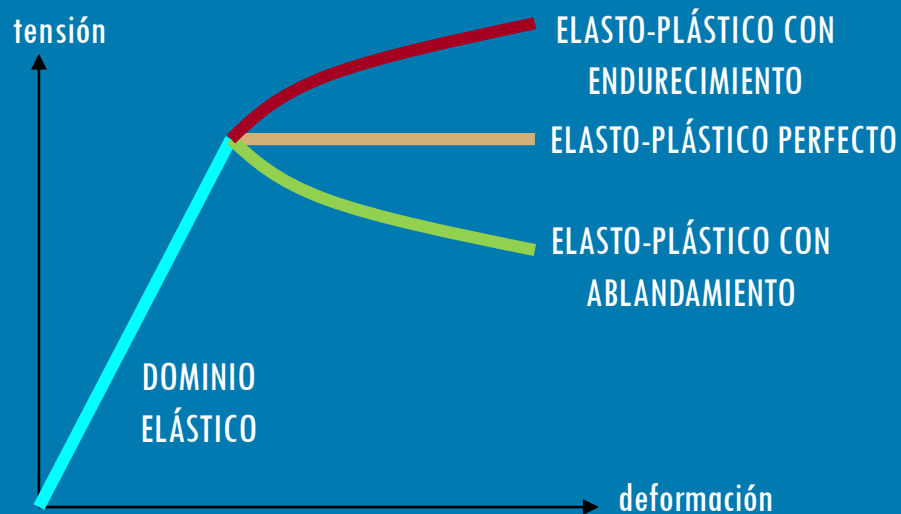
- Existen tensiones de corte (ej. *Desviador* del ensayo triaxial).
- Representa un estado que puede llevar a la rotura o plastificación.

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

$$T_\sigma = \underbrace{\begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix}}_{\text{HIDROSTATICO}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{11} - p & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} - p & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} - p \end{bmatrix}}_{\text{DESVIO}} \quad T_\varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_v \delta_{ij} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{HIDROSTATICO}} + \underbrace{\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}}_{\text{DESVIO}}$$

## 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:

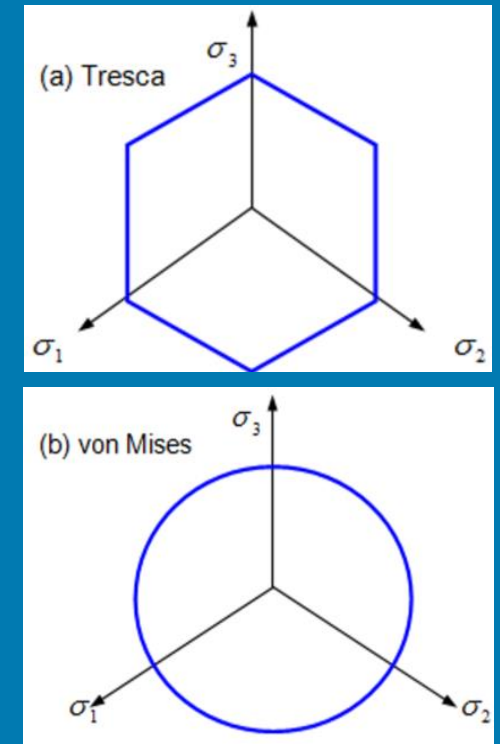
- El flujo plástico ocurre cuando la máxima tensión de corte alcanza el valor de la máxima tensión de corte que ocurre en el ensayo de tracción uniaxial;

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \pm \sigma_0 \quad \text{o} \quad \sigma_2 - \sigma_3 = \pm \sigma_0 \quad \text{o} \quad \sigma_3 - \sigma_1 = \pm \sigma_0$$

### 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.

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



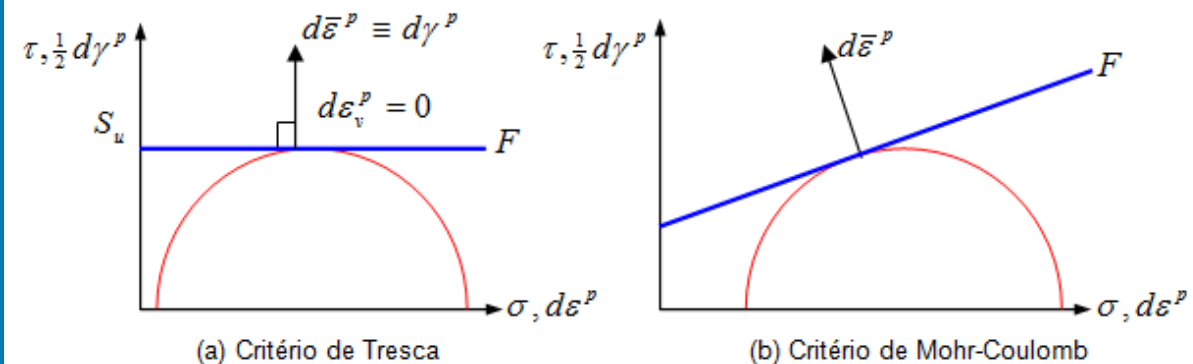
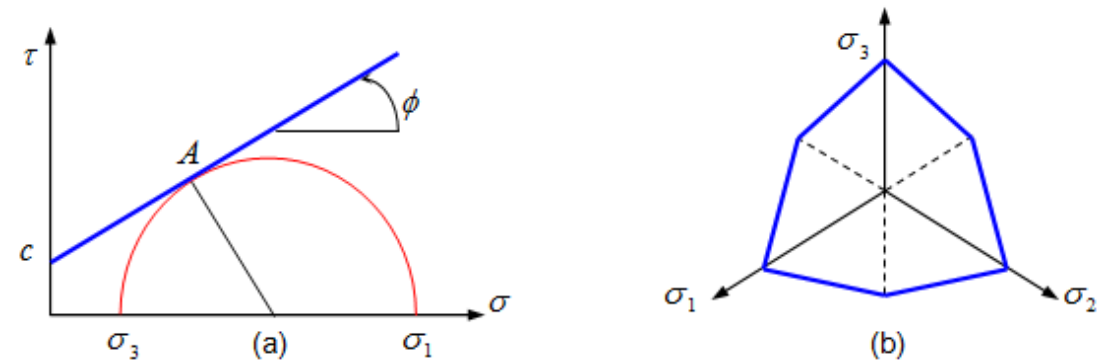
## CRITERIO DE ROTURA DE MOHR COULOMB

- 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

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

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



## TIPOS DE ENDURECIMIENTO PLÁSTICO

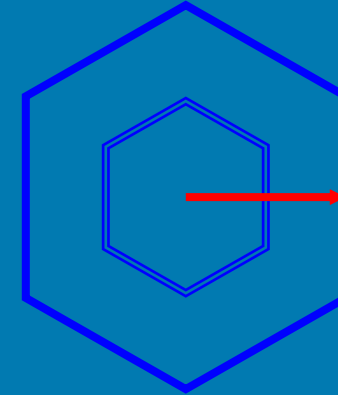
### ENDURECIMIENTO ISOTRÓPICO:

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

### ENDURECIMIENTO CINEMÁTICO:

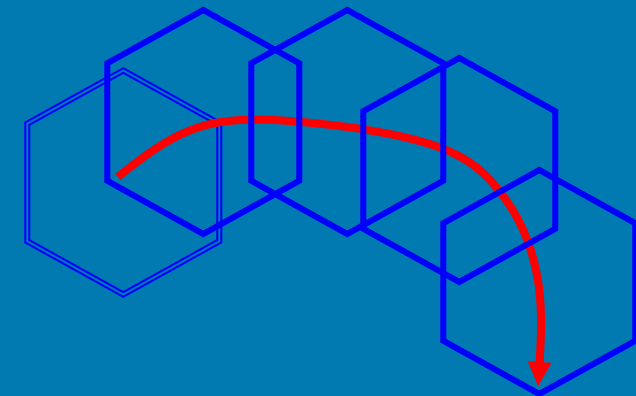
- La superficie de plastificación inicial se traslada según sea la historia de cargas y deformaciones, sin aumentar su tamaño.
- El dominio elástico permanece constante.
  - Efecto Bauchinger: apunta que la superficie de plastificación tiende a disminuir en el sector opuesto al que se expande durante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

### Ley de endurecimiento isotrópico



→ Historia de cargas

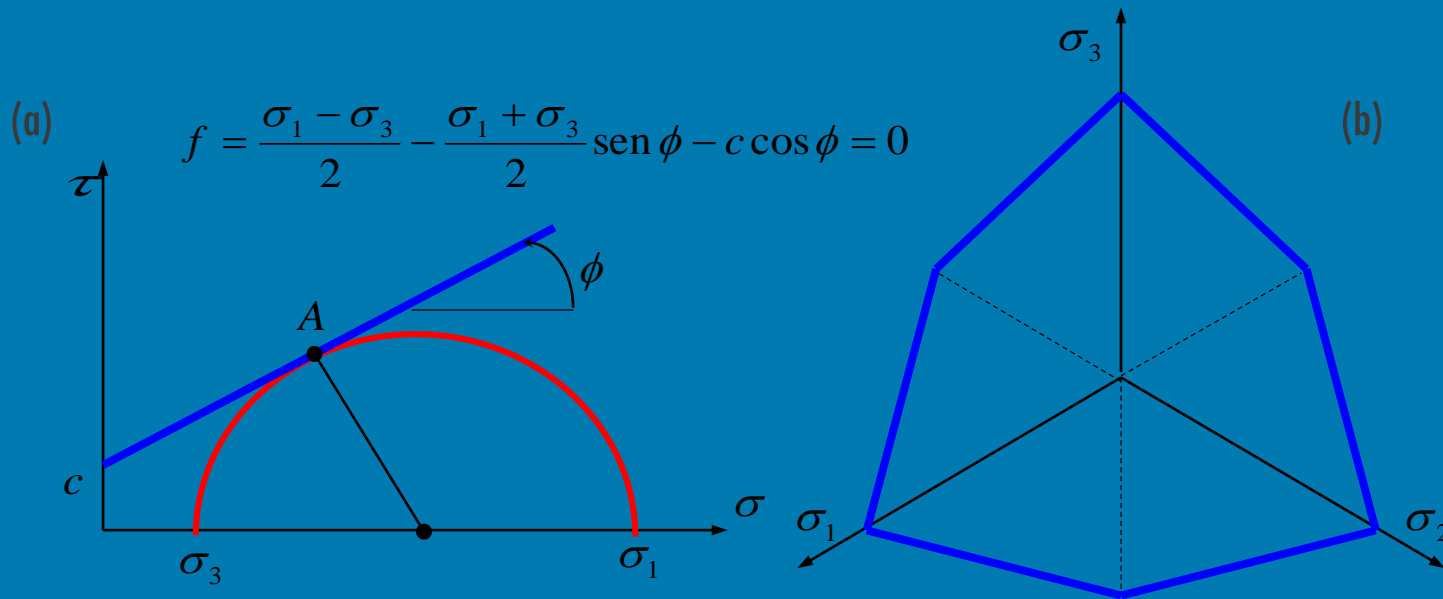
### Ley de endurecimiento cinemático



## 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;

- PARÁMETROS ELÁSTICOS
  - E: Módulo de Young ( $E_{30}$ );
  - $\nu$ : Coeficiente de Poisson;
- PARÁMETROS DE RUPTURA
  - c: Cohesión;
  - $\phi$ : Ángulo de fricción interna;
- PARÁMETROS AVANZADOS
  - $\psi$ : Ángulo de dilatancia;
  - Otros;



Criterio de rotura Mohr-Coulomb: a) plano ( $\sigma$ - $\tau$ ); b) plano octaédrico.

- Incluye efecto de dilatancia;
- Diferente respuesta para compresión y extensión;
- No incluye el efecto de la tensión intermedia ( $\sigma_2$ );

## 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.