

Geotecnia y Prospección Geofísica

Tema 4. Tensiones en el terreno



Jorge Cañizal Berini
Gema Fernández Maroto
Marina Miranda Manzanares

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ÍNDICE

- 4.1.** Introducción.
- 4.2.** Definición del estado tensional.
- 4.3.** Principio de tensión efectiva.
- 4.4.** Estado geostático. Historia tensional.
- 4.5.** Magnitudes representativas.
- 4.6.** Trayectoria de tensiones.

4.1. INTRODUCCIÓN

- La Geotecnia estudia el comportamiento mecánico (resistente y deformacional) de un terreno cuando sobre él actúan las solicitaciones producidas por una construcción.
- ¿Por qué interesa saber el **estado tensional** de un terreno?

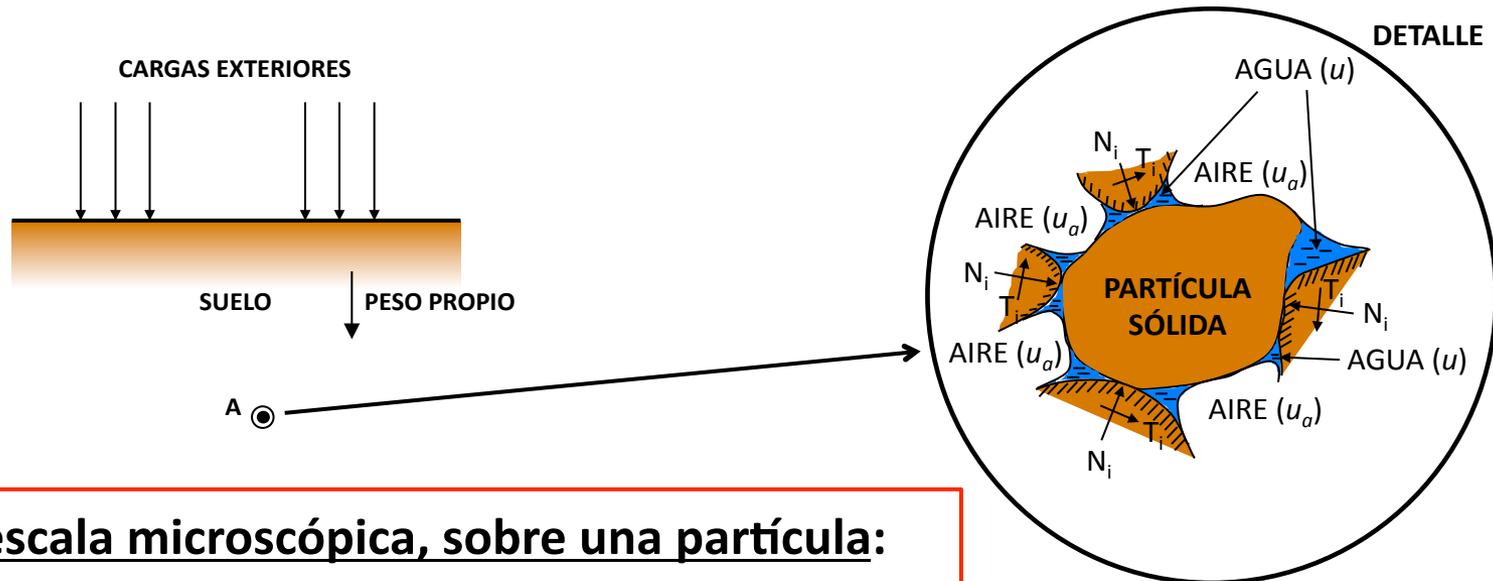


- Porque de los estados tensionales depende su comportamiento respecto a

{

Resistencias
Deformaciones.

4.2. DEFINICIÓN DEL ESTADO TENSIONAL



- A escala microscópica, sobre una partícula:

- Presiones agua, u .
- Presión aire, u_a .
- Fuerzas transmitidas por otras partículas: N_i , T_i .

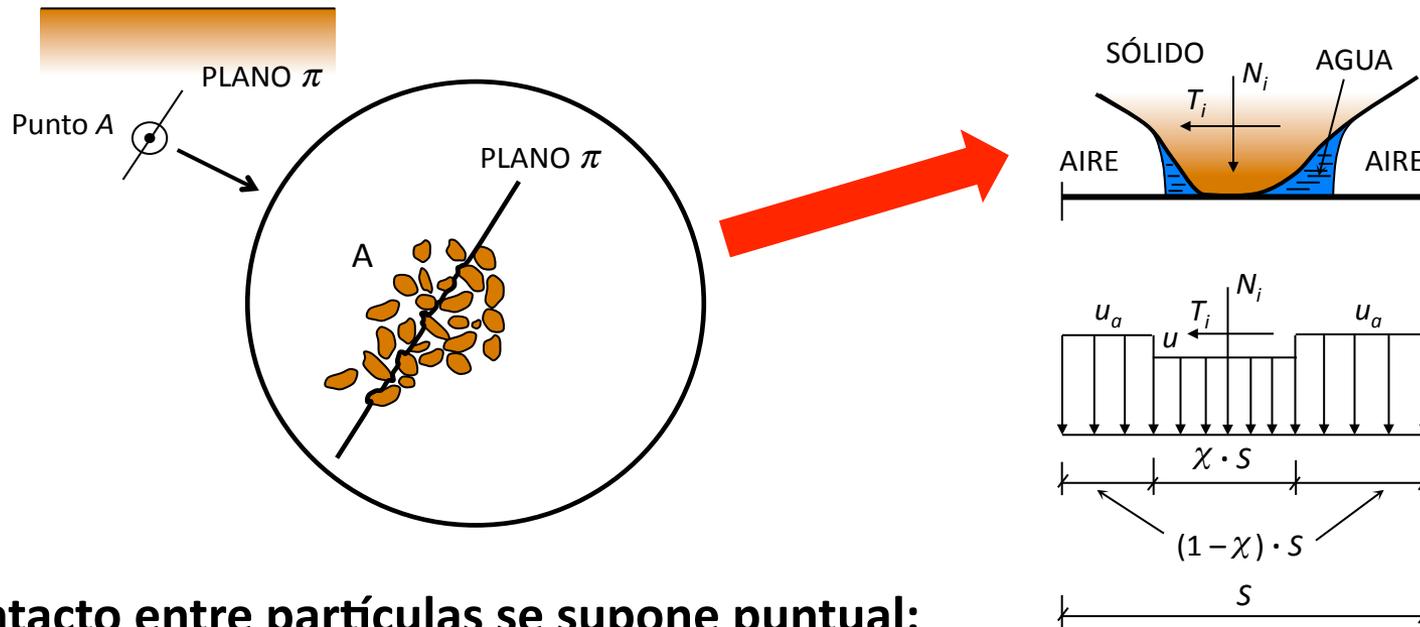
El terreno es un material discontinuo y trifase.

- Los problemas geotécnicos se analizan a escala macroscópica, asimilando:

Terreno \longrightarrow Material Continuo

4.2. DEFINICIÓN DEL ESTADO TENSIONAL

- En un medio continuo, la tensión sobre un plano es la fuerza que actúa en la unidad de superficie (con componentes normal σ y tangencial τ).



- El contacto entre partículas se supone puntual:**

$$\sigma = \frac{\Sigma \text{Fuerzas normales}}{\text{Superficie total}} = \frac{N_i + u \chi S + u_a (1 - \chi) S}{S} = \sigma_i + \chi u + (1 - \chi) u_a$$

$$\tau = \frac{\Sigma \text{Fuerzas tangenciales}}{\text{Superficie total}} = \frac{T_i}{S} = \tau_i$$

Tensión intergranular.

4.2. DEFINICIÓN DEL ESTADO TENSIONAL

- Despejando la tensión intergranular y reagrupando:

$$\sigma_i = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a - u)$$

$$\tau_i = \tau$$

- Donde llamamos:
 - σ → Tensión total.
 - u → Presión intersticial del agua.
 - u_a → Presión intersticial del aire.
 - χ → Fracción de superficie ocupada por el agua.

- Suelo seco:**

$$\chi = 0$$

y u_a igual a la atmosférica ($u_a = 0$).



$$\sigma_i = \sigma$$

$$\tau_i = \tau$$

- Suelo saturado:**

$$\chi = 1$$



$$\sigma_i = \sigma - u$$

$$\tau_i = \tau$$

4.3. PRINCIPIO DE TENSION EFECTIVA

- Debido a que el terreno es un sistema trifase, en un caso general tenemos cuatro tensiones normales sobre un plano:

$$\sigma \quad \sigma_i \quad u \quad u_a$$

y sólo una relación que las una, por lo que tres de ellas son independientes entre sí.

- **Tensión efectiva es la que gobierna el comportamiento mecánico del terreno:**

Aquella tensión cuya variación y sólo su variación produce deformación e influye en la resistencia.

Tensión efectiva (σ' , τ')



- ¿Es alguna de las anteriores?
- ¿Es una relación entre algunas de ellas?
- ¿Es una relación entre todas ellas?
- ¿Cuál es dicha relación?

4.3. PRINCIPIO DE TENSIÓN EFECTIVA

• **Suelo seco:**

Sólo una tensión normal.

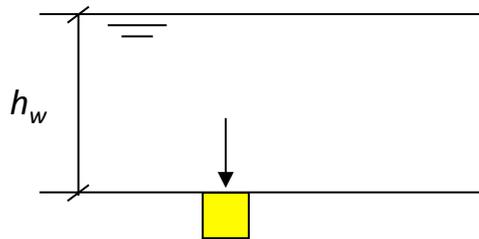
$$\sigma' = \sigma_i = \sigma$$

$$\tau' = \tau_i = \tau$$

• **Suelo totalmente saturado:**

- Tres tensiones normales:
- Tensión total (σ).
 - Tensión intergranular (σ_i).
 - Presión intersticial (u).

• **Dos hechos observables:**



Arena fondo del mar.



Arena húmeda (agua capilar).

4.3. PRINCIPIO DE TENSION EFECTIVA

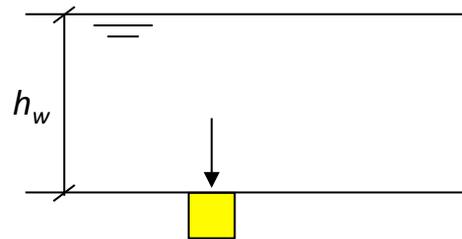
- Terzaghi (1925), con base experimental, plantea la siguiente hipótesis:

LA TENSION EFECTIVA ES LA INTERGRANULAR

$$\sigma' = \sigma_i = \sigma - u$$

$$\tau' = \tau_i = \tau$$

- ¿Reproduce adecuadamente los dos casos observados?



Arena fondo del mar.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = \gamma_w \cdot h_w \\ u = \gamma_w \cdot h_w \end{array} \right\} \sigma' = \sigma - u = 0$$



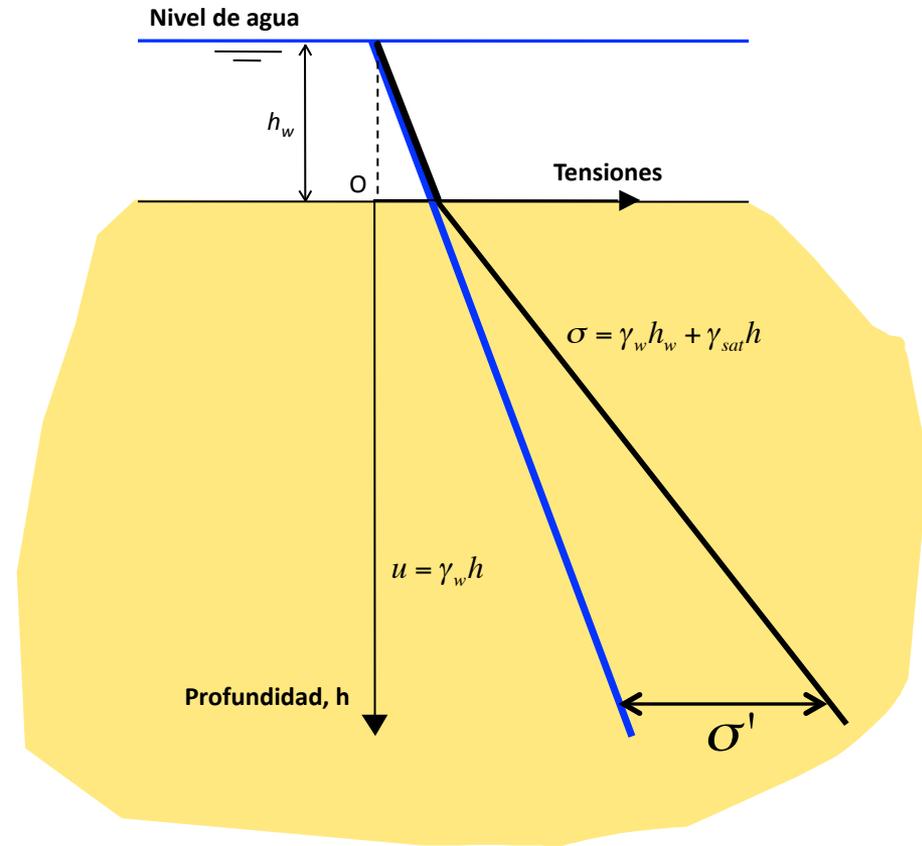
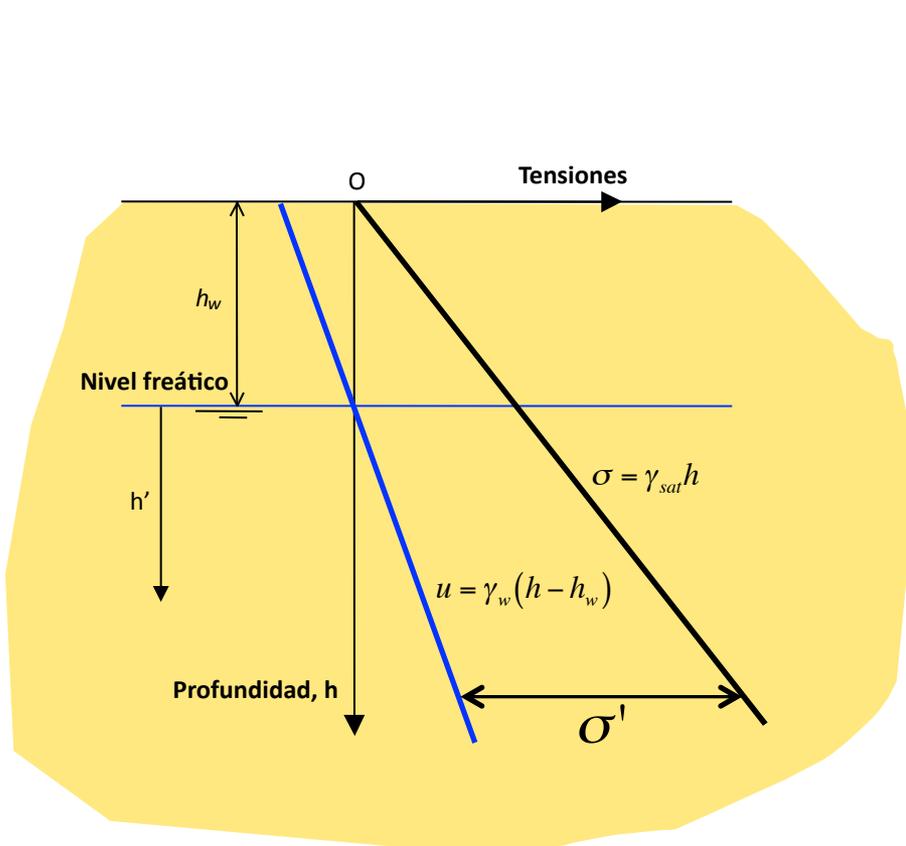
Arena húmeda (agua capilar).

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = 0 \\ u < 0 \end{array} \right\} \sigma' = \sigma - u > 0$$

4.3. PRINCIPIO DE TENSION EFECTIVA

Tensión efectiva

$$\sigma' = \sigma - u$$



4.3. PRINCIPIO DE TENSION EFECTIVA

- En suelos parcialmente saturados:

Interviene la presión del aire y la fracción de poros ocupada por el agua. Bishop (1959) identifica también la presión efectiva con la intergranular:

$$\sigma' = \sigma_i = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a - u)$$

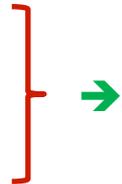
$$\tau' = \tau_i = \tau$$

Esta hipótesis es adecuada para el análisis de la resistencia, pero no para el análisis de la deformabilidad.

- En rocas:

- Roca matriz:

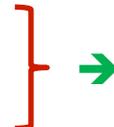
- En general semisaturadas.
- Contactos entre partículas no pueden considerarse puntuales.



No es válido el principio de la tensión efectiva.

- Roca matriz:

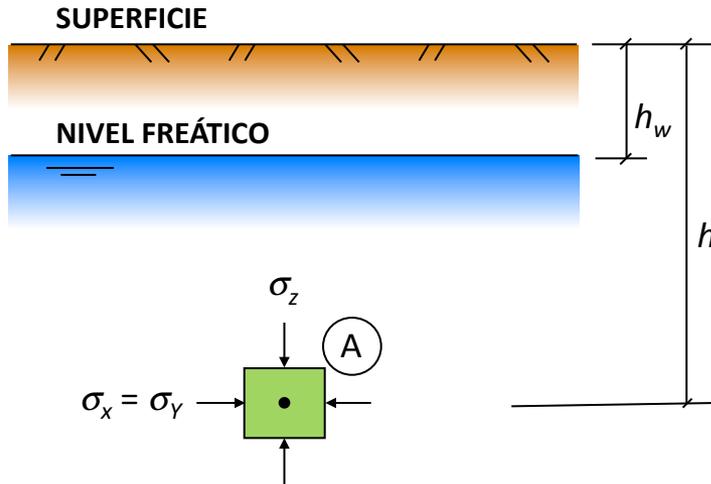
- Si están rellenas → Comportamiento como suelo.
- Si están limpias → Contactos puntuales.



Válido el principio de la tensión efectiva.

4.4. ESTADO GEOSTÁTICO. HISTORIA TENSIONAL

- **Importancia del estado geostático** (tensiones iniciales o de peso propio):
 - A ellas se han de superponer las tensiones producidas por la construcción de una obra en el terreno.
 - Las tensiones iniciales influyen en el comportamiento del terreno.



TENSIONES EN A:

Tensión vertical total y presión intersticial

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i = \int_0^h \gamma dh$$

$$u = \gamma_w (h - h_w)$$

Tensión efectiva vertical (Terzaghi)

$$\sigma'_z = \sigma_z - u$$

Tensión efectiva horizontal

$$\sigma'_x = \sigma'_y = K_0 \cdot \sigma'_z$$

Tensión total horizontal (Terzaghi)

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma'_x + u = \sigma'_y + u$$

Simetría

$$\tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

4.4. ESTADO GEOSTÁTICO. HISTORIA TENSIONAL

Coefficiente de empuje en reposo

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{\sigma'_x}{\sigma'_z}$$

- **Historia tensional del terreno** (σ'_h depende de σ'_v actual y del pasado):
 - σ'_{z0} , valor actual de la tensión efectiva vertical, σ'_z , o presión de consolidación.
 - σ'_c , máximo valor de σ'_z a lo largo de la historia, llamada presión de sobreconsolidación (o de preconsolidación).
- **Razón de sobreconsolidación** (suelos N.C., suelos S.C.):
 - Suelos normalmente consolidados (RSC = 1).
 - Suelos sobreconsolidados (RSC > 1).

$$RSC = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z0}}$$

4.4. ESTADO GEOSTÁTICO. HISTORIA TENSIONAL

Coefficiente de empuje en reposo

- Si el terreno fuera un material elástico:

$$K_0 (\text{elástico}) = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

- Pero, en general, no se comporta como tal: ¿ K_0 ?

- Mediciones in situ: muy complicadas, sólo en casos singulares
- Correlaciones estadísticas:

$$K_{0NC} = 1 - \text{sen}\phi$$

(Jáky, 1944), para arenas,
 ϕ ángulo rozamiento interno.

$$K_{0NC} = 0,44 + 0,42 \cdot IP$$

(Massarch, 1979), en arcillas,
 IP en tanto por uno.

$$K_0 = K_{0NC} \cdot (RSC)^\alpha$$

(Schmidt, 1966), suelos sobreconsolidados,
 α entre 0,25 y 0,60.

4.5. MAGNITUDES REPRESENTATIVAS

• Estados tensionales:

- Tensión total (σ_{ij}).
- Presión intersticial (u_{ij}), es isótropo ($u_{ij} = u\delta_{ij}$).
- Tensión efectiva (σ'_{ij}).

$$\begin{bmatrix} \sigma'_x & \tau'_{xy} & \tau'_{xz} \\ \tau'_{xy} & \sigma'_y & \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} & \tau'_{yz} & \sigma'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x - u & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u \end{bmatrix}$$

7 parámetros para definir el estado tensional: $\sigma_{ij} + u$

4.5. MAGNITUDES REPRESENTATIVAS

• Tensiones principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$): $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$; $\sigma'_i = \sigma_i - u$

• Tensiones octaédricas (σ_{oct}, τ_{oct}):

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}$$

$$\sigma'_{oct} = \sigma_{oct} - u$$

$$\tau'_{oct} = \tau_{oct}$$

• Parámetros de Lambe:

$$p = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)$$

$$p' = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_3) = p - u$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3) = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)$$

4.6. TRAYECTORIAS DE TENSIONES

- En un proceso de carga (o de descarga), las tensiones en un punto van variando al hacerlo las fuerzas externas.
- En cada fase del proceso el estado tensional viene representado por alguna de las magnitudes anteriores.

- **Trayectoria de tensiones:**

Es la curva formada por los puntos representativos de los sucesivos estados tensionales a lo largo del proceso de carga o descarga.