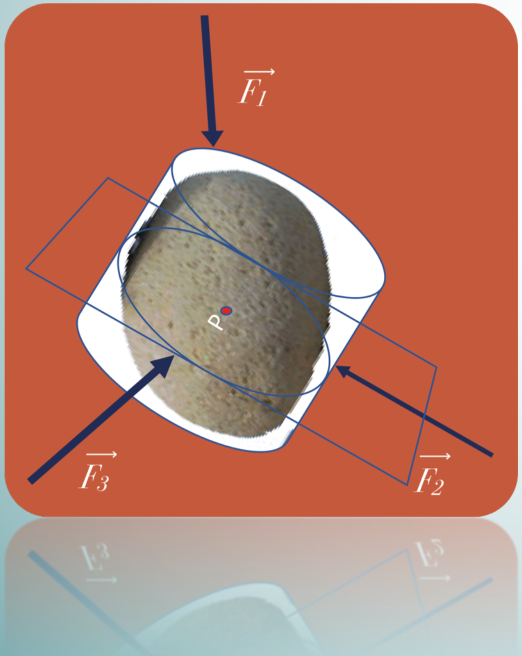
Caracterización geomecánica de suelos y rocas

Tema 2.1 Presiones



Alberto González Díez

Patricio Martínez Cedrún

DPTO. DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA (CITIMAC)

Presión litostática

Presión litostática: es la carga que ejerce una roca con una densidad, longitud vertical y sección determinada

Presión litostática

Presión litostática: es la carga que ejerce una roca con una densidad, longitud vertical y sección determinada

Para determinar esta presión sabemos que:

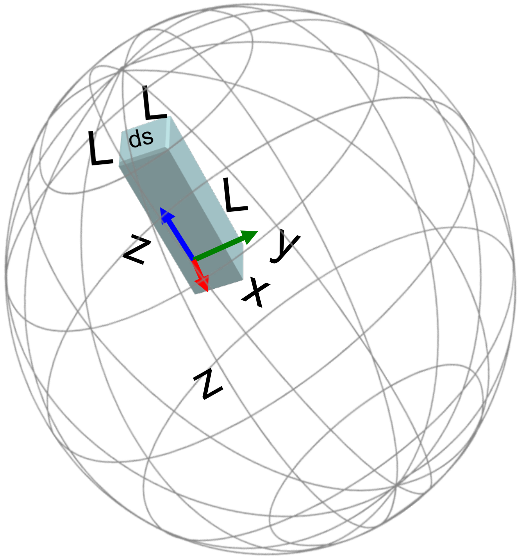
$$\text{Presión} = \frac{Fuerza}{superficie} = \text{Tensión}$$

En esta asignatura a la presión se la llama Tensión

En este caso la fuerza que actúa es el peso

- Como el peso de la columna es $\mathrm{P} = m \cdot g$
  - La masa es igual a $\mathrm{m} = \rho \cdot V$,
  - El Volumen lo podemos descomponer en superficie (L^2) x altura (L)
  - ahora sustituyendo tenemos $m=\rho*L^2*L$

Si tomamos una columna de roca de dimensión infinitesimal ds



la presión litostática (esfuerzo) $\sigma=F/s$

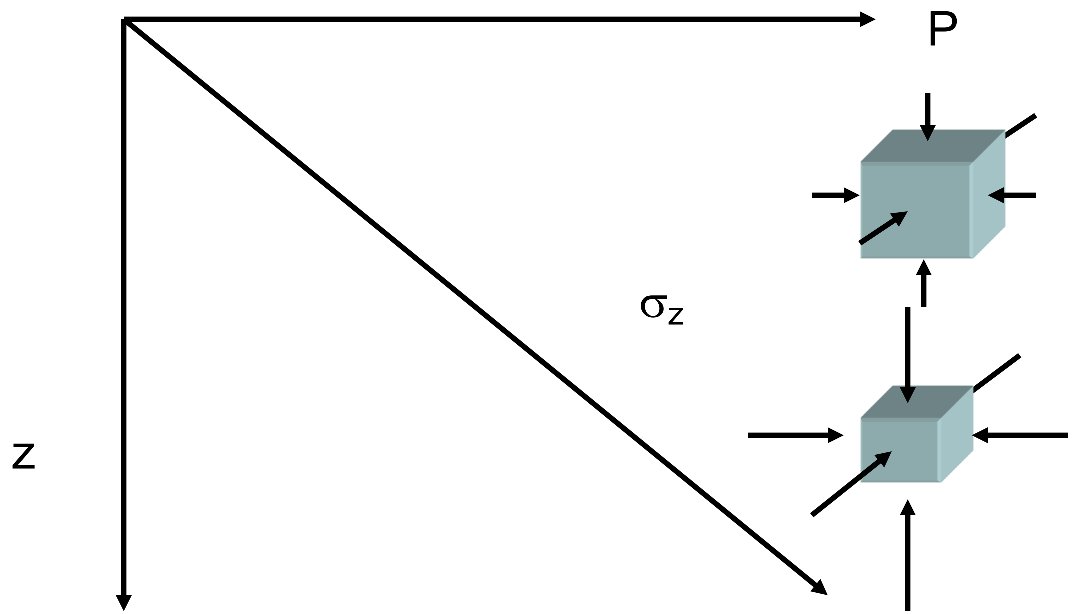
$\sigma_{zz}*ds=\rho*z*g*ds$

$\sigma_{zz} =\rho*z*g$

El esfuerzo o presión litostática, σ_{zz} ejercida en un medio cerrado en ausencia de esfuerzos tectónicos, se define como el peso de la columna de roca de densidad (ρ) a una profundidad (z)

$$\sigma_{zz} = \int_0^z \rho * g * z \, \partial s$$

La presión confinante es función de la profundidad



Supone un esfuerzo de carácter hidrostático, se ejerce sobre todas las caras del cuerpo considerado

Con el fin de comprender bien las dimensiones de esta expresión supongamos que queremos conocer las condiciones de presión confinante a una determinada profundidad

Unidades mas utilizadas

El **pascal** (símbolo **Pa**) es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma. (http://es.wikipedia.org/wiki/Pascal_(unidad)). N/m^2

El **bar** es una unidad de presión equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera (1 atm). Su símbolo es «bar». La palabra «bar» tiene su origen en «*báros*» (*βάρος*), que en griego significa «peso». http://es.wikipedia.org/wiki/Bar_(unidad_de_presi%C3%B3n)

El kilopascal (kPa) es una unidad de presión que equivale a 1 000 pascales.
El hectopascal (hPa) es una unidad de presión que equivale a 100 pascales.
1 bar = 1 000 000 barias = 10^6 barias
1 bar = 100 000 pascales = 10^5 pascales

El megapascal (MPa), esto es 10^6, equivale al N/m^2. Se utiliza generalmente para cálculo de cimentaciones y secciones resistentes en estructuras, donde las resistencias suelen darse en N/mm^2 y las tensiones o esfuerzos sobre el terreno en MPa.

Equivalencias para memorizar

- 1 MPa = 1 000 000 Pa
- 1 bar = 100 000 Pa 1 MPa = 10 bar

- 1 bar = 1 000 hPa
- 1 bar = 100 kPa 1GPa=1 000 000 000 Pa=10 000 Bar

- 1 MPa = 1 000 000 Pa =1 000 000 N/m^2=1 000 000 N/m^2 * 10 000 (cm^2/m^2)=100N/cm^2=10,20kg/cm^2
- 1Kgf = 9.8 N
- 1 bar = 100 kPa = 100 kN/m^2 = 1,1972 kgf/cm^2

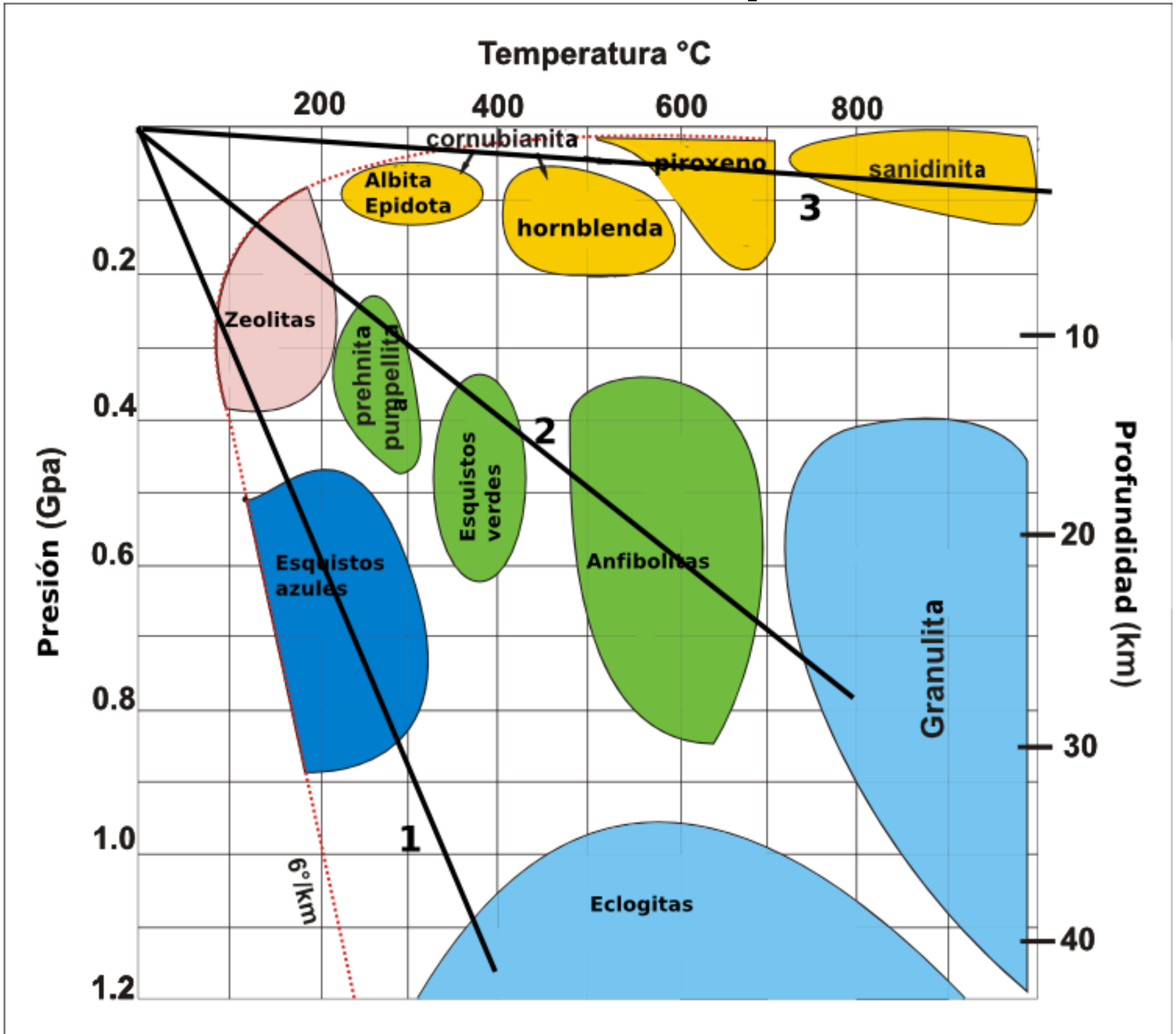
Otras unidades

$1\ Pa = 1 N/m^2$

$1\ bar = 10^5\ Pa = 10^5\ N/m^2 = 10\ N/cm^2 = 10\ N/100\ mm^2 = 0,1\ N/mm^2$

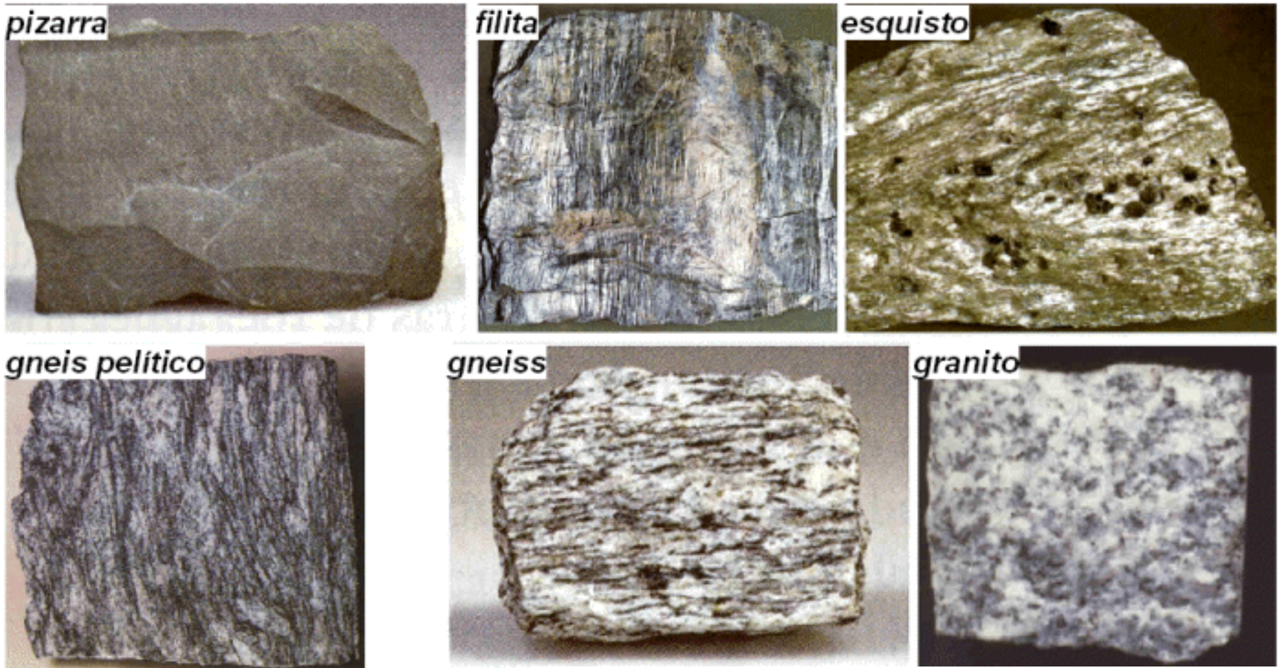
$1\ N/mm^2 = 10\ bar = 1\ MPa$

El mundo de las presiones

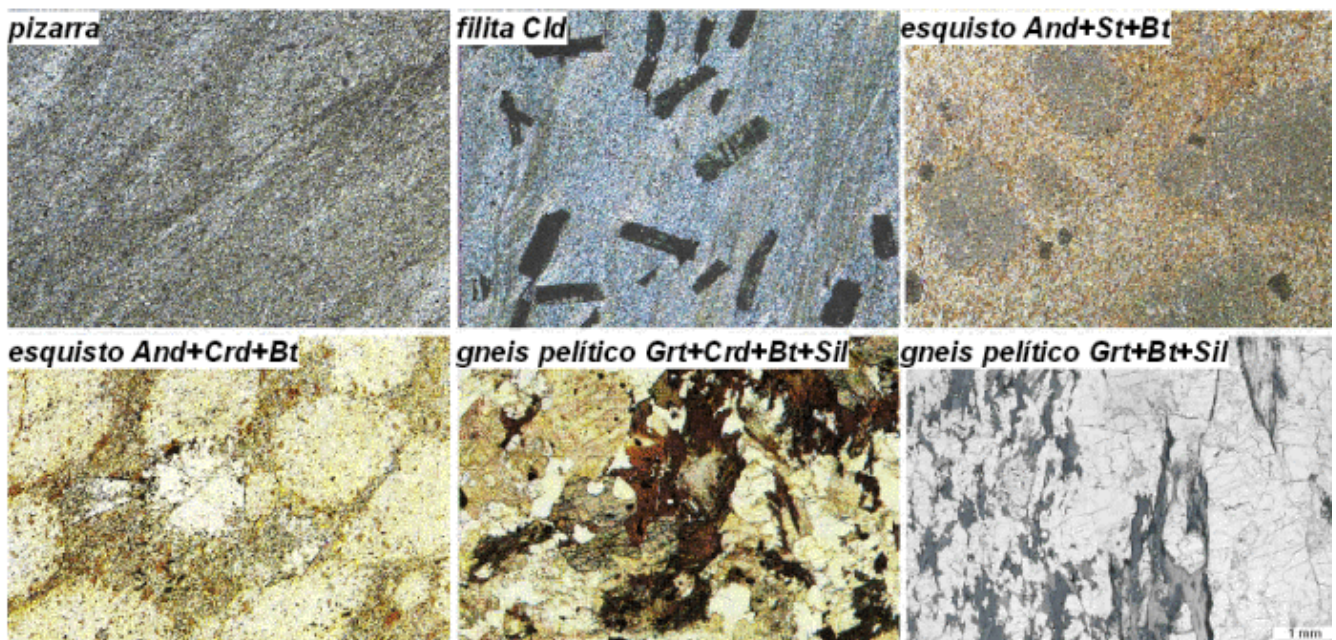


Facies	Mineral o asociación mineral diagnóstico
Zeolitas	**Zeolitas**, como laumontita y heulandita (silicatos cálcicos diagnósticos en lugar de prehnita, pumpellyita, o epidota)
Sub-esquistos verdes	**Prehnita+pumpellyita**, **prehnita+actinolita**, **pumpellyita+actinolita** (prehnita y pumpellyita son los silicatos cálcicos diagnósticos en lugar de zeolitas o epidota
Esquistos verdes	**Actinolita+albita+clorita+epidota+cuarzo** (epidota es el silicato cálcico diagnóstico en lugar de zeolitas, prehnita, pumpellyita)
Anfibolitas con epidota	**Hornblenda+albita+epidota** ±clorita ± granate
Anfibolitas	**Hornblenda+plagioclasa** (Xan > 0.17) ±granate ±cummingtonita ±cpx diopsídico
Granulitas	**Clinopiroxeno augítico + ortopiroxeno + plagioclasa** ± granate ±pargasita ±cuarzo (olivino no estable con plagioclasa: P intermedia)
Esquistos Azules	**Glaucofana+albita+clorita (±lawsonita ±epidota)** ±granate ± actinolita ±paragonita ±fengita ±onfacita (**albita estable**)
Eclogitas	**Onfacita+granate** ±lawsonita, ±glaucofana, ±barroisita, ±epidota, ±distena (**albita no estable**)
Corneanas de Albita-Epidota	**Actinolita +albita+epidota+clorita+cuarzo**
Corneanas hornbléndicas	**Hornblenda+plagioclasa** ±anfiboles Fe-Mg (antofilita, gedrita, cummingtonita) ±cpx diopsídico + cuarzo
Corneanas piroxénicas	**Clinopiroxeno augítico + ortopiroxeno + plagioclasa + olivino** o cuarzo (Ol+Pl: P baja)
Sanidinitas	**Clinopiroxeno augítico + ortopiroxeno + plagioclasa + olivino** (Ol+Pl: P baja) con variedades de muy alta temperatura como pigeonita y labradorita rica en K

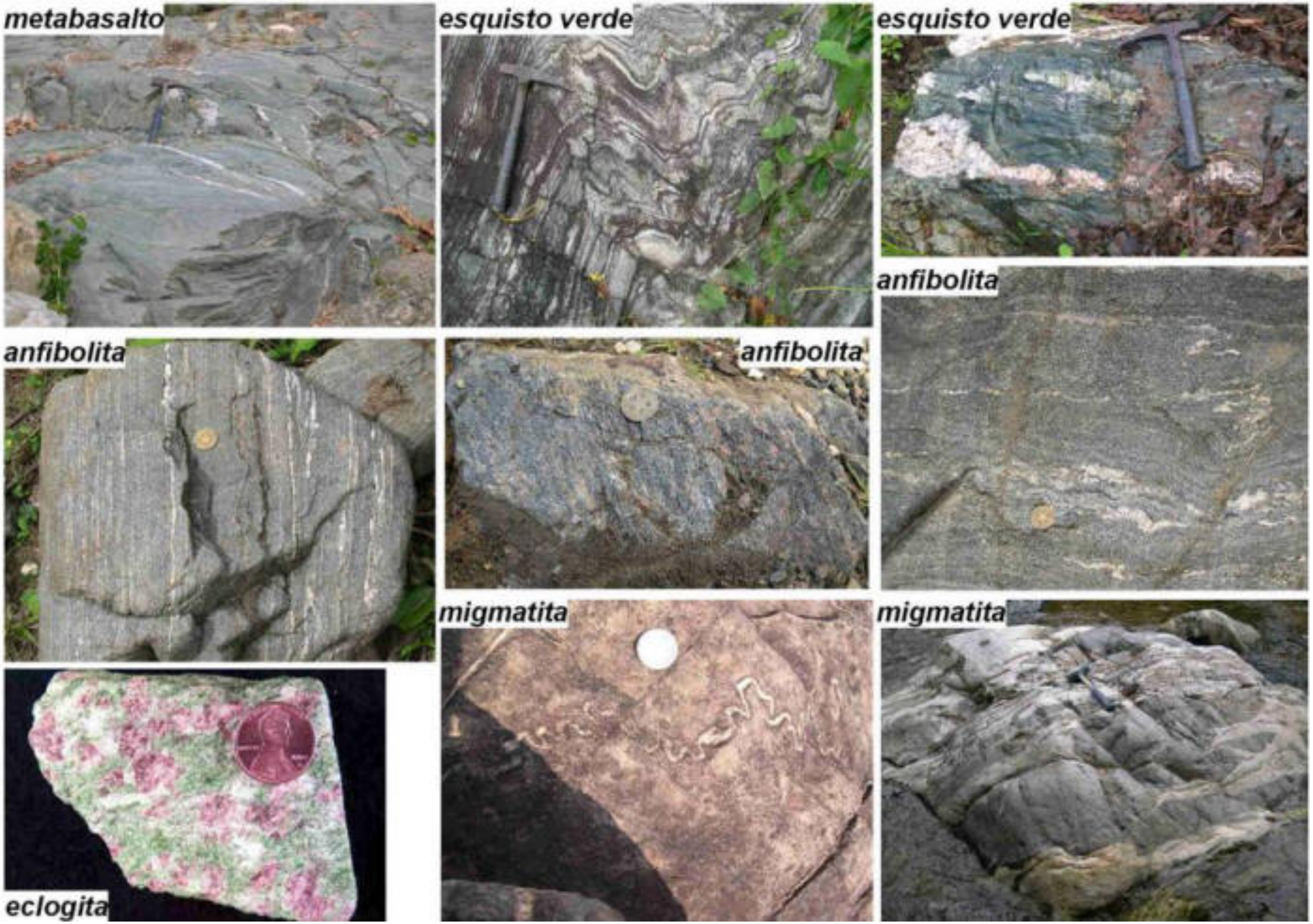
Recristalización metamórfica en metapelitas y gneises



Recristalización metamórfica en metapelitas



Recristalización metamórfica en metabasitas



Presión hidrostática

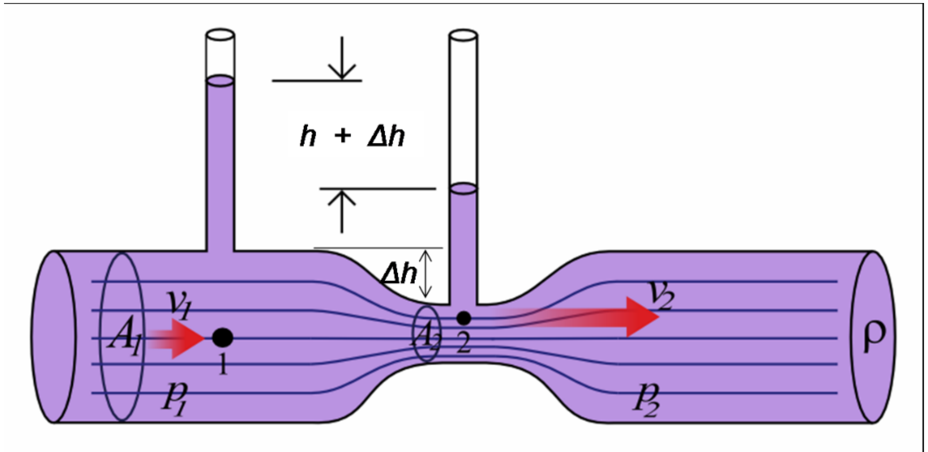
La **presión hidrostática** es la parte de la **presión** debida al peso de un fluido en reposo.

Presión de un fluido

Para explicar este concepto hay que utilizar el principio de Bernoulli

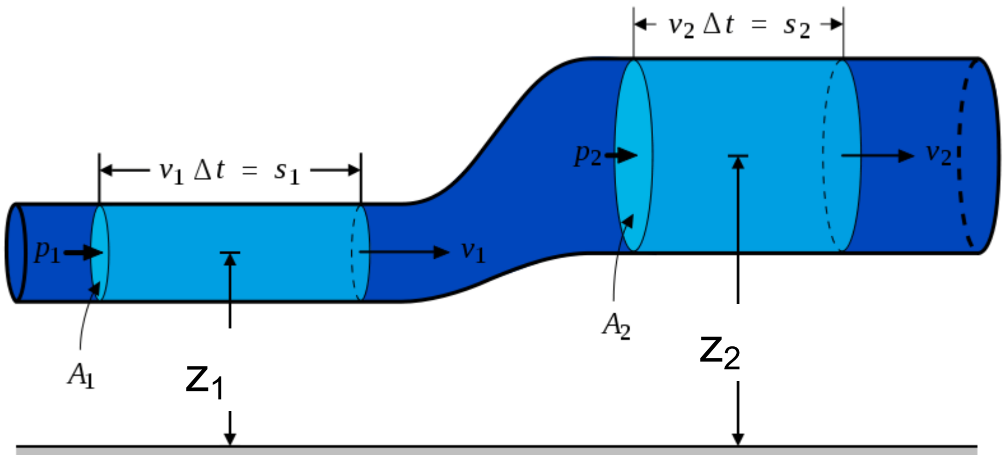
$$\frac{\rho V^2}{2} + P + \rho g z = Cte$$

donde:
V = velocidad del fluido en la sección considerada.
P = presión a lo largo de la línea de corriente.
ρ = masa del agua
z = altura en la dirección de la gravedad (g) desde una cota de referencia.
Hay que tener en cuenta que la viscosidad (Fricción interna)=0
Caudal constante, flujo incomprensible y laminar



Supongamos que tenemos un fluido ideal, perfecto e incomprensible, sujeto a un flujo permanente y estacionario: En este caso Bernouilli demostró que la carga hidráulica total se mantiene constante. Así, entre dos puntos cualesquiera del fluido en movimiento se mantiene la energía global dada por la carga H, y lo único que ocurre es que dicha energía se transfiere de unos términos a otros (altura geométrica, de presión o velocidad).

$$\frac{V^2}{2g}+\frac{P}{\gamma_a}+z=H$$



El **principio de Bernoulli**, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente.

Un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

-Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
-Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.
-Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.

La siguiente ecuación conocida como "Ecuación de Bernoulli" (Trinomio de Bernoulli) consta de estos mismos términos.

$$\frac{m_a V^2}{2} + P + m_a g z = \Phi = \text{cte}$$

Energía cinética+presión de agua+ energía potencial=constante

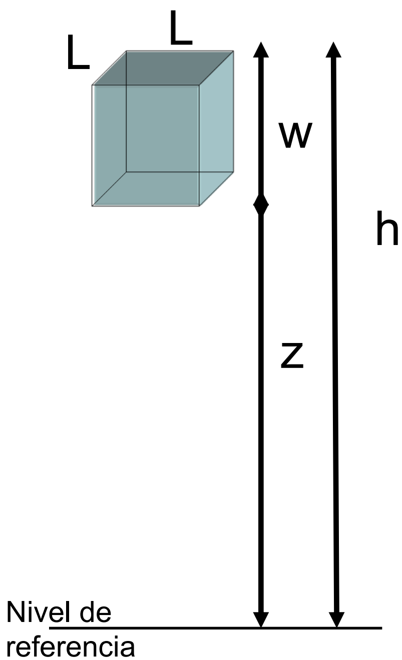
donde:

Φ=carga hidráulica
V = velocidad del fluido en la sección considerada.
m_a *o* (m_w) = masa del agua
z = altura en la dirección de la gravedad (g) desde una cota de referencia.
P = presión a lo largo de la línea de corriente.
ρa = densidad de agua del fluido.
g= gravedad

$$\frac{\rho V^2}{2} + P + \rho g z = Cte$$

$$\frac{\rho V^2}{2} \to 0$$

$$P + \rho g z = Cte$$



Consideremos un volumen unidad de agua (superficie unidad por altura unidad) de densidad ρ, en un punto del espacio situado a una altura z respecto a un nivel de referencia, **y estático.**

Ese cuerpo de agua tiene energía potencial= densidad x gravedad x altura= ρ x g x z **(La masa de un volumen unidad de agua es la densidad)**

La presión que soporta ese volumen unitario es el peso de la columna de agua dividido por la superficie

Peso= masa x gravedad = volumen x densidad x gravedad= base x altura x densidad x gravedad

$$Presión = \frac{Peso}{superficie} = \frac{L^2 \cdot w \cdot \rho \cdot g}{L^2} = w \cdot \rho \cdot g$$

En estas condiciones y según el principio de Bernoulli la energía total por unidad de volumen $w \cdot \rho \cdot g + \rho \cdot g \cdot z = cte$

Dividiendo por densidad queda la energía total por igualdad de masa

$$w \cdot g + g \cdot z = cte \qquad g(w + z) = cte$$

$$g \cdot h = cte = \Phi$$

La energía total por unidad de masa se denomina Potencial hidráulico

Ecuación de Bernoulli

La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

Cabezal de velocidad

Altura o carga piezométrica

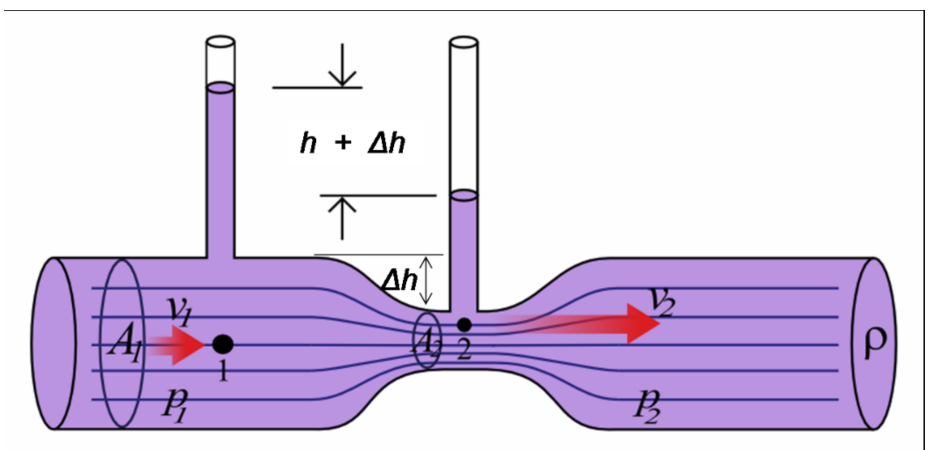
Altura hidráulica

$$\underbrace{\frac{V^2}{2g}}_{\text{Cabezal de velocidad}} + \underbrace{\frac{P}{\gamma}}_{\text{Altura o carga piezométrica}} + \underbrace{z}_{\text{Altura hidráulica}} = H$$

Presión dinámica

Presión estática

$$\underbrace{\frac{\rho V^2}{2}}_{\text{Presión dinámica}} + \underbrace{P + \rho g z}_{\text{Presión estática}} = Cte$$



Cómo se mueve el agua en el terreno

- En superficie las aguas superficiales circulan desde los puntos que están más altos hacia los puntos que están mas bajos
- En realidad, el agua se mueve de los puntos en los que tiene más energía hacia aquellos en los que tiene menor energía. Esa energía se denomina *potencial hidráulico* y veremos que queda reflejada precisamente por la altura de la columna de agua en ese punto.

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma_a} + z = H$$

La velocidad de flujo del agua en el terreno es muy pequeña.

Un ejemplo que señala Luis Ortuño en el libro Ingeniería geológica otorga valores elevados a niveles de 0,6 m/minuto que dan lugar a alturas de velocidad ($v^2/2g$) del orden a 5 x 10^{-6} m. Valores despreciables comparados con los términos z y u/γ_w. Y es incluso inferior que la precisión para medir la altura geométrica (z) de un punto cualquiera.

A estos tres tipos de energía que se consideran clásicamente en *Hidráulica*, se podrían añadir la energía térmica y la química, pero para el flujo del agua subterránea son despreciables todos los sumandos al lado de la energía potencial y la energía de la presión. Efectivamente, la energía cinética en el flujo en canales abiertos es importante, pero la velocidad del agua subterránea es tan lenta que hace que sea despreciable al lado de las otras dos.

Los fluidos reales, como el agua, no son perfectos. Así, cualquier obstáculo que se oponga a flujo entre dos puntos produce una pérdida de carga AH.

Para que exista flujo es necesaria una diferencia de carga hidráulica de manera que el agua circula de los puntos que tienen mas carga (H_A), a los que menos (H_B).

AH=HA-HB

Esta diferencia representa el trabajo gastado para vencer el obstáculo, o la energía empleada en vencer el obstáculo.

El agua en reposo

Cuando el agua está en reposo se mantienen toda la carga. Estas condiciones se denominan hidrostáticas.

Evidentemente, la viscosidad del agua no es nula.

En condiciones hidrostáticas no hay agua en movimiento luego el término cinético no existe.

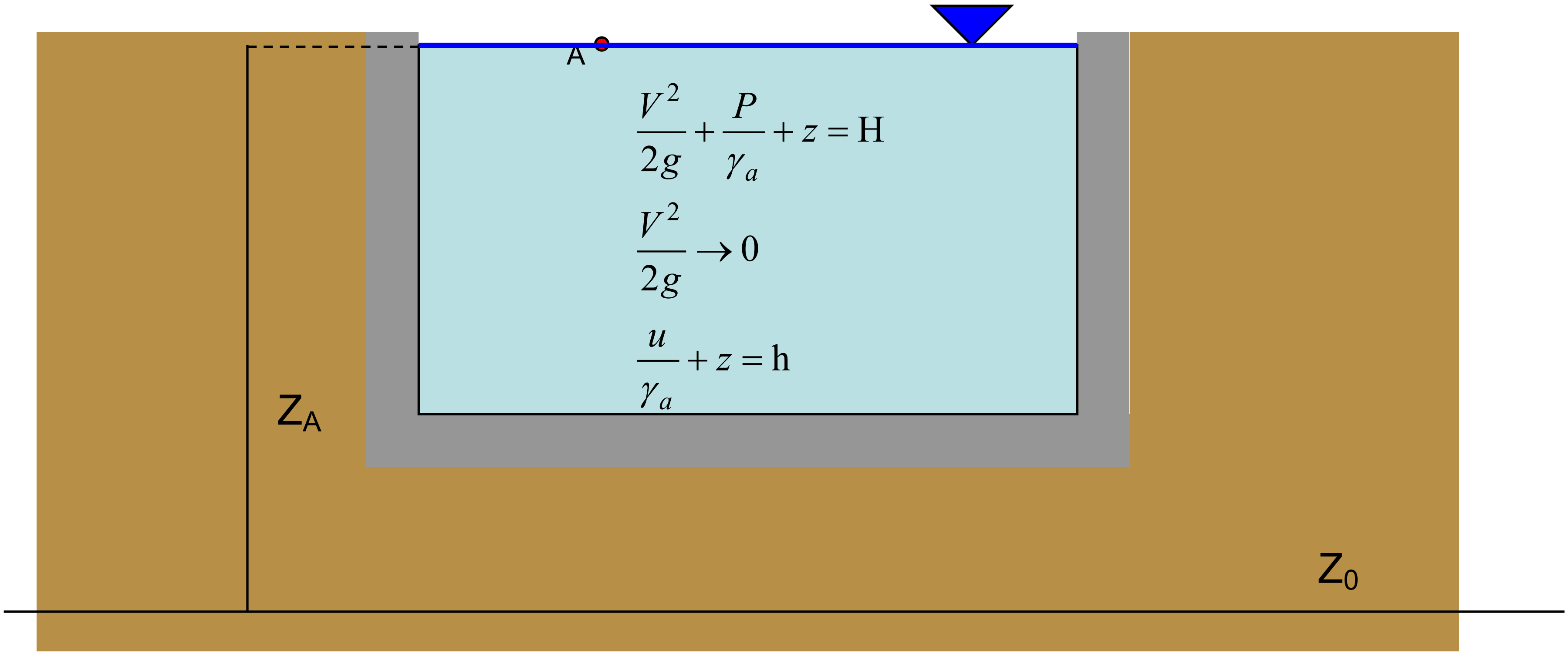
$h=z+ p/\gamma_a$

A h se la denomina altura piezométrica. Y de esta manera utilizando esta simple ecuación, con la condición de que h se mantenga constante en toda la masa del líquido, permite calcular la presión de agua en cualquier parte del fluido.

Altura piezométrica

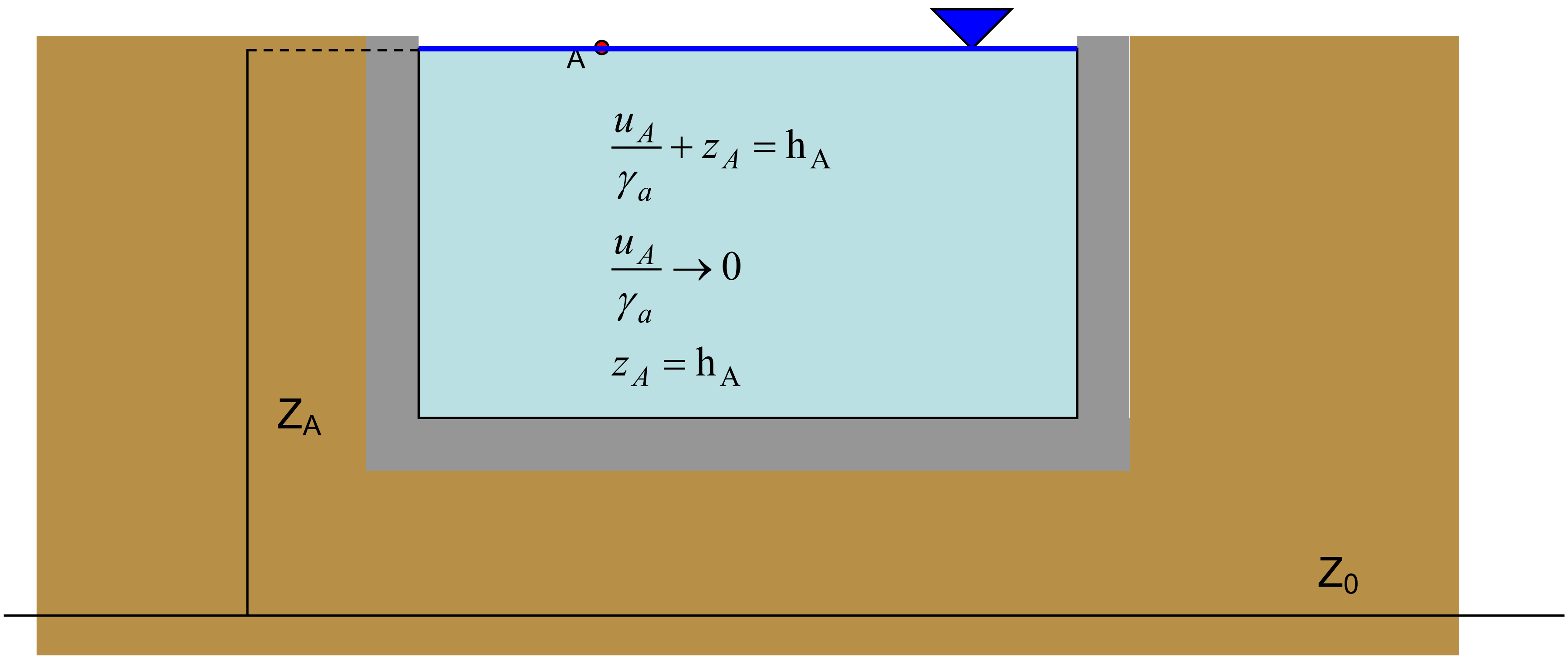
Supongamos un recipiente cerrado con agua. Tomamos un plano de referencia para las alturas, Z_0. Seleccionamos dos puntos A, cerca de la superficie y B en el interior. Calculamos la presión de agua.

No hay movimiento en el agua. El teorema de Bernouilli queda reducido (Cambiamos P por u, a H la cambiamos por h), h se denomina altura piezométrica, la medimos desde un plano de referencia z_0. No es igual a nivel freático.



Presión hidrostática-agua en reposo

h resulta constante en toda la masa de agua, y a partir de ésta situación se puede calcular la presión de agua en cualquier parte del fluido. Como A está situado en la superficie del líquido está sometido a presión atmosférica (se toma como 0).



Presión hidrostática

La presión en el punto B. como h es constante en el recipiente.

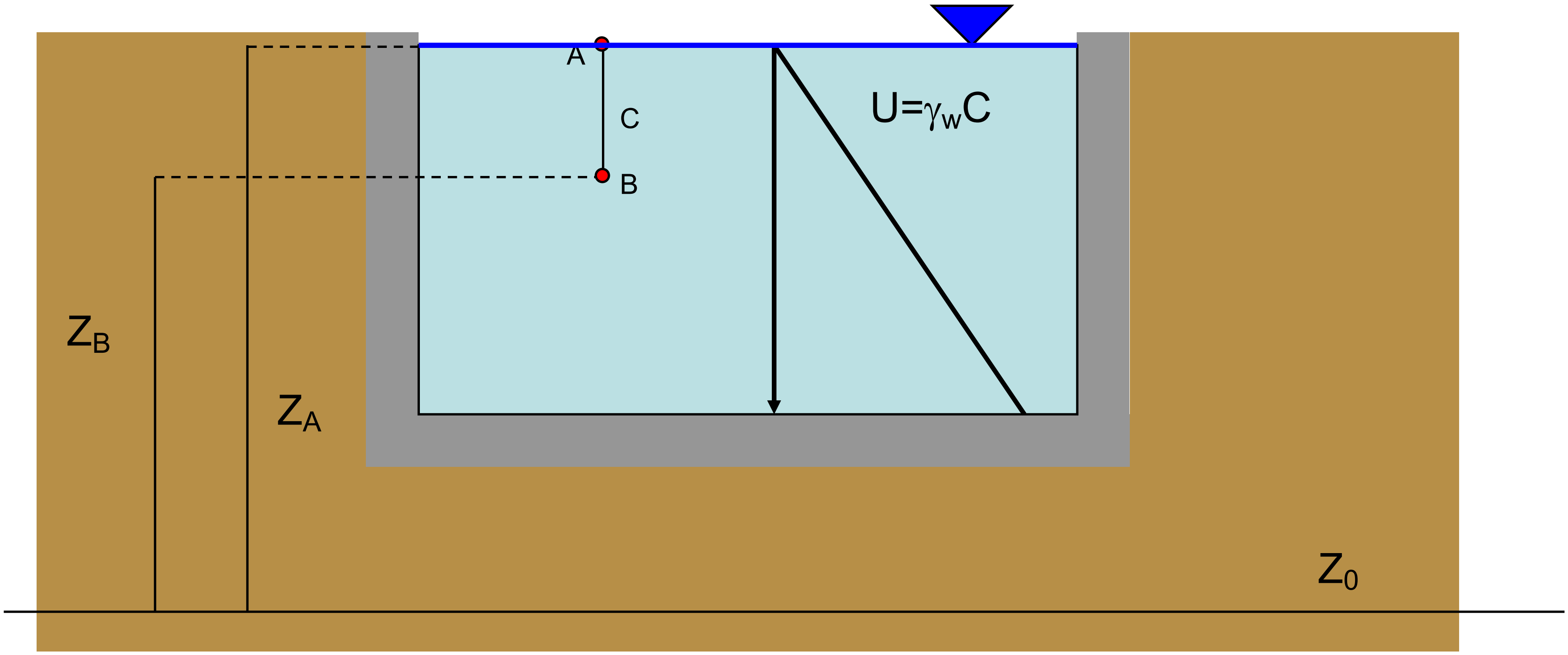
$$\frac{u_B}{\gamma_a} + z_B = h_B;\ c = (z_A - z_B)$$

$$h_B = \frac{u_B}{\gamma_a} + z_B = h_A = z_A$$

$$u_B = \gamma_w (z_A - z_B) = \gamma_w \cdot c$$

$\gamma_a = \gamma_w$

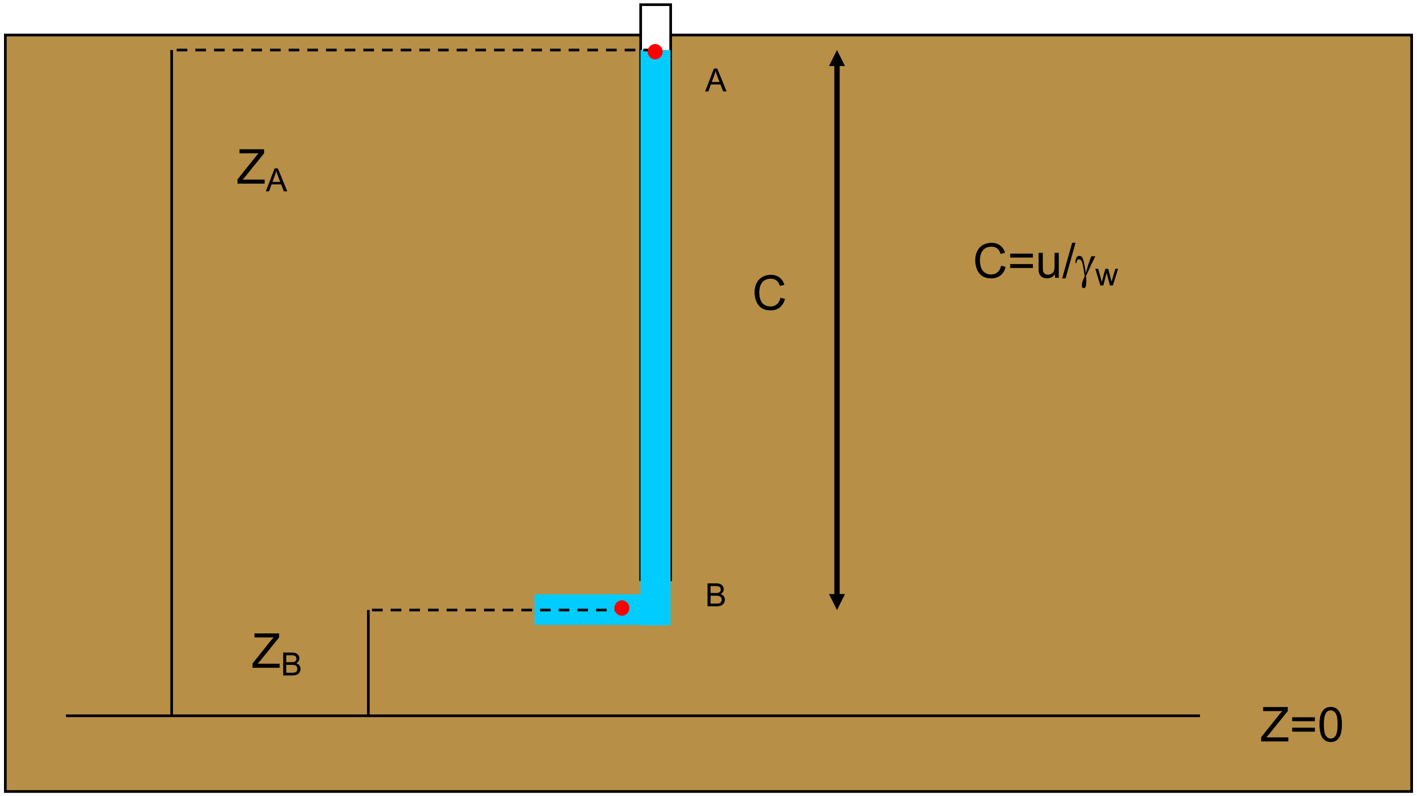
En consecuencia la presión hidrostática es el producto del peso específico del agua por la profundidad. Y aumenta linealmente con ella



Empleo de piezómetro de tubo abierto

Supongamos que se quiere conocer la presión de agua en un punto cualquiera del terreno (B). Si se introduce un tubo en el terreno hasta el punto B, el agua subirá (transcurrido un tiempo, hasta que se equilibren la presiones) hasta el punto A. Dentro del tubo las condiciones resultan hidrostáticas, no hay pérdida de carga.

La altura de agua que mide un piezómetro de tubo abierto, en cualquier punto del terreno es igual a la presión de agua en dicho punto/ peso específico del agua



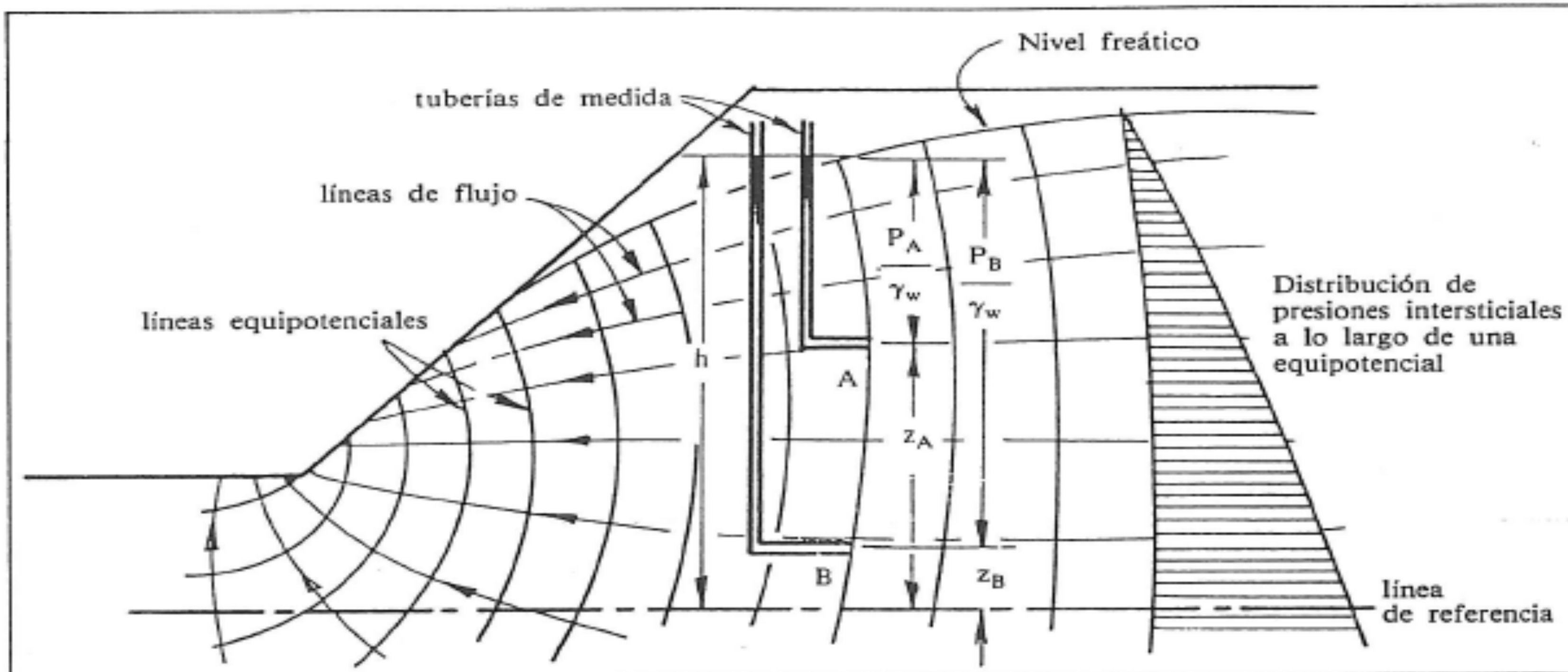
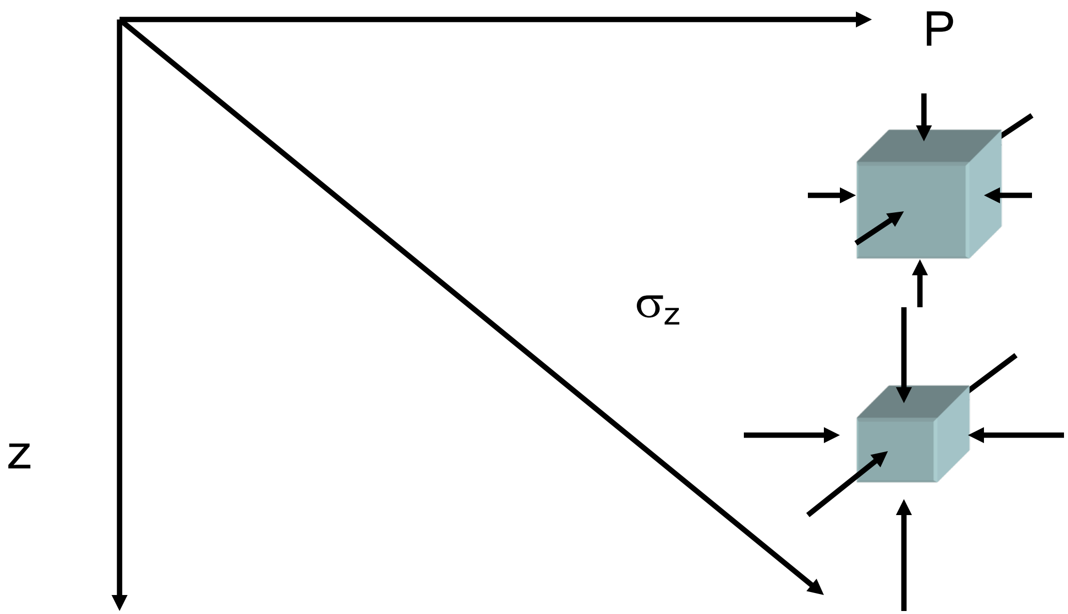


Fig. 6.12.—Red de flujo bidimensional en un talud (HOEK y BRAY, 1977) (Cortesía de Inst. of Mining and Metallurgy).

La presión hidrostática, σ_w ejercida en un medio en condiciones hidrostáticas, se define como el peso de la columna de roca de densidad (ρ_w) a una profundidad (z)

$$\sigma_{zz} = \int_0^z \rho_w * g * \partial z$$

La presión confinante es función de la profundidad



Es un esfuerzo de carácter hidrostático, se ejerce sobre todas las caras del cuerpo considerado

Valor teórico de la presión hidrostática $P(H_20)$

- La presión de hidrostática cerca de la superficie, a temperatura ambiente es

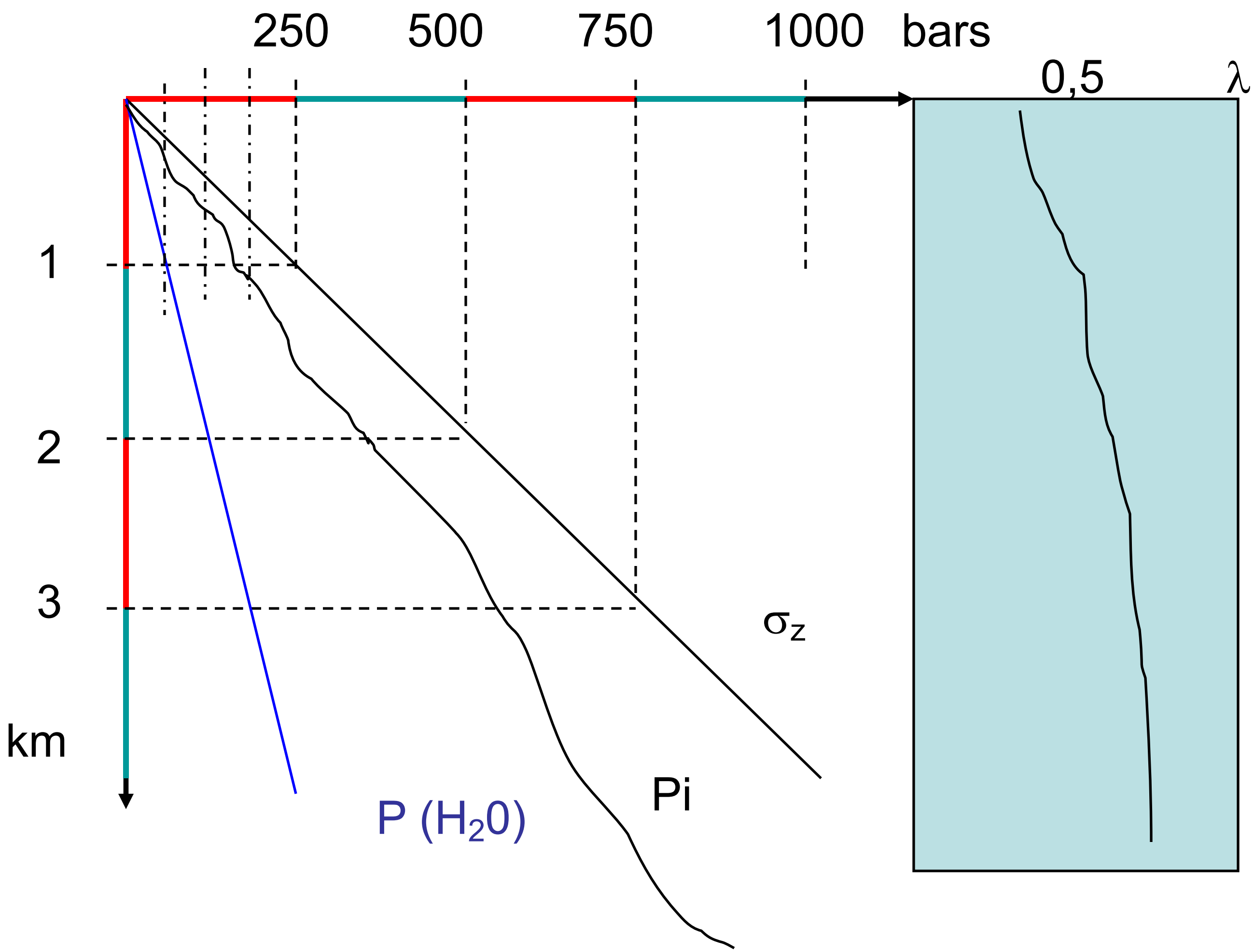
$$P(H_20)=1 \text{ atmósfera}^{\text{aprox.}=}1\text{bar}$$

- Estimación de la presión de hidrostática a 1km de profundidad

Z= 1000 m
ρ media del agua = 1 gr/cm^3 = 1000 Kg/m^3
g= 980 cm/s^2 aprox. 1000 cm/s^2= 10,00 m/s^2
Presión= 1000 Kg/m^3 x 10,00 m/s^2 x 1000 m
Presión= 10^7 Kg m/s^2 m/m^3=10^7 Kg m/s^2 /m^2
Presión= 10^7 N/m^2 = Presión= 10^7 Pa= 10 MPa = 100 bar

En CGS
1000m=10^5cm
$P(H_20)$= 1 gr/cm^3x1000 cm/s^2x 10^5cm = 1* 10^8 gr/cm s^2= 1* 10^8 dina/cm^2
1 dina/cm^2= 10^{-6} kg/cm^2 (kg/cm^2) = 1 bar
$P(H_20)$= 2,5* 10^8 dina/cm^2 = 2,5* 10^2 kg/cm^2
$P(H_20)_{1km}$=100kg/cm^2= 100 bars

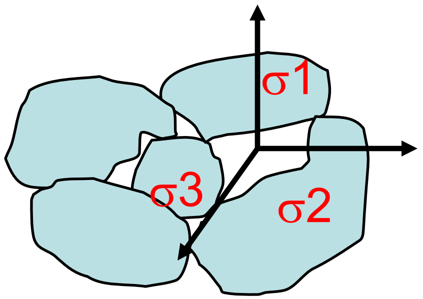
Variación de la presión de fluido con la profundidad



Presión Intersticial

- La presión intersticial es la presión de fluidos que es la cantidad de fluidos que hay en las rocas.
- Esta presión depende de
  - origen de las rocas,
  - % de poros que tengan esas rocas,
  - el tamaño de los poros,
  - si están o no conectados.
  - Si la roca ha sufrido una compactación los poros son menores.

Esta presión es de carácter hidrostático pero no es la presión hidrostrática



$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$

Presión de Fluidos, λ

La presión hidrostática tiene un valor teórico que es 40% de la litostática

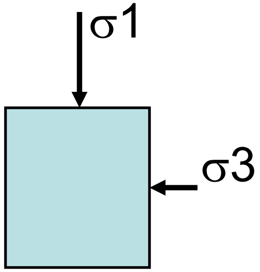
λ= P(H_20)/σz=100/250= 0,4

Hay dos tipos de presiones de fluido:

-la presión de fluido natural, λg

-la presión de fluido experimental, λe

σ3 es la presión confinante



$$\boxed{\boldsymbol{\lambda_e = P_i/\sigma_3}}$$

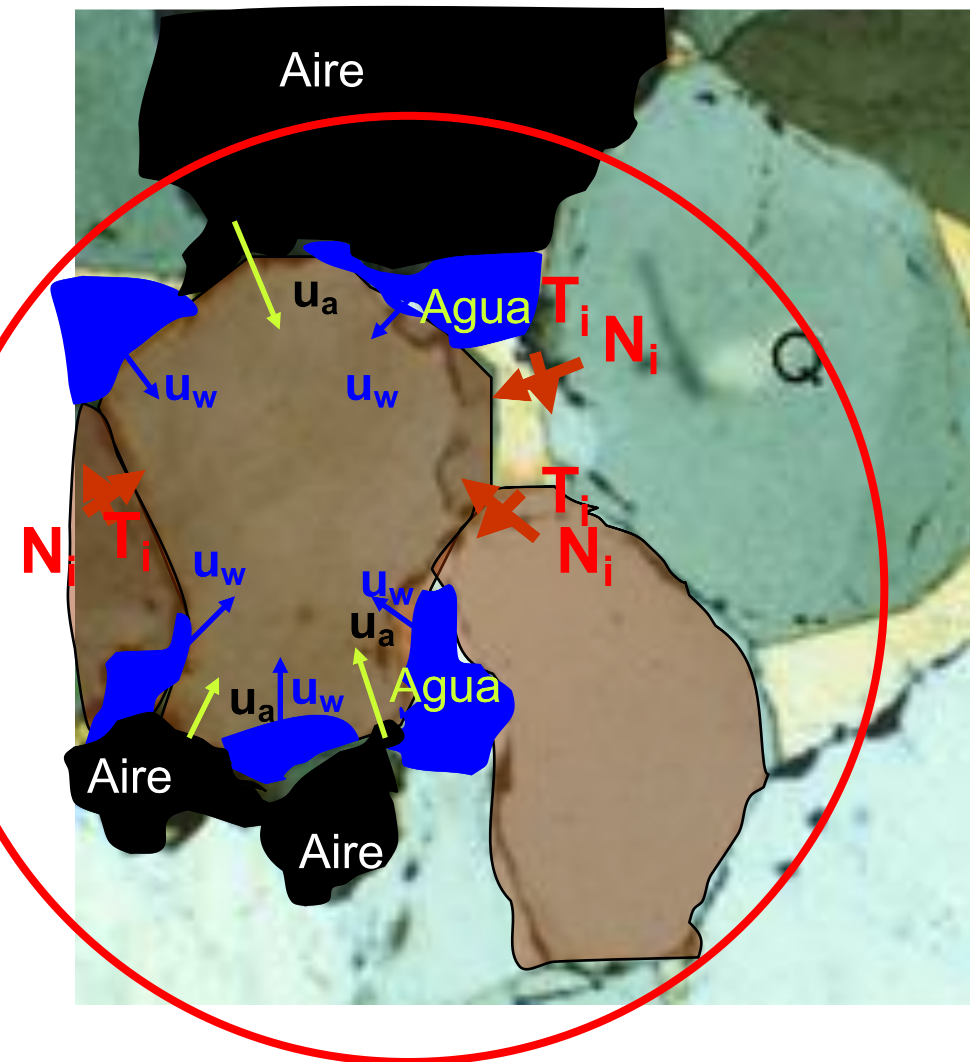
entonces $\lambda e * \sigma_3 = P_i$

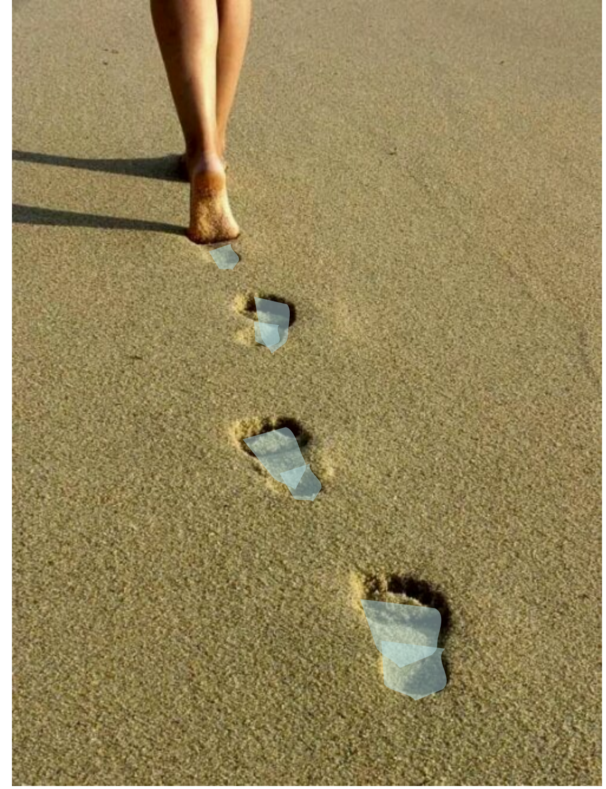
Sobre una partícula actúan:

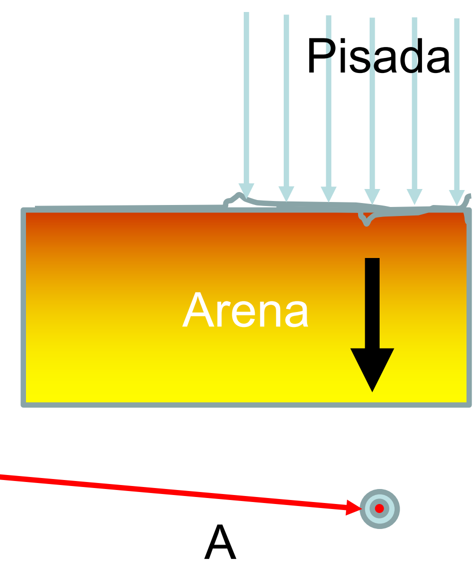
1 presión agua, u_w

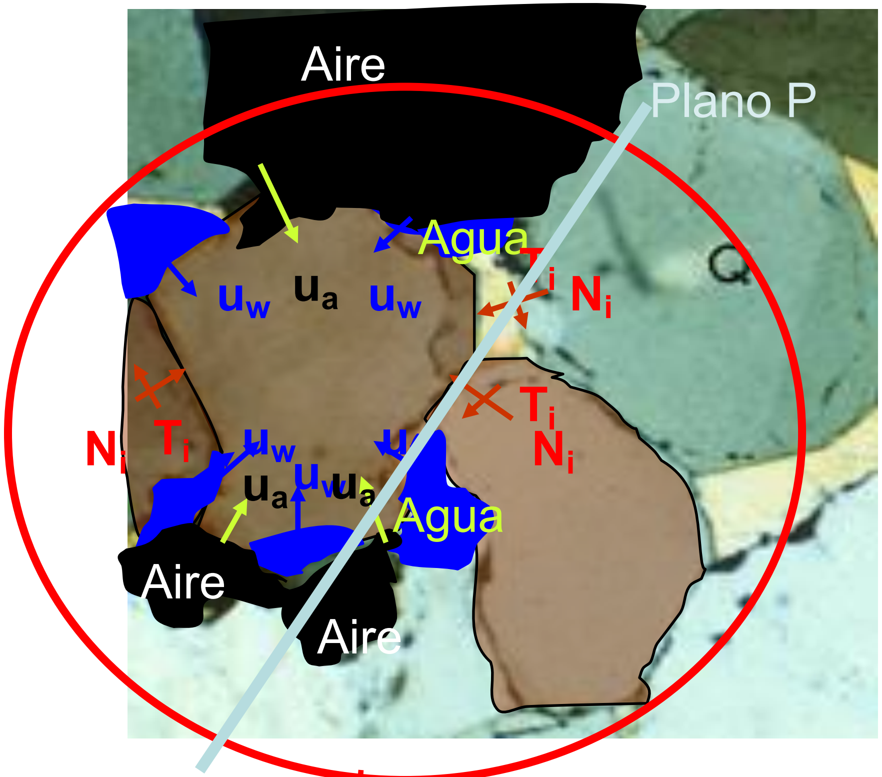
2 presión aire, u_a

3 presión transmitida por las partículas: N_i , T_i

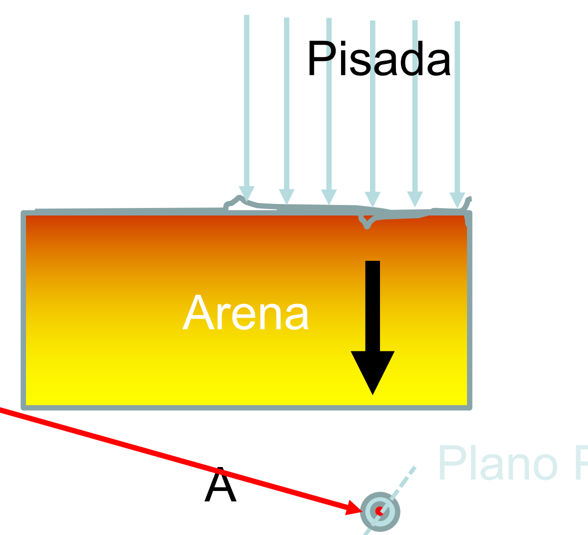






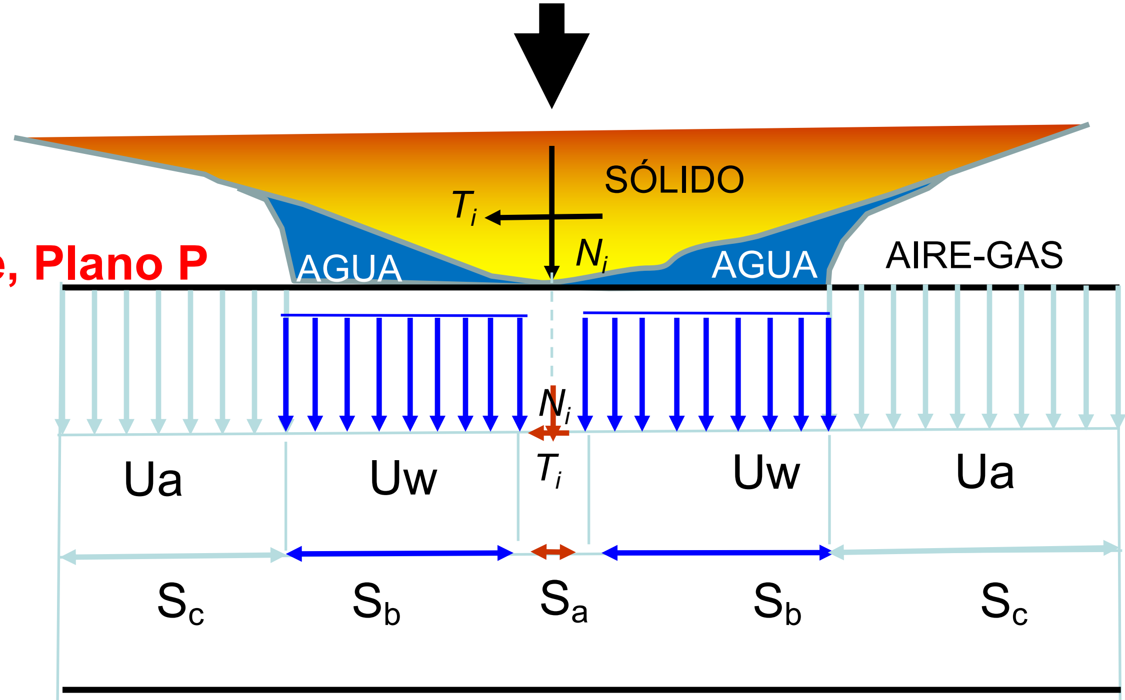


Analizaremos la arena
como si fuese un medio continuo



Supongamos que el contacto del clasto y la superficie se realiza solo en un punto

Superficie, Plano P



$$S = 1,\ S_a \to 0$$

$$S = S_a + S_b + S_c$$

$$S_c = (1 - S_b)$$

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

esfuerzo intergranular

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

S

$$\sigma_i = \sigma - \left(\frac{uS_b}{S} + \frac{u_a}{S} - \frac{u_a S_b}{S}\right)$$

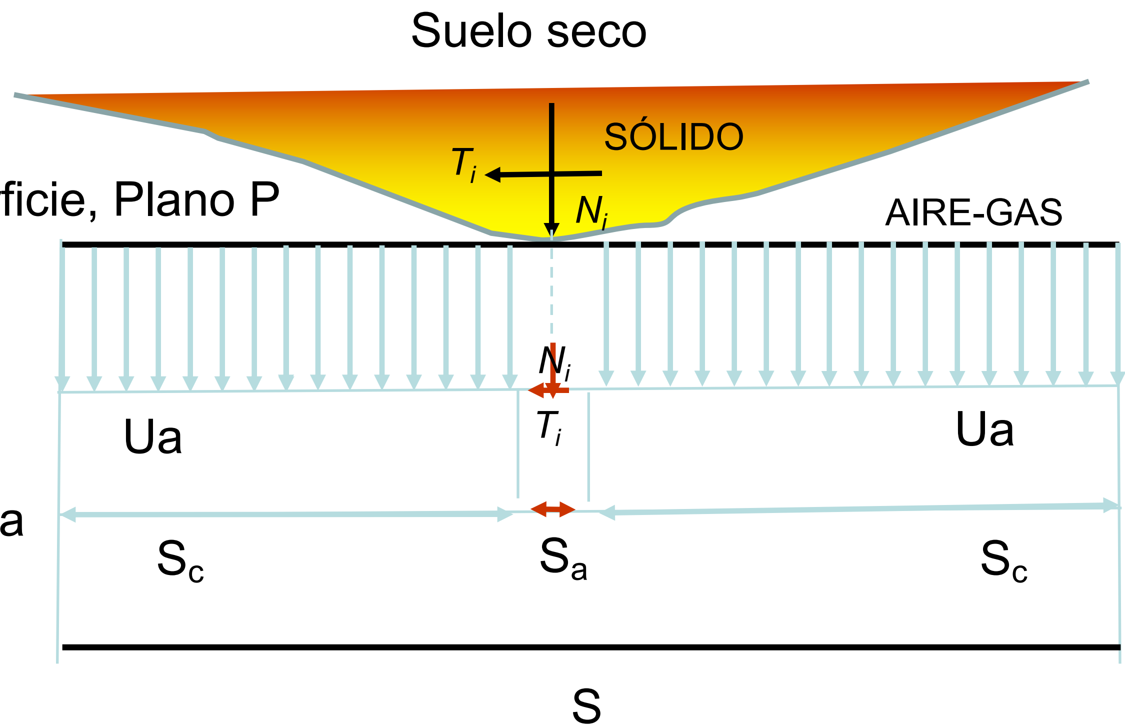
$$\sigma_i = \sigma - \frac{uS_b}{S} - \frac{u_a}{S} + \frac{u_a S_b}{S}$$

$$\sigma_i = \sigma - \frac{u_a}{S} + \frac{u_a S_b}{S} - \frac{uS_b}{S}$$

$$\sigma_i = \sigma - \frac{u_a}{S} + \frac{S_b}{S}(u_a - u)$$

$$\tau_i = \tau$$

En este sistema tenemos cuatro tensiones normales sobre el plano P: σ, σ_i, u_a, u_w



$$si\ \frac{S_b}{S} \to 0$$

$$u_a = 0$$ Presión atmosférica

$$\sigma_i = \sigma$$

$$\tau_i = \tau$$

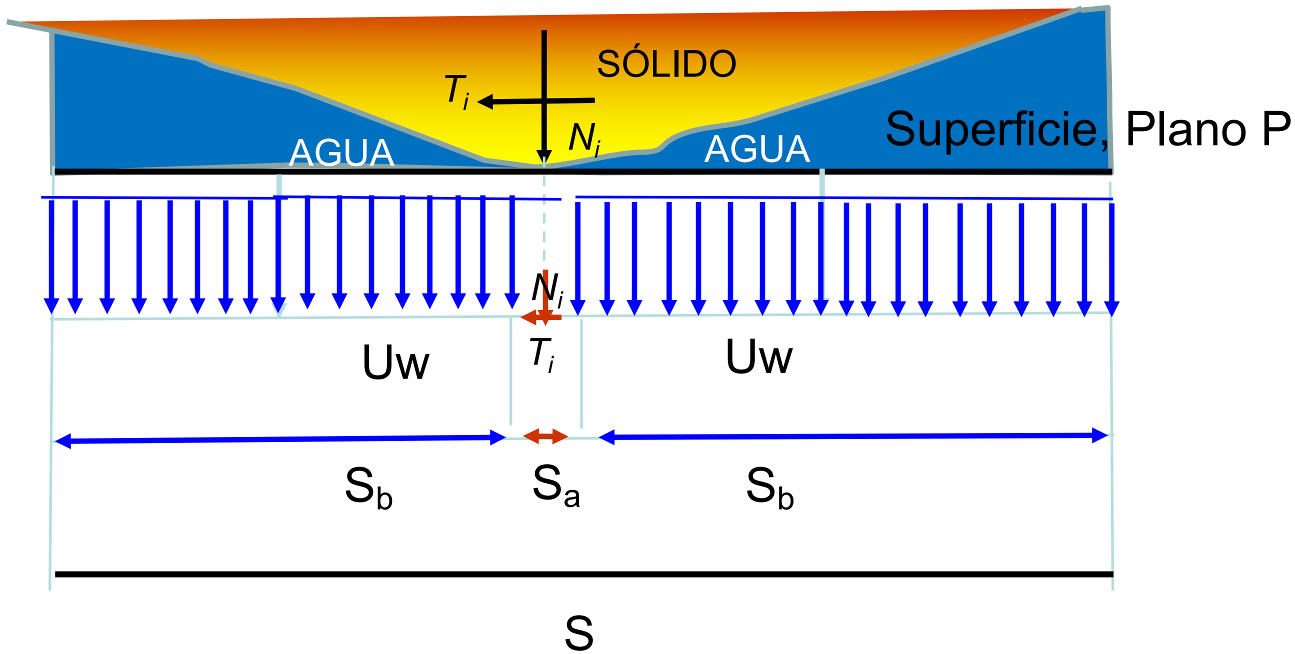
<u>Suelo seco</u>

Sólo una tensión normal

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

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

Si está saturado



$$\frac{S_b}{S} \rightarrow 1$$

$$\sigma_i = \sigma - u$$

$$\tau_i = \tau$$

<u>Suelo totalmente saturado</u>

Tres tensiones normales

Tensión total σ

Tensión intergranular σ_i

Presión intersticial u

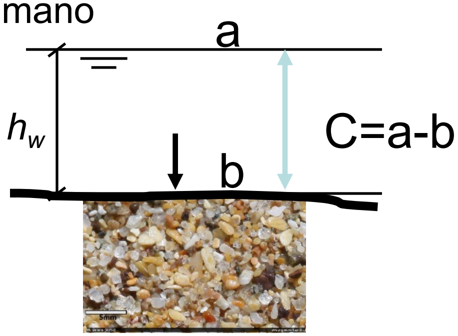
Terzaghi (1925) **LA TENSIÓN EFECTIVA ES LA INTERGRANULAR**

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

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

El principio de la tensión efectiva de Terzaghi explica:

Porque se puede coger la arena del sondo con la mano



$$\left.\begin{aligned} \sigma &= \gamma_w \cdot h_w \\ u &= \gamma_w \cdot C \end{aligned}\right\} \sigma' = \sigma - u = 0$$

Porqué se pueden construir castillos de arena (agua capilar)

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

Presión efectiva

Cuando un suelo está sometido a presiones, solamente el esqueleto del suelo opone resistencia a su deformación. El agua como es incompresible y no tiene resistencia al corte, no se opone a la deformación, es “neutra”; de ahí que a la presión de poros se la llame también “presión neutra” y a la presión intergranular se la denomine ” presión efectiva”, pues esta última es la presión real que se opone a la deformación y posterior falla de un suelo.

Presión de Fluidos, λ

La presión efectiva, σ' o $\sigma_e = \sigma_z - P_i$; $\sigma e = \rho g h - \sigma_3 \lambda$; si $\sigma 3 = \rho g h$

$$\sigma_e = \sigma_3 - \sigma_3 \lambda = (1-\lambda)\sigma_3$$

Algunas consideraciones sobre materiales

En suelos parcialmente saturados: hay que considerar el efecto de la presión del aire y la de agua en poros :

Bishop (1959) identifica también la presión efectiva con la granular

La presión efectiva es la intergranular si estudiamos la resistencia del material, pero no en estudios de la deformabilidad.

En rocas: la cosa cambia y depende de si consideramos la matriz rocosa o las anisotropías

– Roca matriz
  - En general semisaturadas
  - Contactos entre partículas <u>no</u> pueden considerarse puntuales.

No es válido el principio de la tensión efectiva

– Discontinuidades

Si están rellenas	Comportamiento como suelo
Si están limpias	Contactos puntuales

Válido el principio de la tensión efectiva

Tensión efectiva

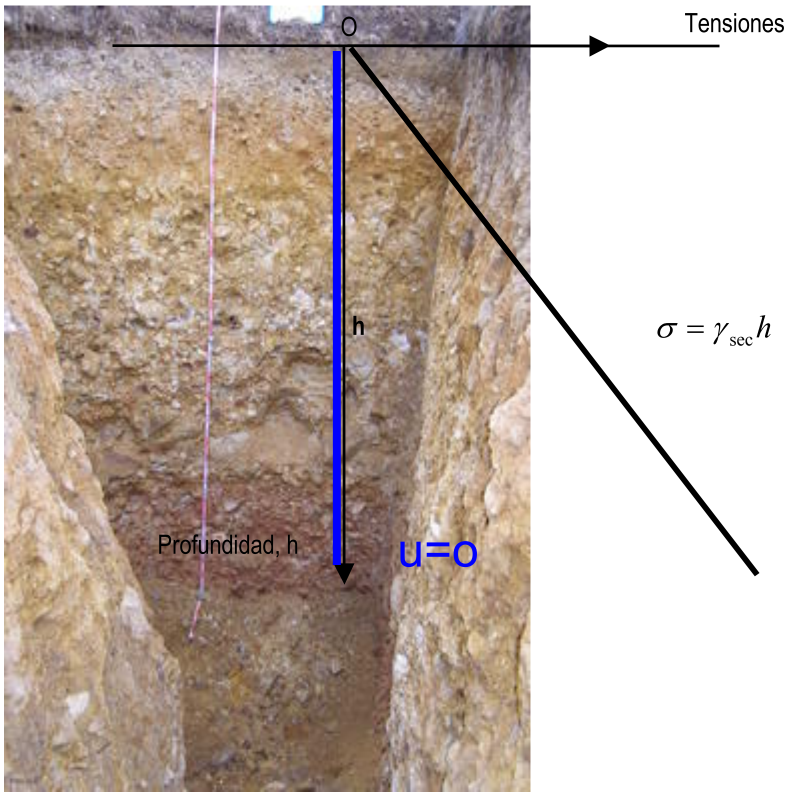
Suelo seco, no aparece nivel freático

$$si\,\frac{S_b}{S} \rightarrow 0$$

$$u_a = 0$$

$$\sigma_i = \sigma$$

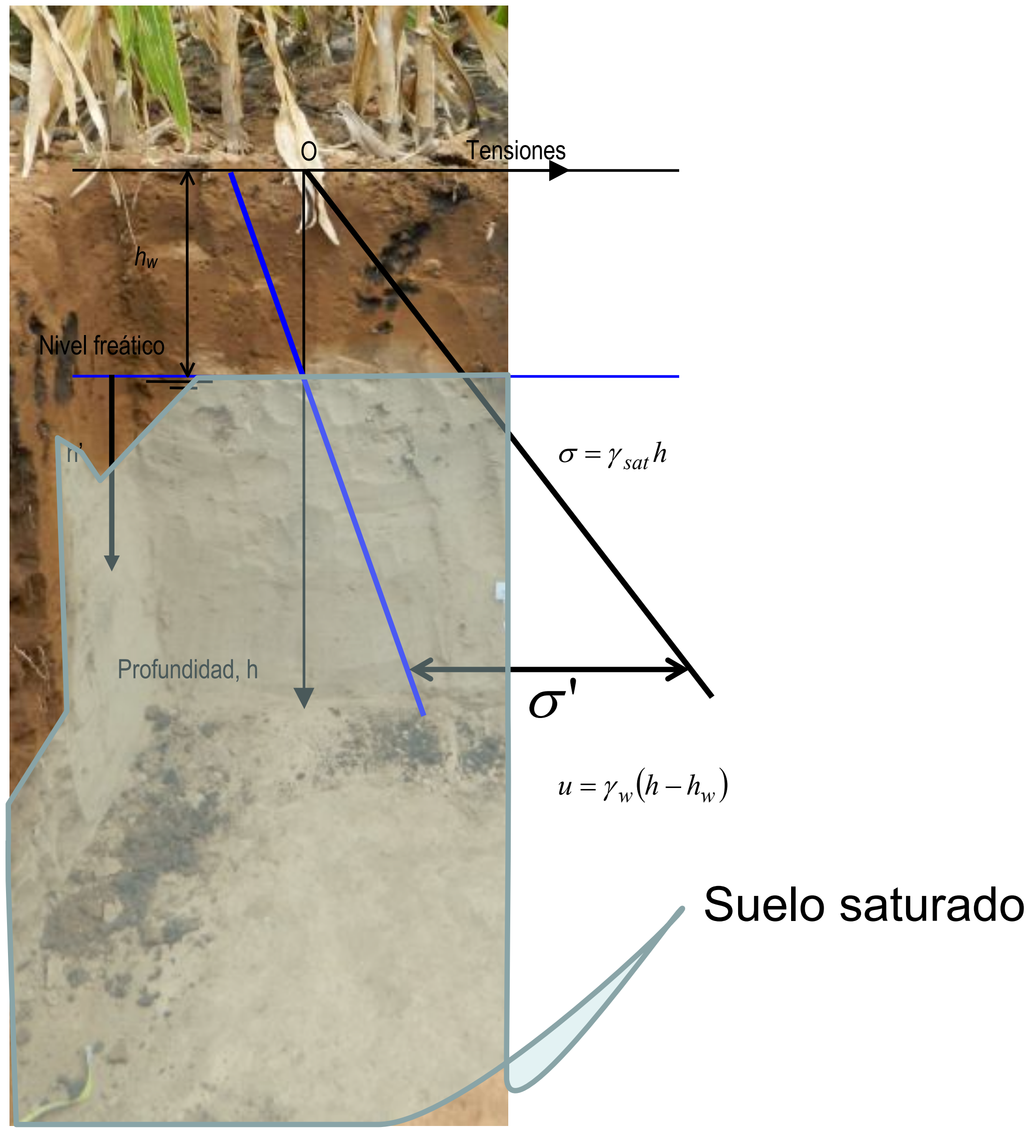
$$\tau_i = \tau$$



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

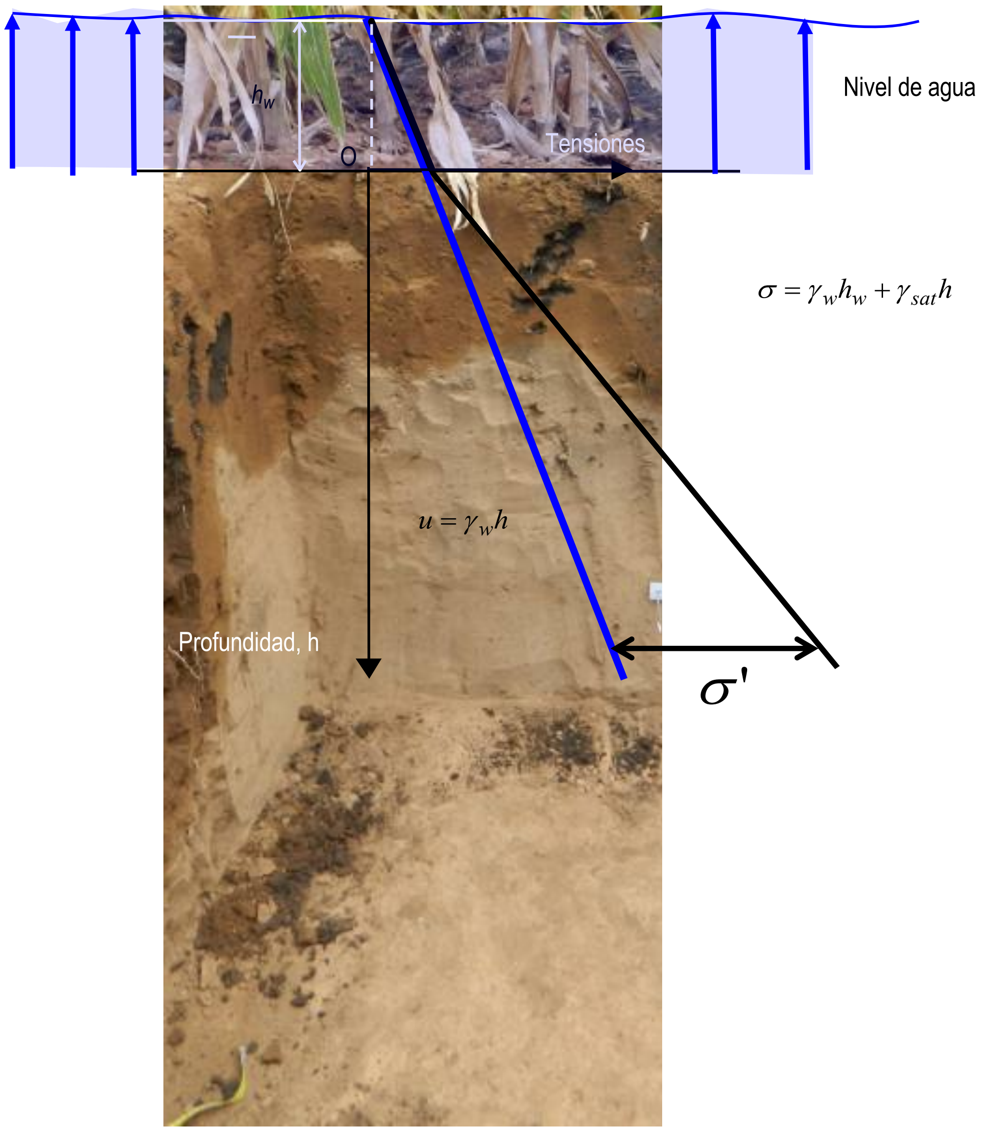
Tensión efectiva

Suelo arenoso, aparece aparece nivel freático



Tensión efectiva

Suelo arenoso, inundado



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