

Máster Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: MECÁNICA DEL SUELO

EL AGUA EN EL TERRENO

Ponente: Antonio Soriano
Día: 25/01/07
Hora: 16:00 A 17:00

EL AGUA EN EL TERRENO

Resumen del Capítulo 5

de

Geotecnia y Cimientos I

J. A. Jiménez Salas y J. L. De Justo

ÍNDICE (1ª Parte)

- 1.- Procedencia del agua
- 2.- Situación del agua en el terreno
- 3.- Movimiento del agua
- 4.- Límites de validez de la ley de Darcy
- 6 a 8.- Determinación del coeficiente de permeabilidad

ÍNDICE (2ª Parte)

9.- La presión efectiva

10.- Las fuerzas de filtración

LEVANTAMIENTO DE FONDO

11.- Erosión interna

TUBIFICACIÓN

12.- Permeabilidad de las rocas

ÍNDICE (3^a Parte)

13.- Tensión superficial

14 y 15.- Capilaridad

16 a 19.- Succión, p F

20.- Electroosmosis

1.- PROCEDENCIA DEL AGUA

- **Formación del suelo**
- **Lluvia (ciclo del agua)**
- **Rocas a 10 km de profundidad
(sin agua)**

2.- SITUACIÓN DEL AGUA EN EL TERRENO

- **Nivel freático**
- **Acuíclulos**
- **Aguas artesianas**

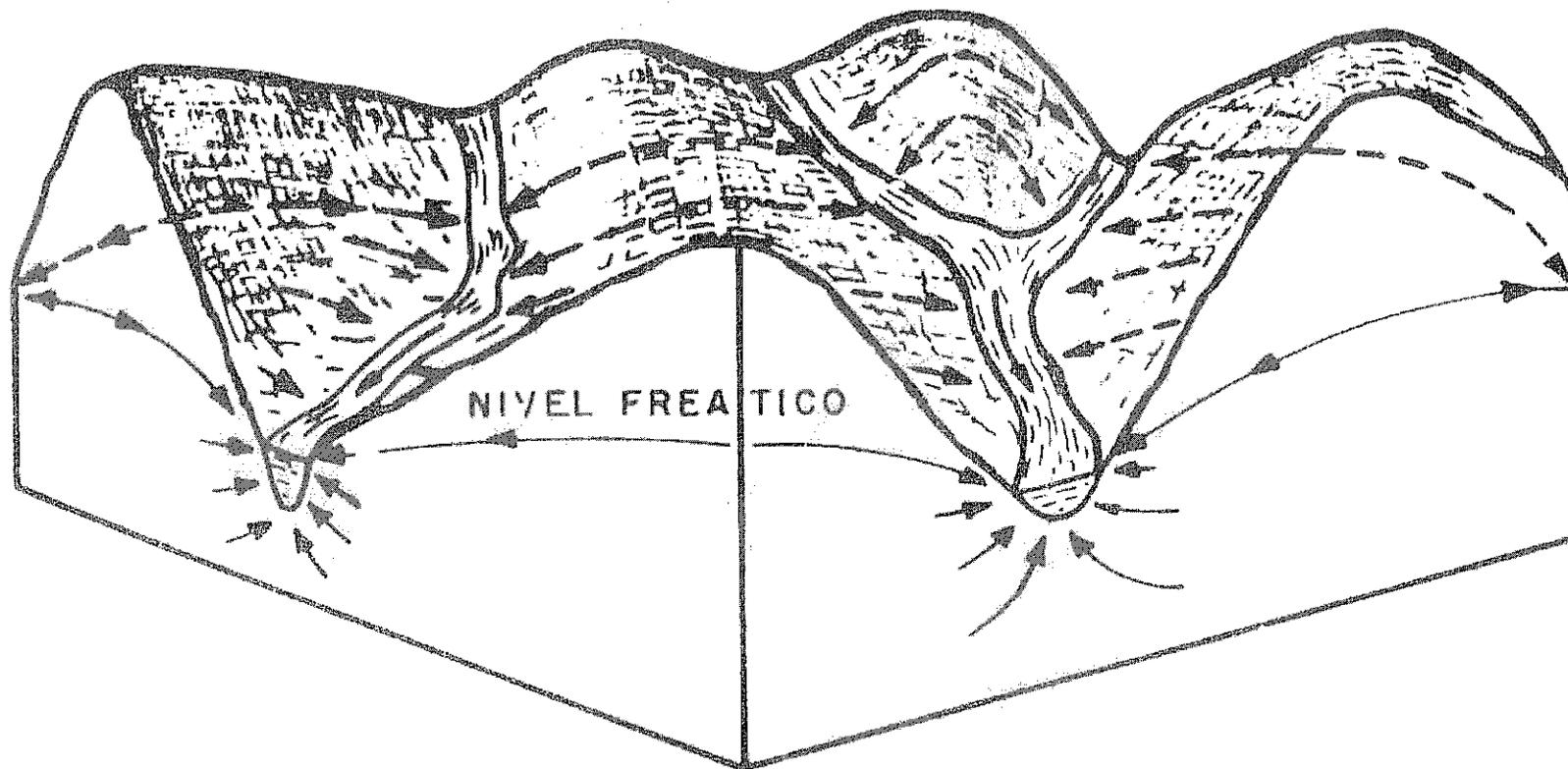


Fig. 5.1. Diagrama ilustrativo del movimiento del agua freática y de la relación del nivel freático con el topográfico.

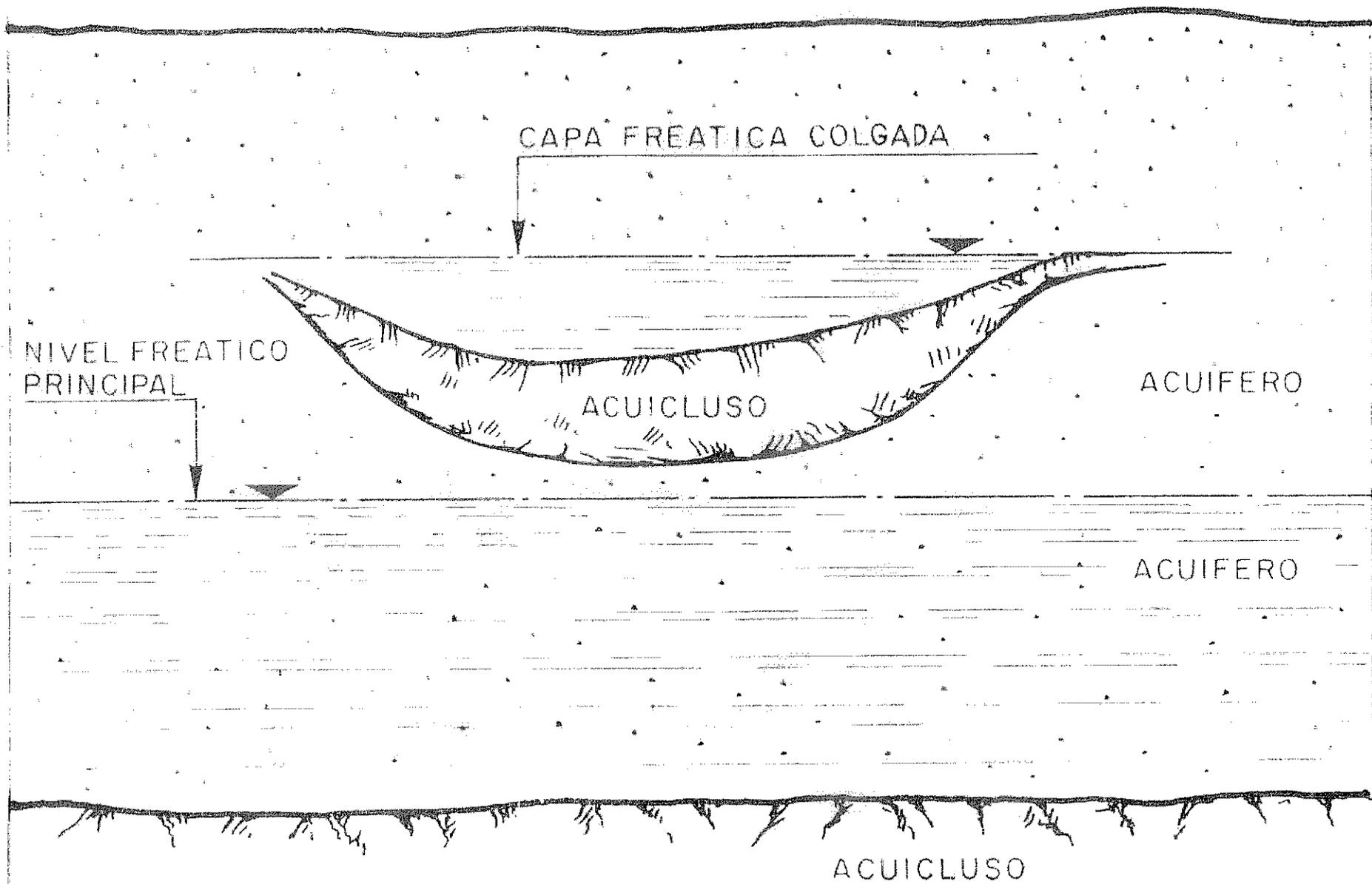


Fig. 5.2. Capa freática colgada.

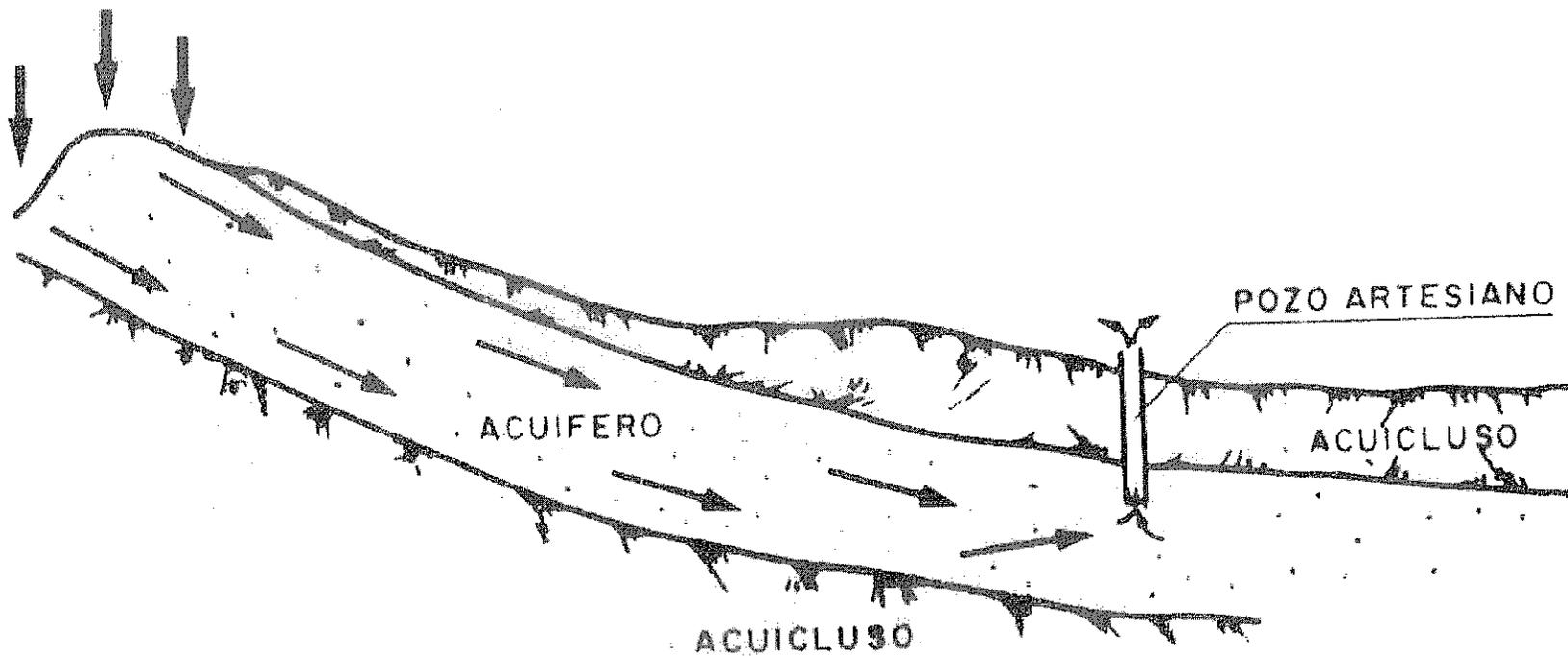
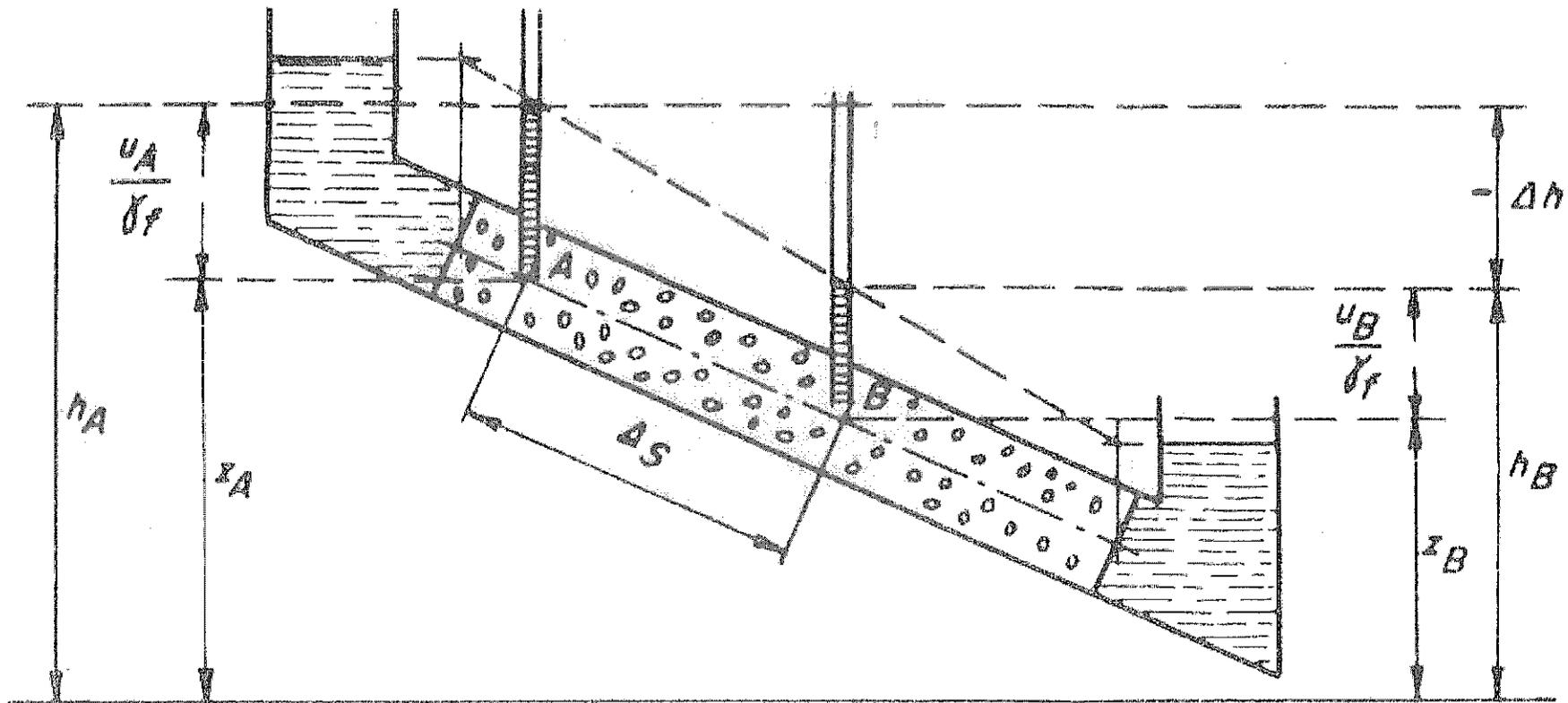


Fig. 5.3. Agua artesiiana.

3.- MOVIMIENTO DEL AGUA

- Nivel piezométrico
- Gradiente
- Velocidad de descarga
- Ley de Darcy



PLANO ARBITRARIO DE COMPARACION

Fig. 5.4. Altura piezométrica, altura de elevación y altura de presión en suelos.

4.- LÍMITES DE LA LEY DE DARCY

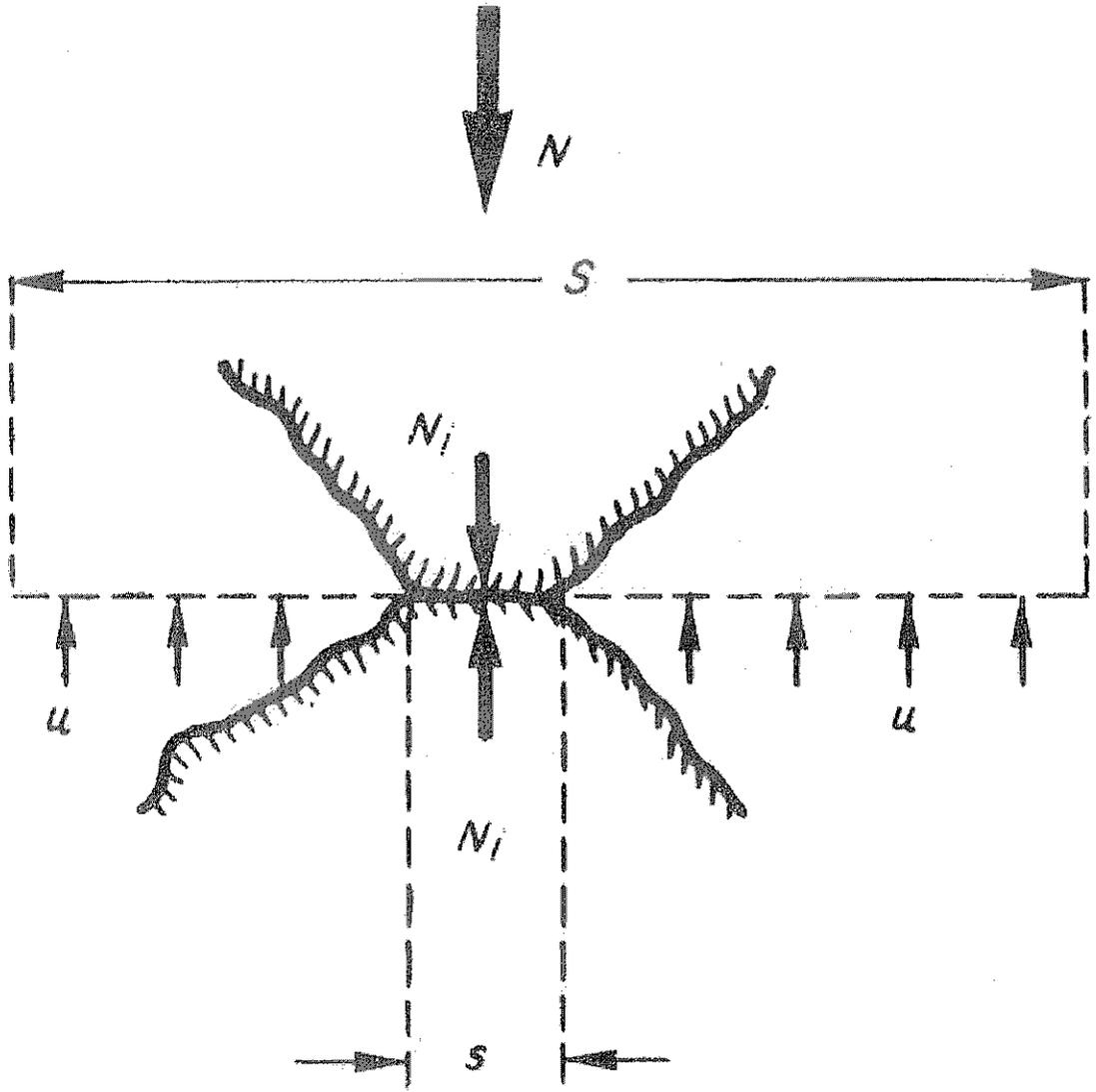
- **Permeabilidades bajas**
- **Permeabilidades altas**

6 a 8.- DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

- **Laboratorio**
- **Campo**

2ª PARTE

9.- PRESIÓN EFECTIVA



u = Presión neutra o intersticial.

N_i = Fuerza normal intergranular.

N = Fuerza normal total.

S = Area del elemento de suelo.

s = Area de contacto entre partículas.

Fig. 5.9. Fuerzas normales actuantes en un corte a través de la superficie de contacto entre dos partículas de un suelo.

10.- FUERZAS DE FILTRACIÓN

LEVANTAMIENTO DE FONDO

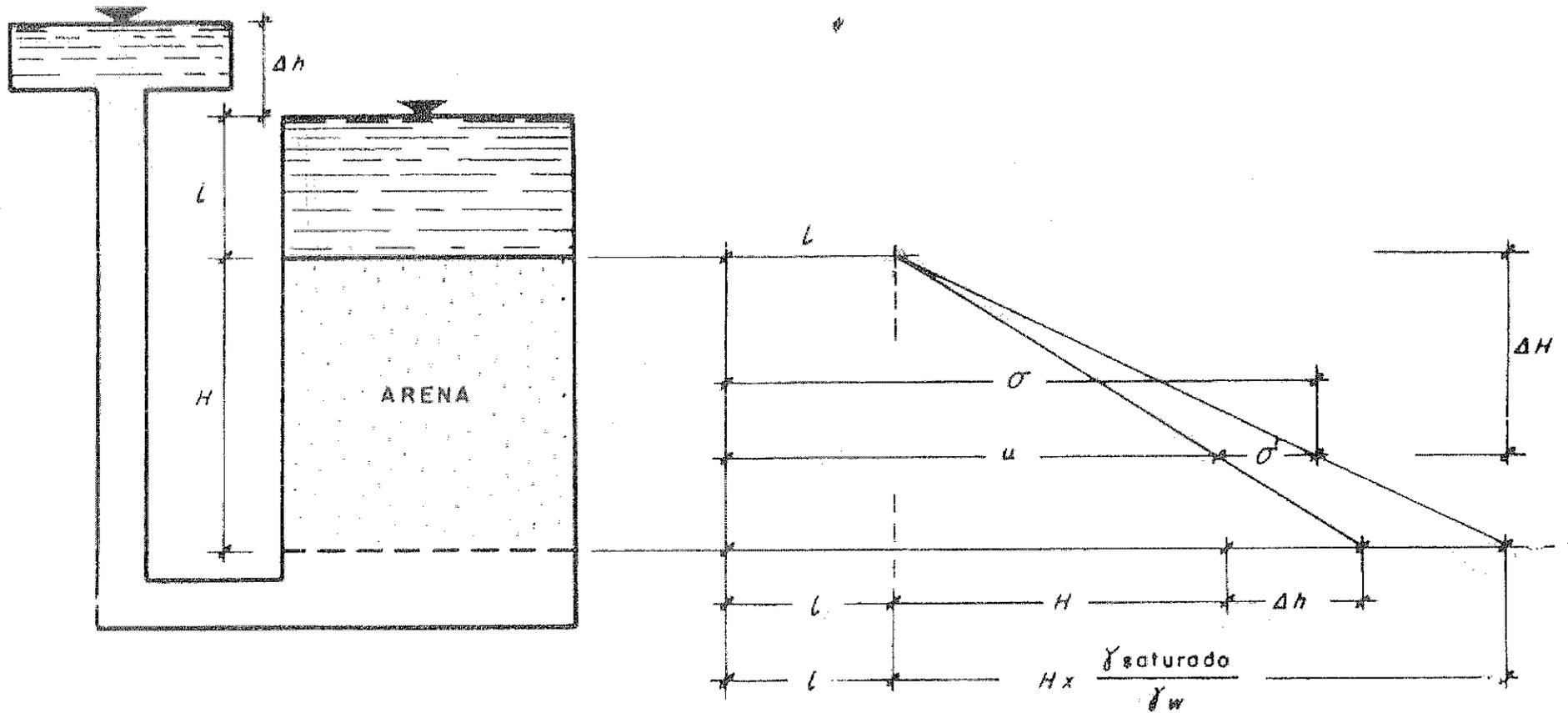


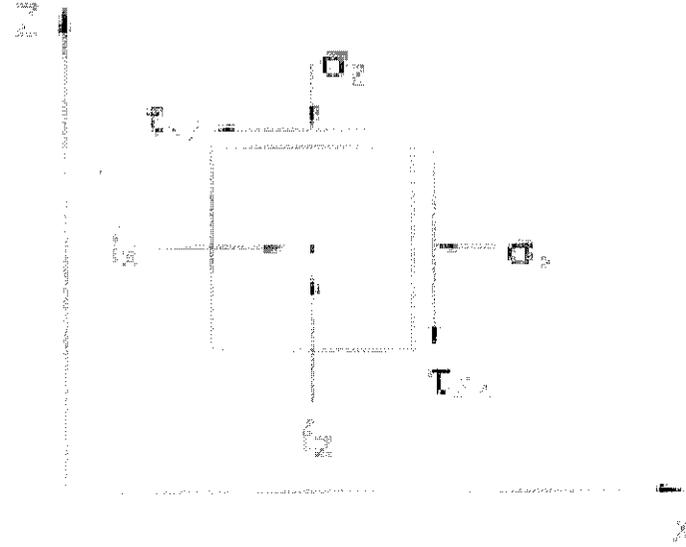
Fig. 5.10. Presiones totales, intersticiales y efectivas en un permeámetro de flujo ascendente.

3.4.5. Fuerzas de arrastre

El equilibrio tensional en el interior del terreno, expresado en términos de mecánica del continuo bidimensional y suponiendo aceleraciones nulas, conduce a las dos expresiones básicas siguientes:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = f_x$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = f_z$$



donde τ_{xz} es el esfuerzo de corte en caras horizontales y verticales y σ_x , σ_z las tensiones, positivas en compresión, según los ejes. Se supone que existen unas fuerzas f_x , f_z por unidad de volumen. Normalmente $f_x = 0$; $f_z = \gamma =$ peso específico del terreno.

Cuando el terreno está saturado y se quieren analizar por separado las presiones efectivas y las del agua se puede aplicar el principio de Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$) que, sustituido en las ecuaciones precedentes conduce a:

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = f_x - \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = f_z - \frac{\partial u}{\partial z}$$

En problema de filtración de agua en medios porosos suele utilizarse como variable básica el potencial ϕ (en muchos textos también se denomina h) definido mediante la expresión:

$$\phi = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

Con esta definición resulta:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \gamma_w \quad \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \gamma_w - \gamma_w$$

La presencia del agua hace que el terreno experimente un empuje ascensional de intensidad γ_w y su movimiento, cuando la aceleración es despreciable, induce además una fuerza de masa.

$$\bar{f} = (f_x, f_z) = -\gamma_w \cdot \overline{\text{grad}\phi}$$

Normalmente al producto del peso específico del agua por el gradiente de potencial cambiado de signo, que a veces se denomina l , se le conoce como fuerza de arrastre ($\gamma_w \cdot l$) y va dirigida en dirección normal a las equipotenciales y en el sentido de potenciales decrecientes.

El concepto de las fuerzas de arrastre tiene su aplicación práctica en el análisis tensional de las masas de suelo sumergidas tal como la que se indica en la Fig. 3.4.4 a modo de ejemplo.

El efecto de las presiones de agua (libre e intersticial) en el contorno es una fuerza F cuyo valor puede calcularse mediante la integral:

$$\bar{F} = \int_c \bar{u} \cdot d\bar{l}$$

lógicamente es un vector normal al contorno que delimita la masa en cuestión y cuyo módulo es el diferencial de su longitud. Esto es lo que se entiende por la integral de la circulación de u en el contorno.

Cuando se supone que la solución de u es armónica, como viene suponiéndose en estos apartados, la integral de su circulación en el contorno es igual a la integral de su divergencia

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

dentro de la superficie encerrada por el contorno:

$$\bar{F} = \iint_A \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) \cdot dx \ dz$$

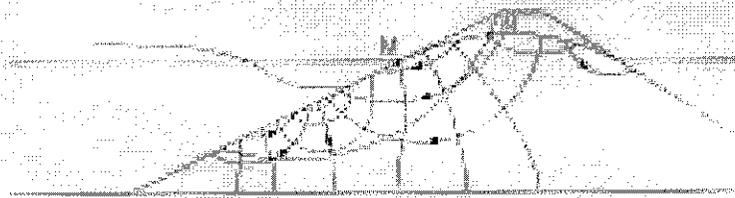
lo que lleva, habida cuenta de las expresiones anteriores, a:

$$\bar{F} = -\gamma_w \iint_A \overline{\text{grad}\phi} \ dx \ dz + A\gamma_w \cdot \bar{k}$$

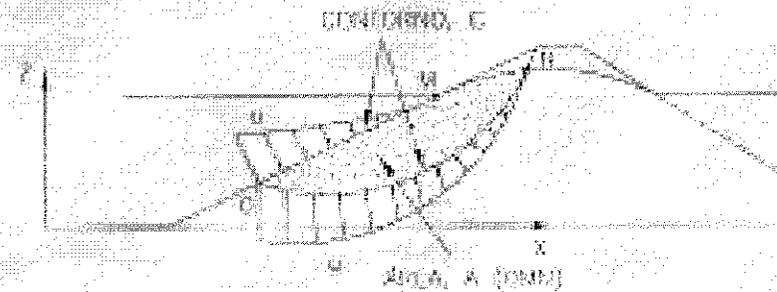
donde es el vector de módulo unidad dirigido según el eje z .

Figura 2.4.4. Esquema de una red de filtración y de las fuerzas de arrastre correspondientes (Régimen laminar)

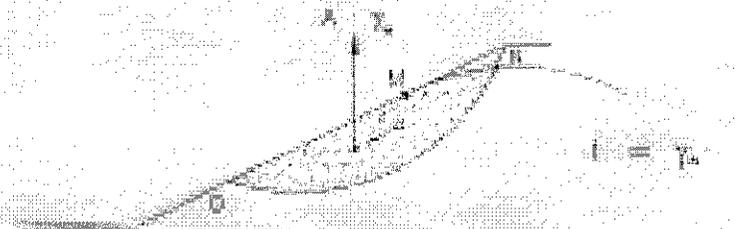
a) Esquema de la situación real



b) Esquema de presiones de agua



c) Esquema de fuerzas equivalentes a la presión de agua

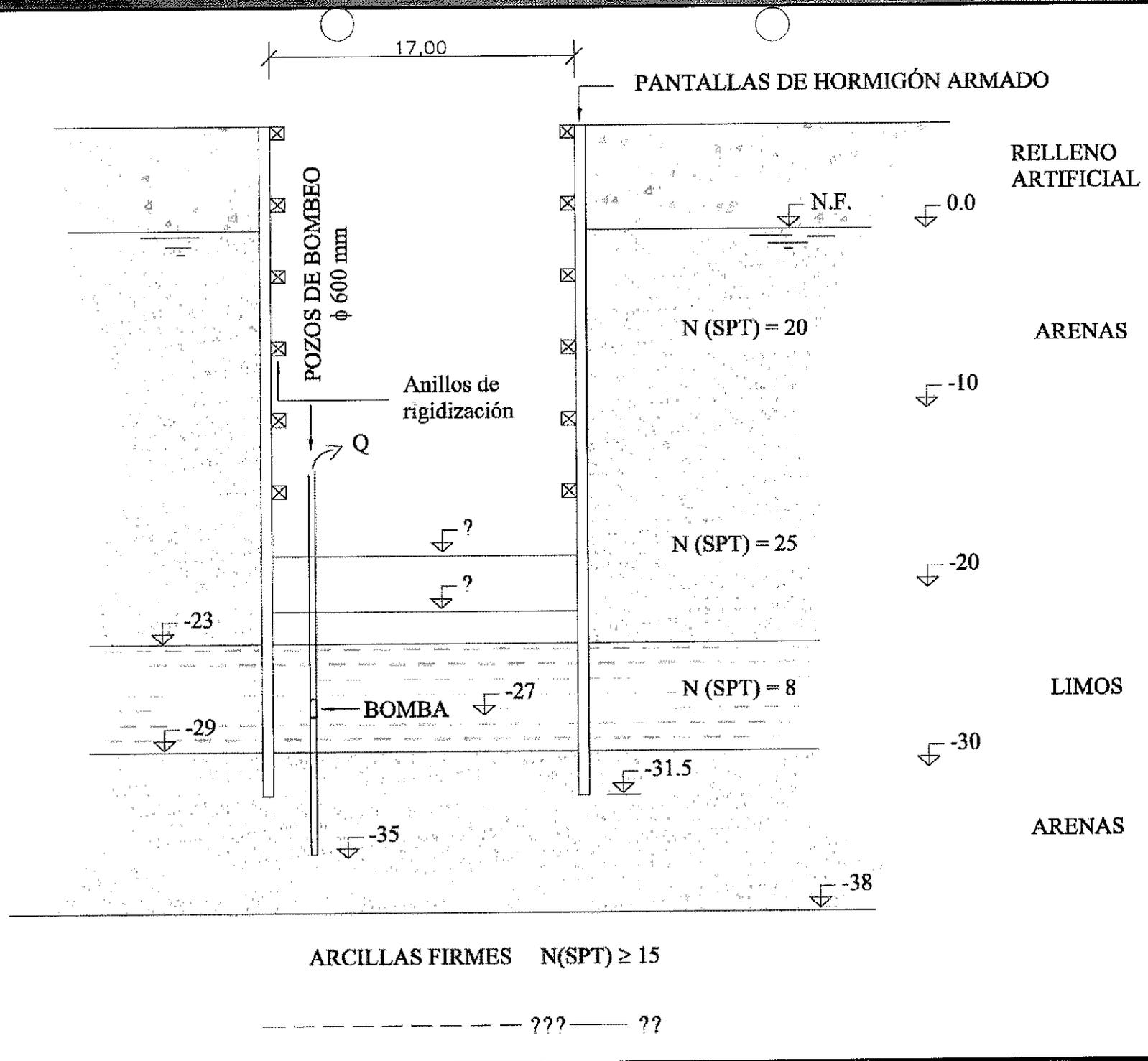


Nota: La imposición de la fuerza vertical ascendente $A \gamma_w$ puede hacerse calculando los pesos del área A usando el valor γ (peso específico sumergido).

Las presiones de agua en todo el contorno tanto externo como interno, por lo tanto, son equivalentes a la suma de dos fuerzas:

- a. Un empuje ascensional igual al peso del fluido desalojado por la masa. Este efecto puede representarse restando el peso total $A\gamma_{sat}$ el valor $A\gamma_w$. Esto es, calcular los pesos usando el peso específico sumergido $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$.
- b. Unas fuerzas de arrastre por unidad de área (de volumen en caso de problemas tridimensionales) iguales a $l \cdot \gamma_w$, como antes se ha indicado.

En ocasiones puede ser conveniente eliminar del problema las presiones del contorno y en su lugar utilizar pesos específicos sumergidos (en la zona sumergida) y las fuerzas de arrastre indicadas. Esto puede simplificar ciertos análisis como más adelante se verá en los distintos casos de aplicación en esta ROM.



11.- EROSIÓN INTERNA

TUBIFICACIÓN

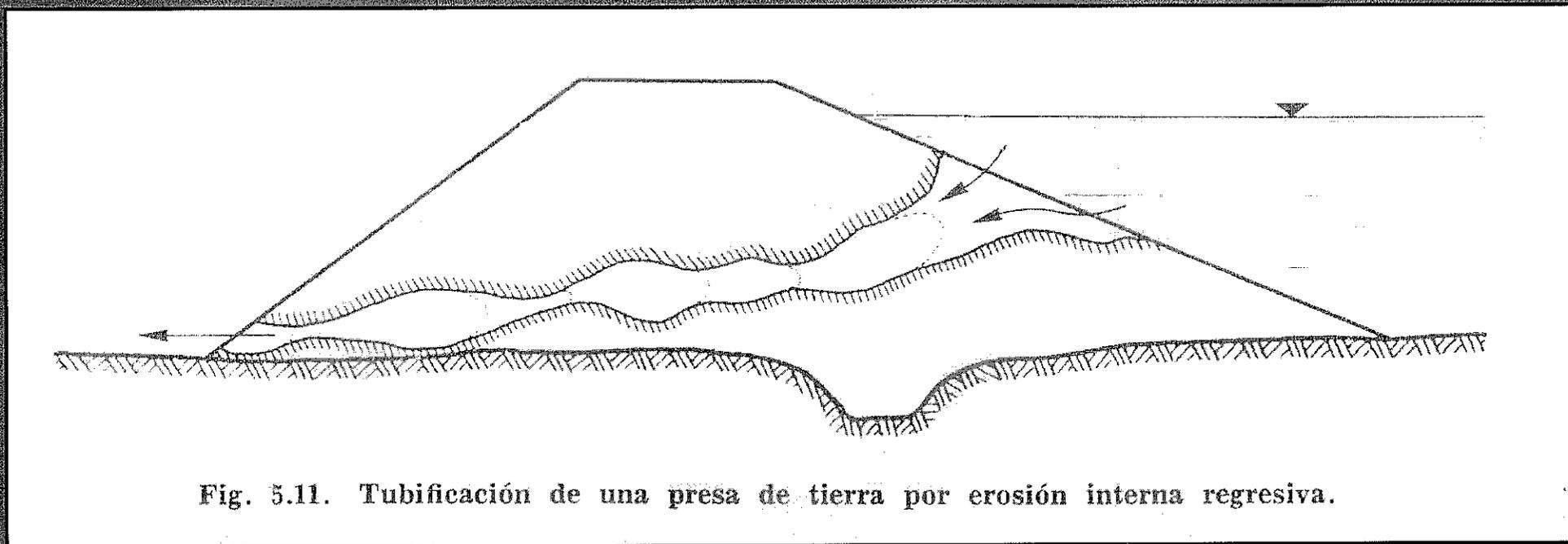


Fig. 5.11. Tubificación de una presa de tierra por erosión interna regresiva.

- **Arrastre de finos**
- **Filtros**
- **Suelos autoestables**

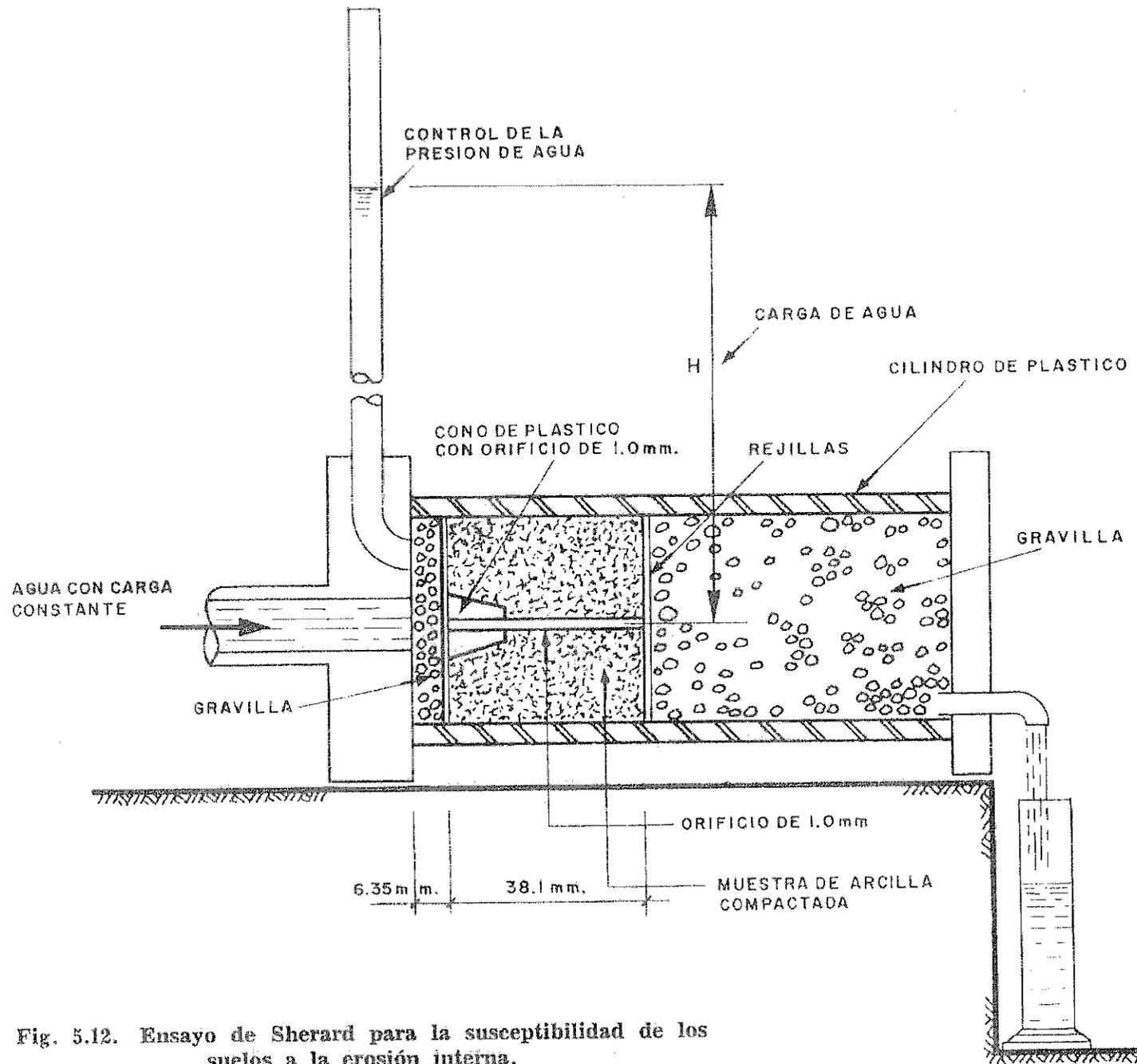


Fig. 5.12. Ensayo de Sherard para la susceptibilidad de los suelos a la erosión interna.

12.- PERMEABILIDAD DE LAS ROCAS

K vs σ'

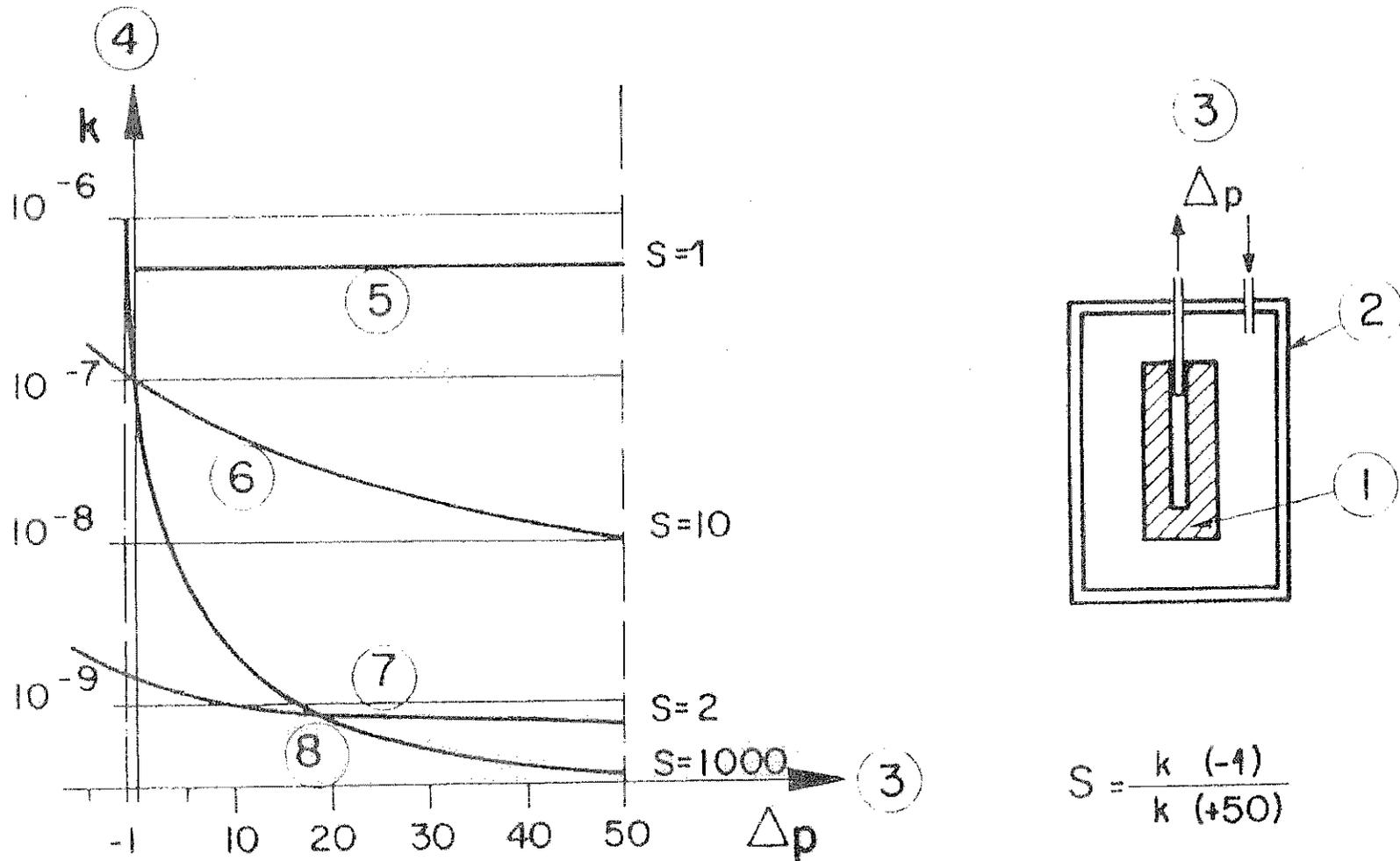


Fig. 5.14. Ensayos de permeabilidad radial y curvas para diferentes valores del índice S (Bernaix, 1967):

1. Muestra de roca.—2. Célula de presión.—3. Carga hidráulica (kg/cm^2).—4. Permeabilidad (m/s).—5. Caliza oolítica (sin fisuras).—6. Gneiss normalmente fisurado.—7. Gneiss compacto.—8. Gneiss muy fisurado.

Las curvas de la izquierda demuestran cómo la permeabilidad de la roca varía mucho más con las tensiones aplicadas cuando el índice S es alto.

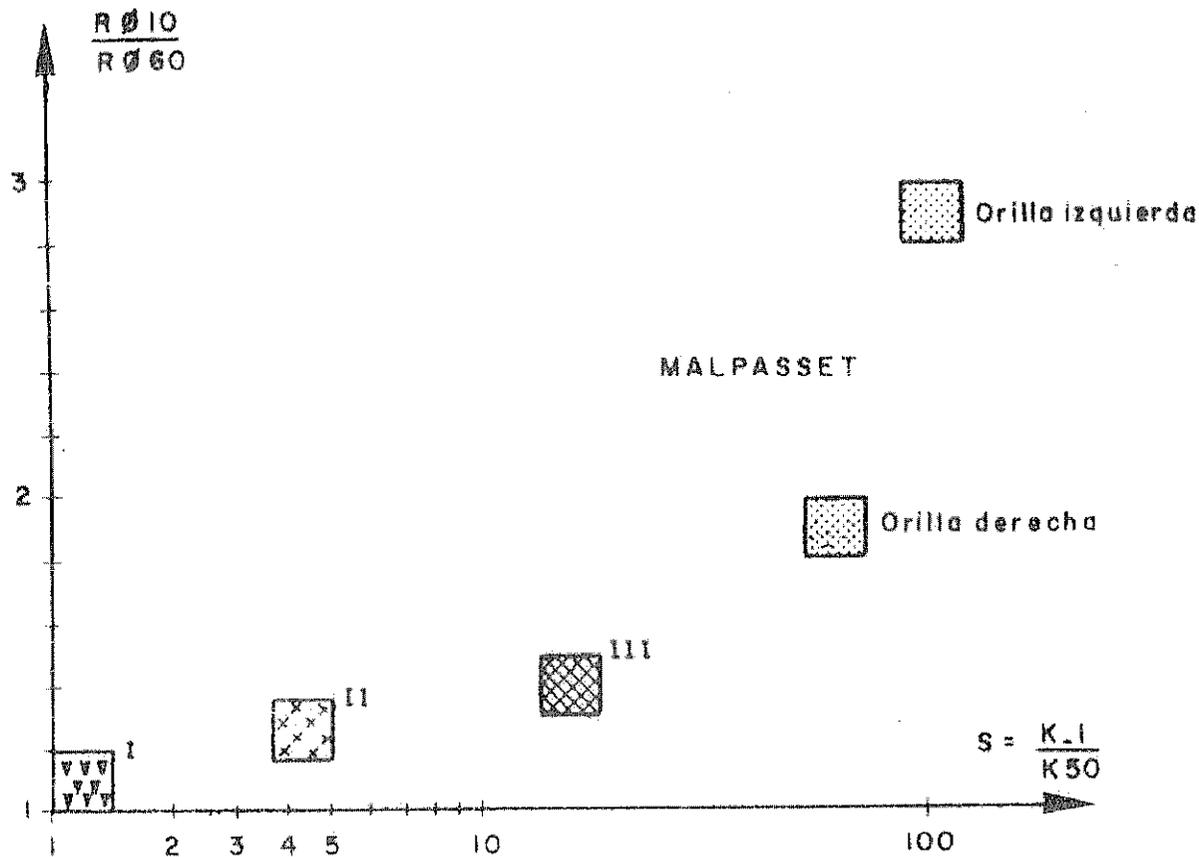


Fig. 5.15. Correlación entre los índices S y R_{10}/R_{60} (Habib y Bernaix, 1966). Datos de Malpasset, y además: Zona I: Caliza oolítica no fisurada.—II. Gneiss medio.—III. Caliza de microfisuración débil y macrofracturación clara e intensa.

3^a PARTE

SUELOS SEMISATURADOS

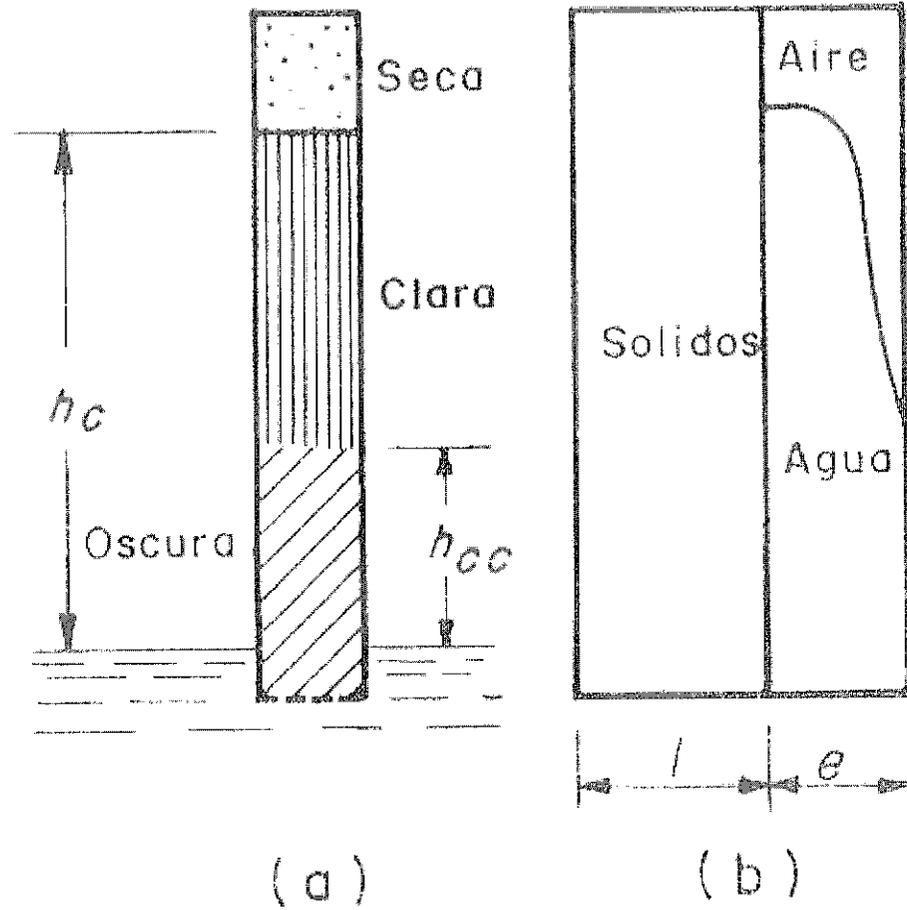


Fig. 5.18. Ascensión capilar del agua en arena seca.

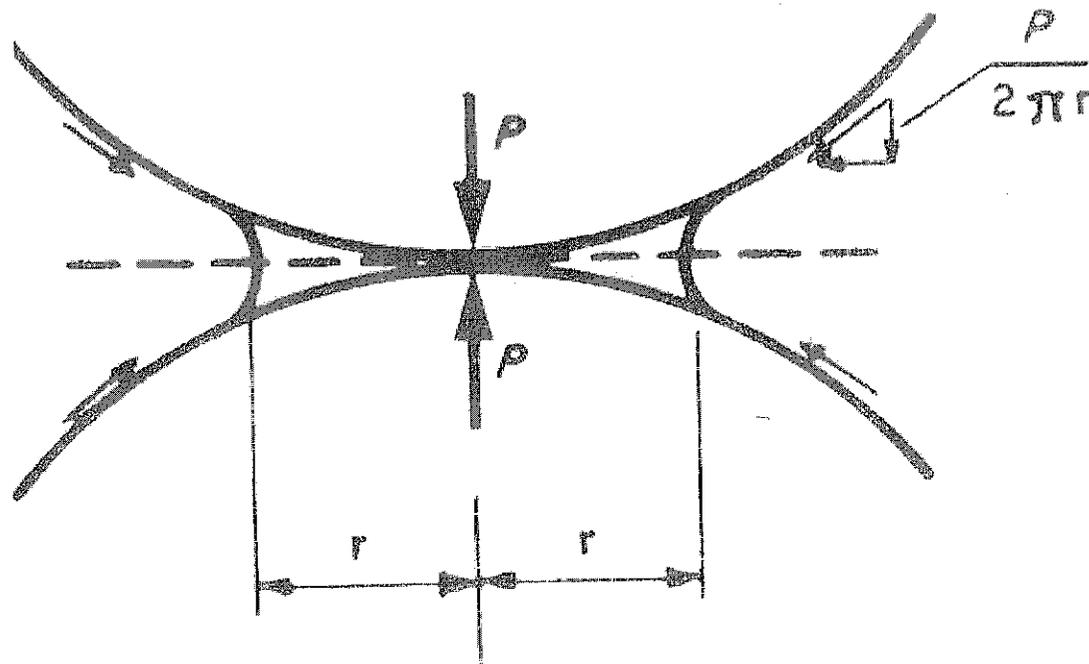
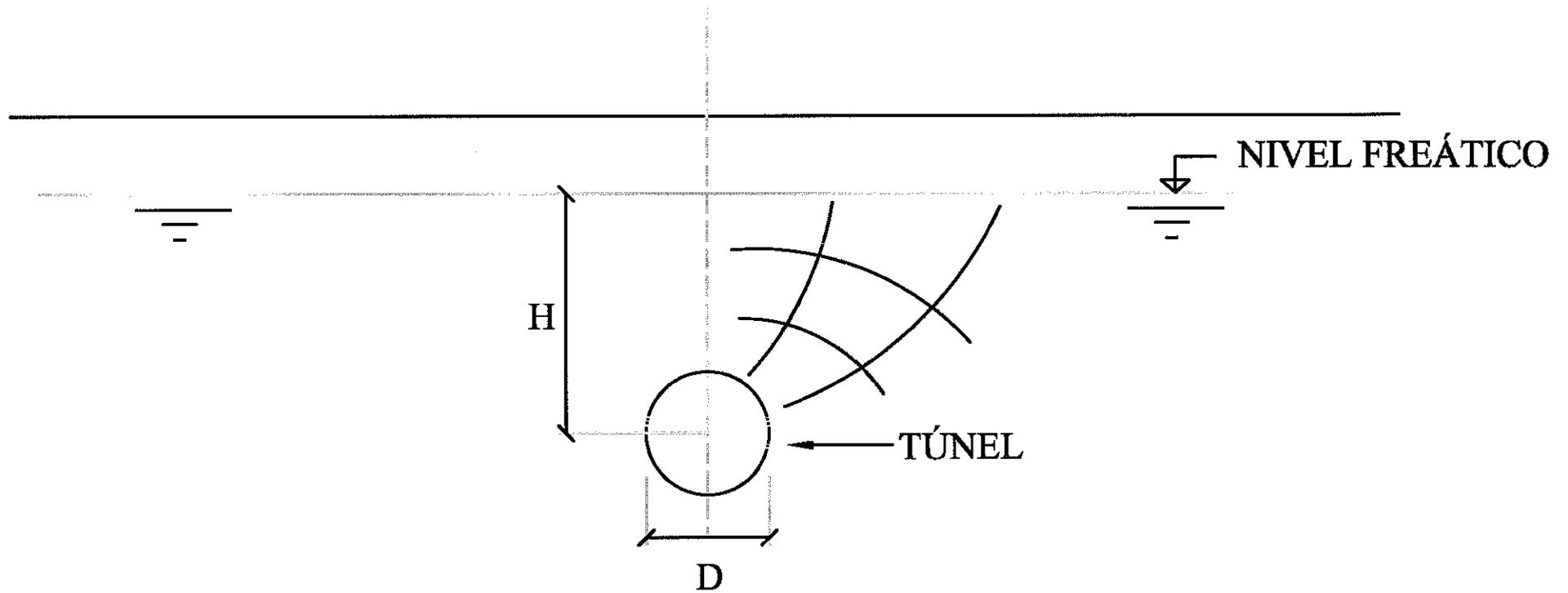


Fig. 5.19. Fuerzas introducidas por el agua de contacto.

CONSIDERACIÓN ADICIONAL

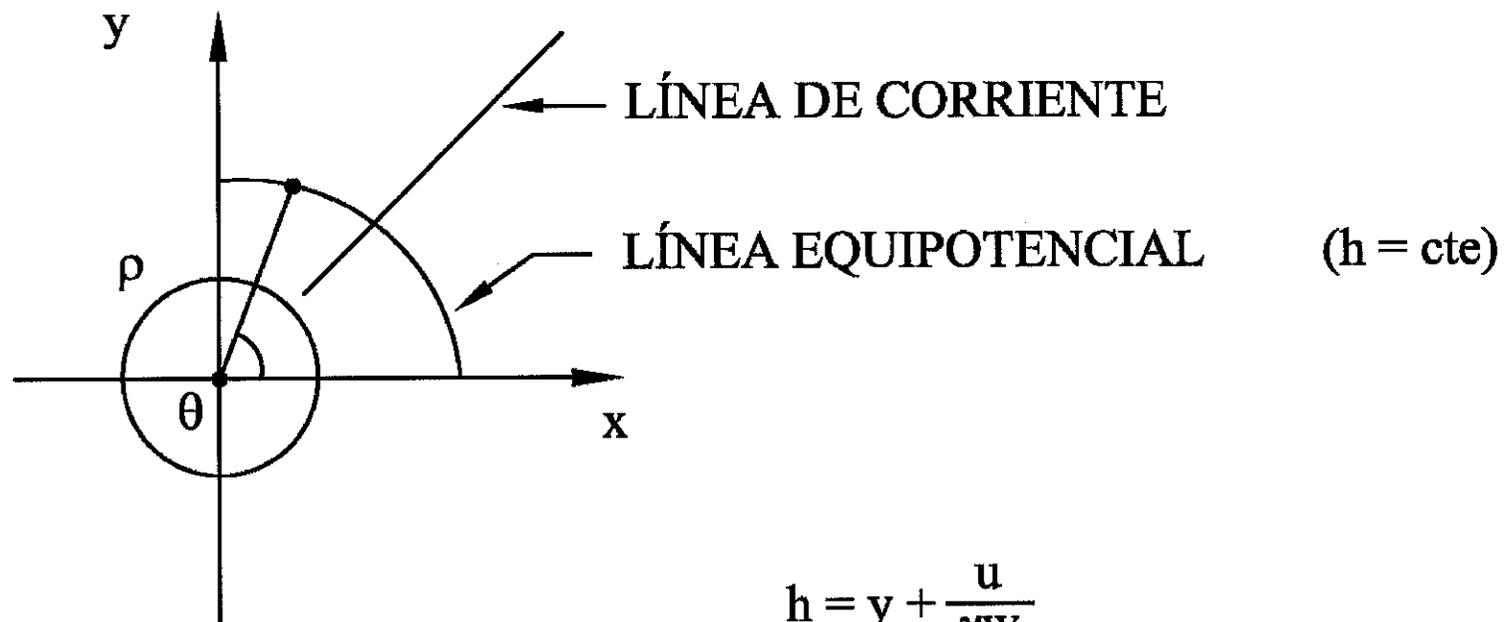
**Subsidencia causada por
los achiques de agua**

RED DE FILTRACIÓN HACIA UN TÚNEL



SOLUCIÓN ANALÍTICA

Flujo hacia un hueco cilíndrico



Ecuación diferencial del flujo

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad - \text{POTENCIAL } h = \text{ARMÓNICO}$$

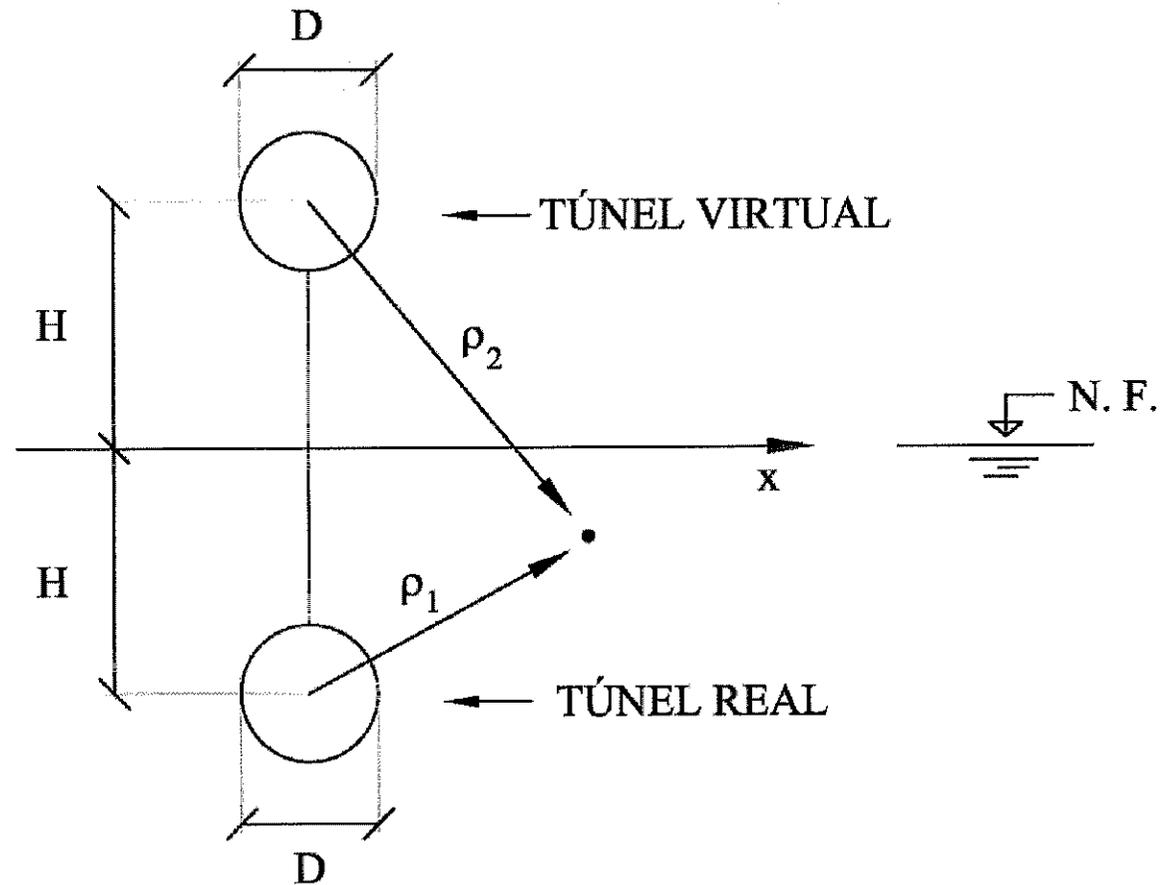
$$h = \text{Re}(\Omega)$$

$$\Omega = A \ln(x + iy)$$

$$x + iy = \rho \cdot e^{iQ}$$

$$h = A \ln \rho \quad v = K \frac{A}{\rho} \quad Q = 2\pi \cdot K \cdot A$$

Flujo desde un hueco virtual a otro real. MÉTODO DE LAS IMÁGENES



Solución $h = A \ln \rho_1 - A \ln \rho_2$

Condición de contorno

Nivel freático

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$h = 0$$

Túnel real

$$\rho_1 = r$$

$$\rho_2 \cong 2H$$

$$h = -H$$

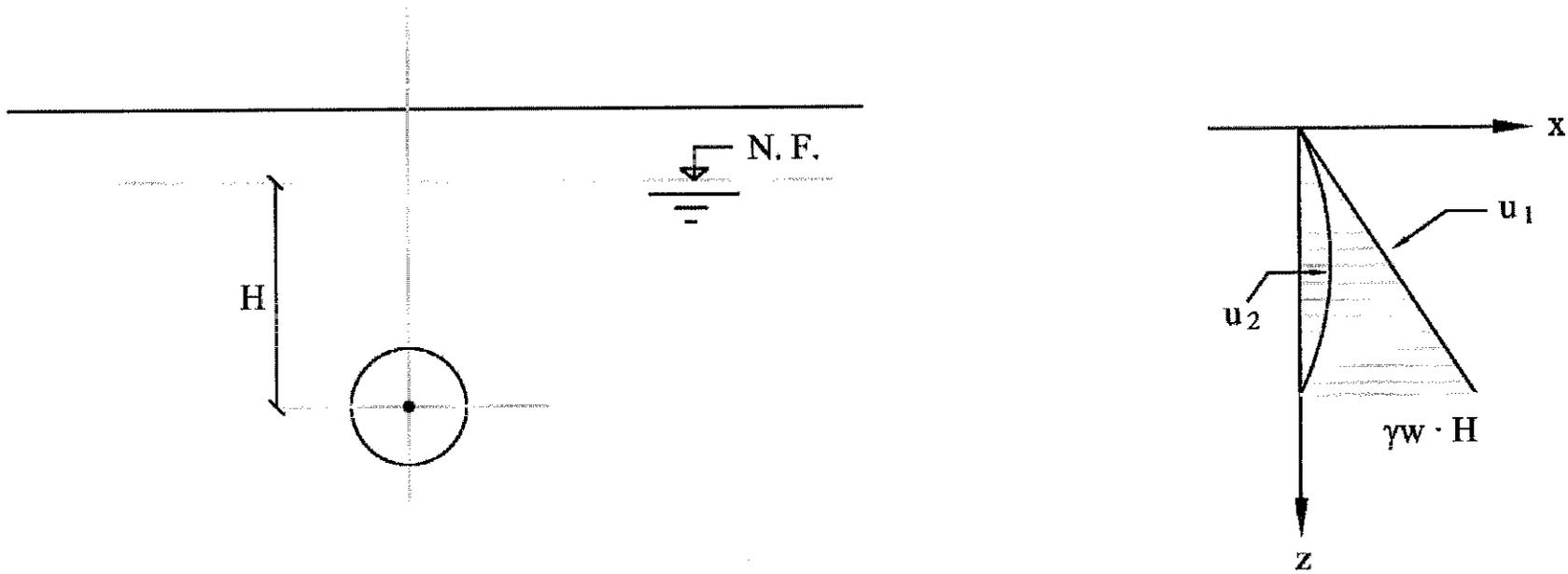
$$(H \gg r)$$

$$H = A \ln \frac{2H}{r} = A \ln \frac{4H}{D}$$

Caudal de filtración

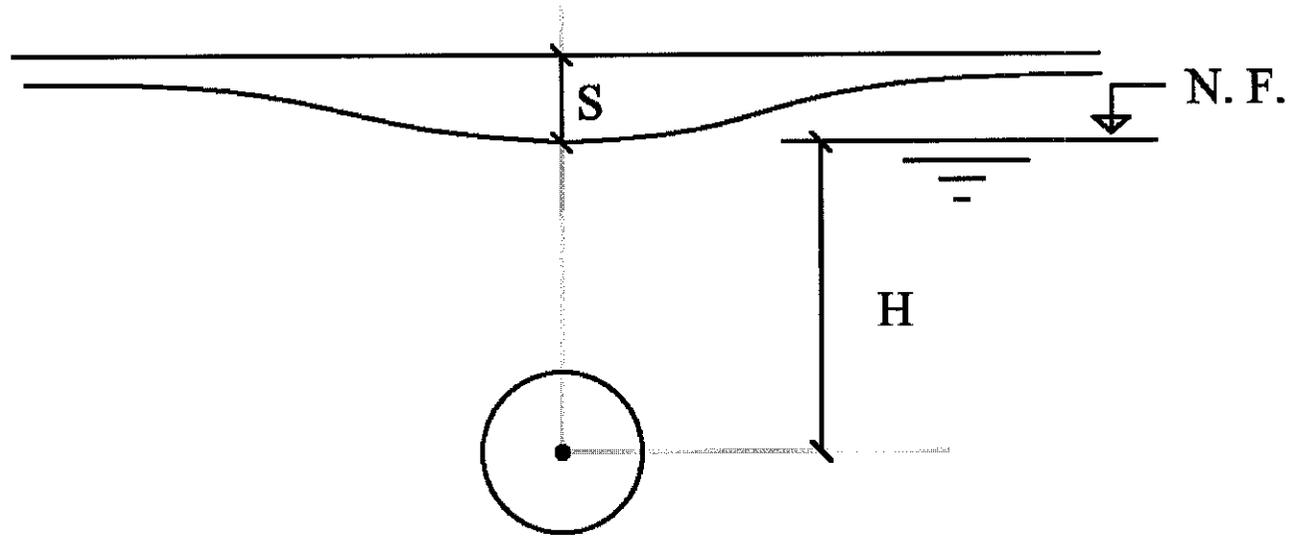
$$Q \cong \frac{2\pi \cdot K \cdot H}{\ln \cdot \left(\frac{4H}{D} \right)}$$

LEY DE PRESIONES INTERSTICIALES



$u_1 =$ ANTES DE EXCAVAR
 $u_2 =$ DESPUÉS DE EXCAVAR

SUBSIDENCIA



$$S \cong \int_0^H \frac{du}{E} \cdot dz \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_w \cdot H^2}{E}$$

Ejemplo

$E = 20 \text{ MPa}$

$H = 20 \text{ m}$

$S = 10 \text{ cm}$