



INTERACCION SUELO AGUA

PARTE 2 - FLUJO

Área de Geotecnia.
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



INTERACCION SUELO AGUA

PARTE 2 - FLUJO

CONTENIDO TEMÁTICO

- Trazado de redes de flujo
- Cálculo de caudales filtrados.
- Conceptos de filtros y drenes naturales.

REFERENCIAS

- Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cuarta edición. BRAJA M. DAS. Capítulo 7 Filtración, página 142
- Soil Mechanics in Engineering Practice. 3° Edición. Terzaghi, K.; Peck, R. y Mesri, G. Chapter 4. Hydarulic of soils. Pag 213.

Área de Geotecnia.

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA



REDES DE FILTRACION

Condiciones de Filtración.

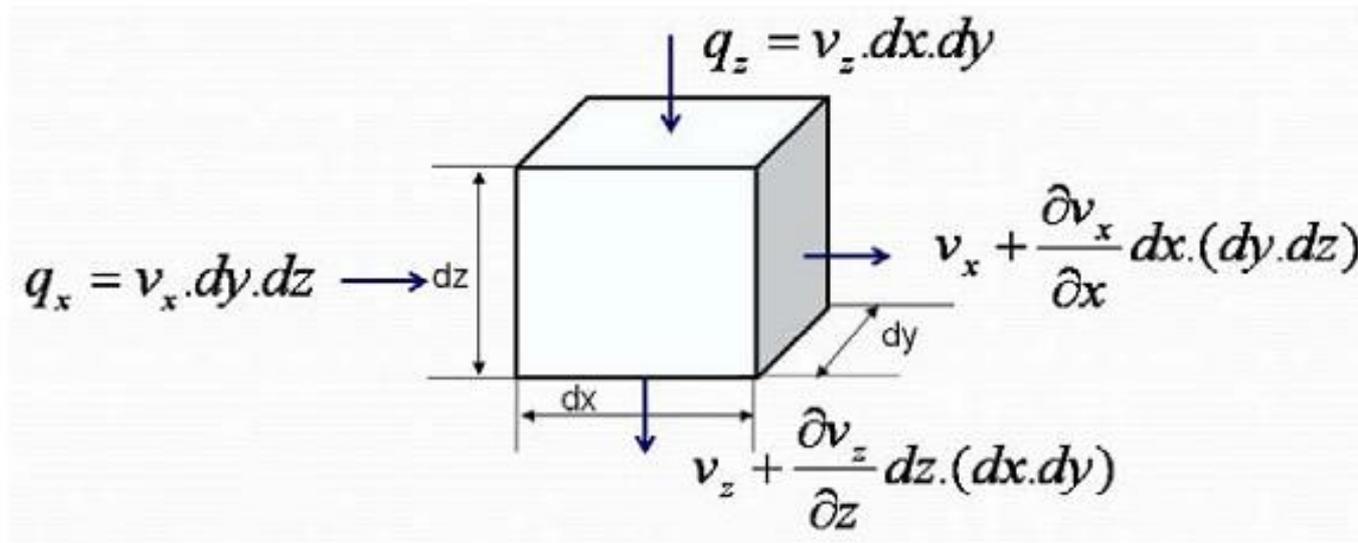
Aspectos básicos:

- **Caracterización del medio → geometría**
- **Ecuación de comportamiento → Ley de Darcy**
- **Condiciones de frontera (contorno):**
 - Ingreso y egreso
 - Contornos “impermeables”
 - Contacto con estructuras externas
 - Línea de saturación.
- **Consecuencia**
 - **Líneas de corriente → cuadal**

REDES DE FILTRACION

Condiciones de Filtración.

Filtración en elemento diferencial



Condiciones:

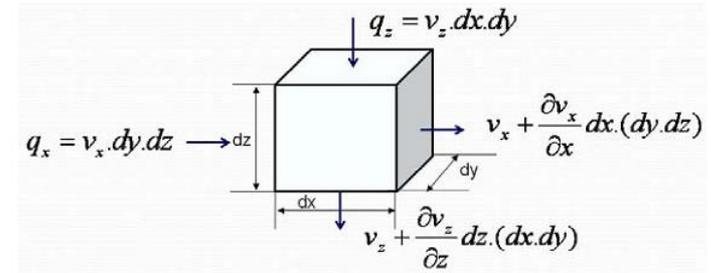
- El régimen es establecido \rightarrow constante en el tiempo
- El suelo está saturado \rightarrow no hay flujo si el suelo no está saturado
- El agua y las partículas sólidas son incompresibles.
- El flujo no modifica la estructura del suelo en ninguna forma.
- No hay fuentes o sumideros de agua



REDES DE FILTRACION

Condiciones de Filtración.

Filtración en elemento diferencial



Sistema equilibrado

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)(dx \cdot dy \cdot dz) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)(dx \cdot dy \cdot dz) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)(dx \cdot dy \cdot dz) = 0$$

Considerando

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0 \quad v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = \frac{\partial h}{\partial z}$$

Ecuación diferencial

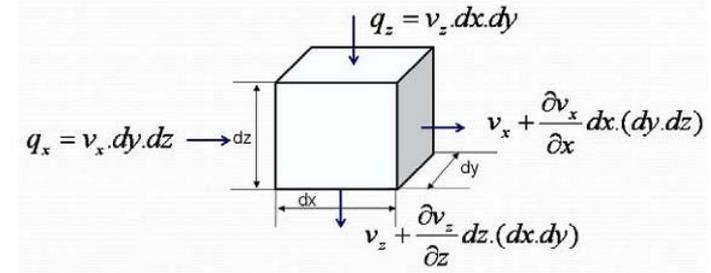
$$k_x \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2}\right) + k_y \left(\frac{\partial h^2}{\partial y^2}\right) + k_z \left(\frac{\partial h^2}{\partial z^2}\right) = 0$$



REDES DE FILTRACION

Ecuación diferencial

$$k_x \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} \right) + k_y \left(\frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right) + k_z \left(\frac{\partial h^2}{\partial z^2} \right) = 0$$



Observaciones:

- La ecuación diferencial tiene como solución una función que derivada en la forma correspondiente permite satisfacer la igual planteada
- La función solución tiene como variables independientes x , y , z . La variable dependiente es la presión hidráulica “ h ”.
- La solución que se busca es independiente del tiempo (no incluye la variable “ t ”).
- La solución se aplica para un medio anisótropo, depende de k_x ; k_y y k_z , que pueden ser distintos entre sí.
- El problema es tri dimensional

Función solución

$$\rightarrow h = f(x,y,z)$$

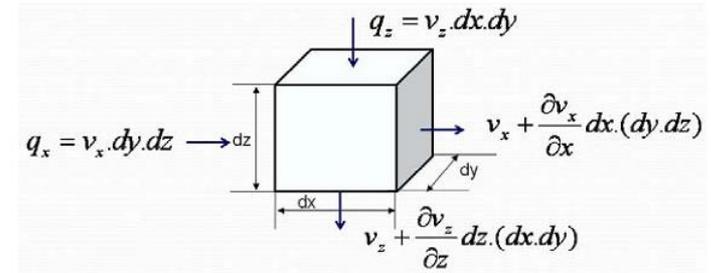
\rightarrow No se acostumbra a buscar la función analítica



REDES DE FILTRACION

Ecuación de Laplace:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$



Problema bi-dimensional

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Suelo isotrópico

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

REDES DE FILTRACION



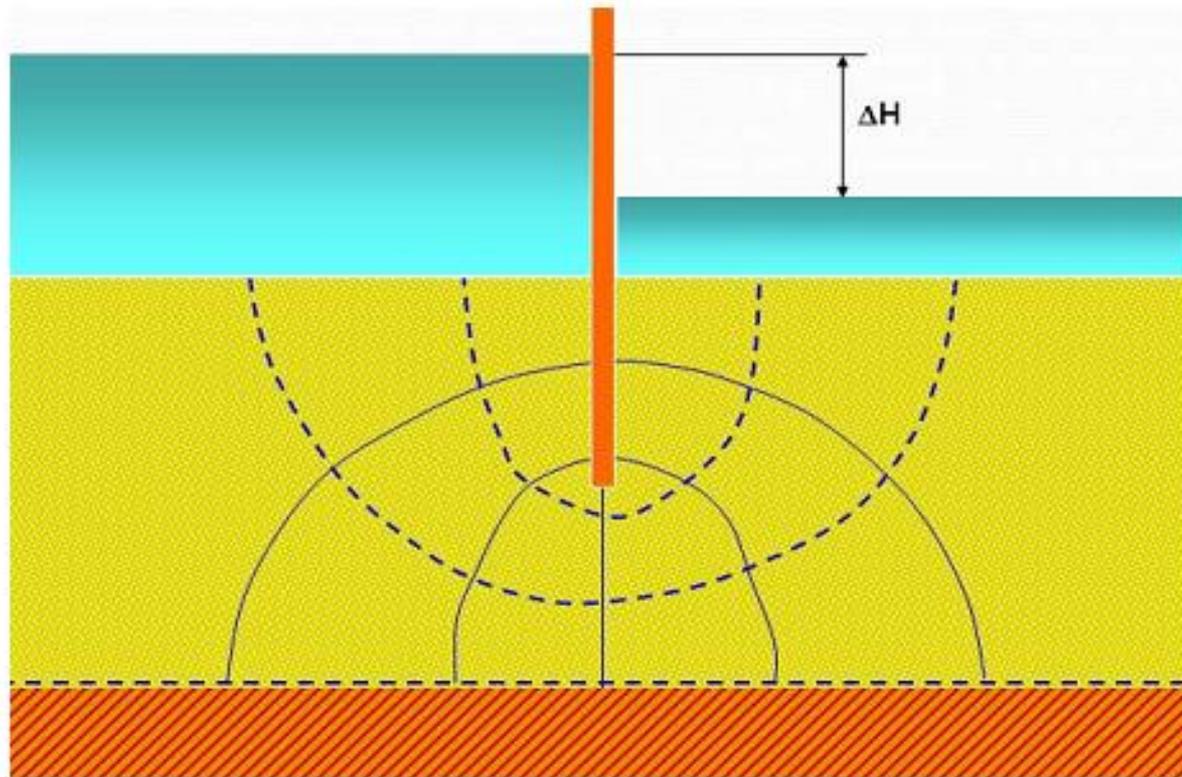
Ecuación de Laplace:

Suelo isotrópico

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Líneas

———— Equipotenciales
----- de Flujo





CALCULO DE CAUDAL

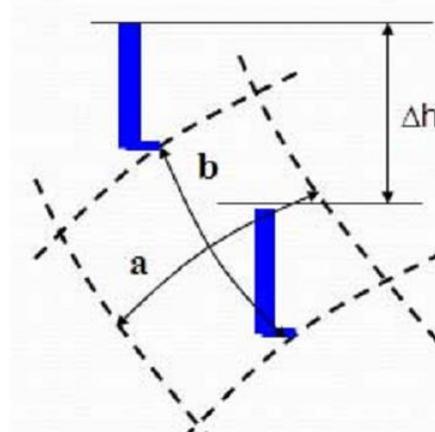
Flujo a través de un tubo de flujo.

$$\Delta q = \frac{q}{N_t}$$

Pérdida de carga entre 2 equipotenciales.

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{N_e}$$

Caudal en un tubo y entre 2 equipotenciales



$$\Delta q = k \cdot a \cdot 1 \cdot \frac{\Delta h}{b}$$

Caudal total para Nf tubos de flujo

$$\Delta q = k \cdot a \cdot 1 \cdot \frac{\Delta H}{N_e} \cdot \frac{1}{b} \cdot N_f$$

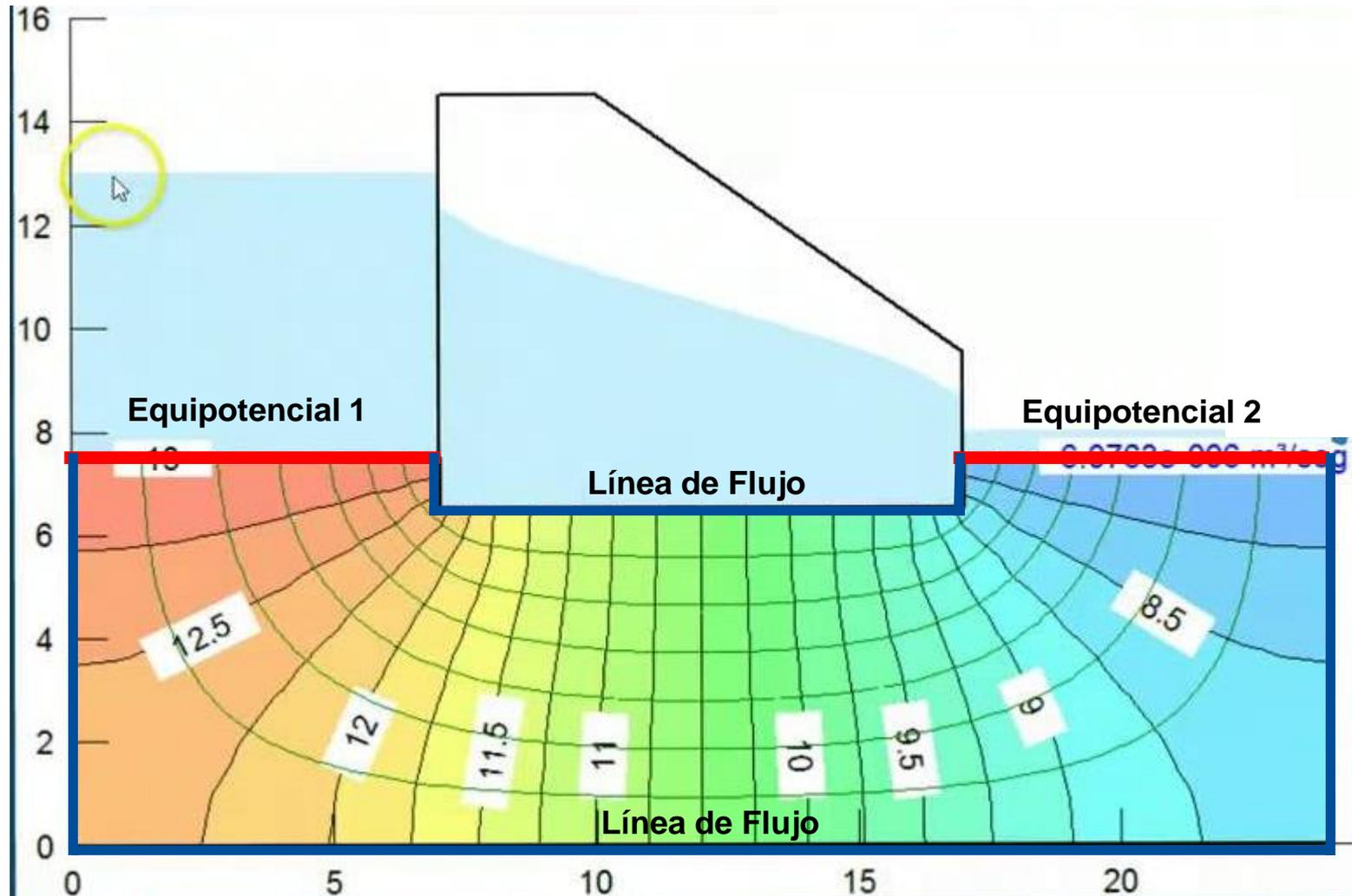
Red de flujo con elementos cuadrangulares a=b

$$\Delta q = k \cdot \frac{N_f}{N_e} \cdot \Delta H$$



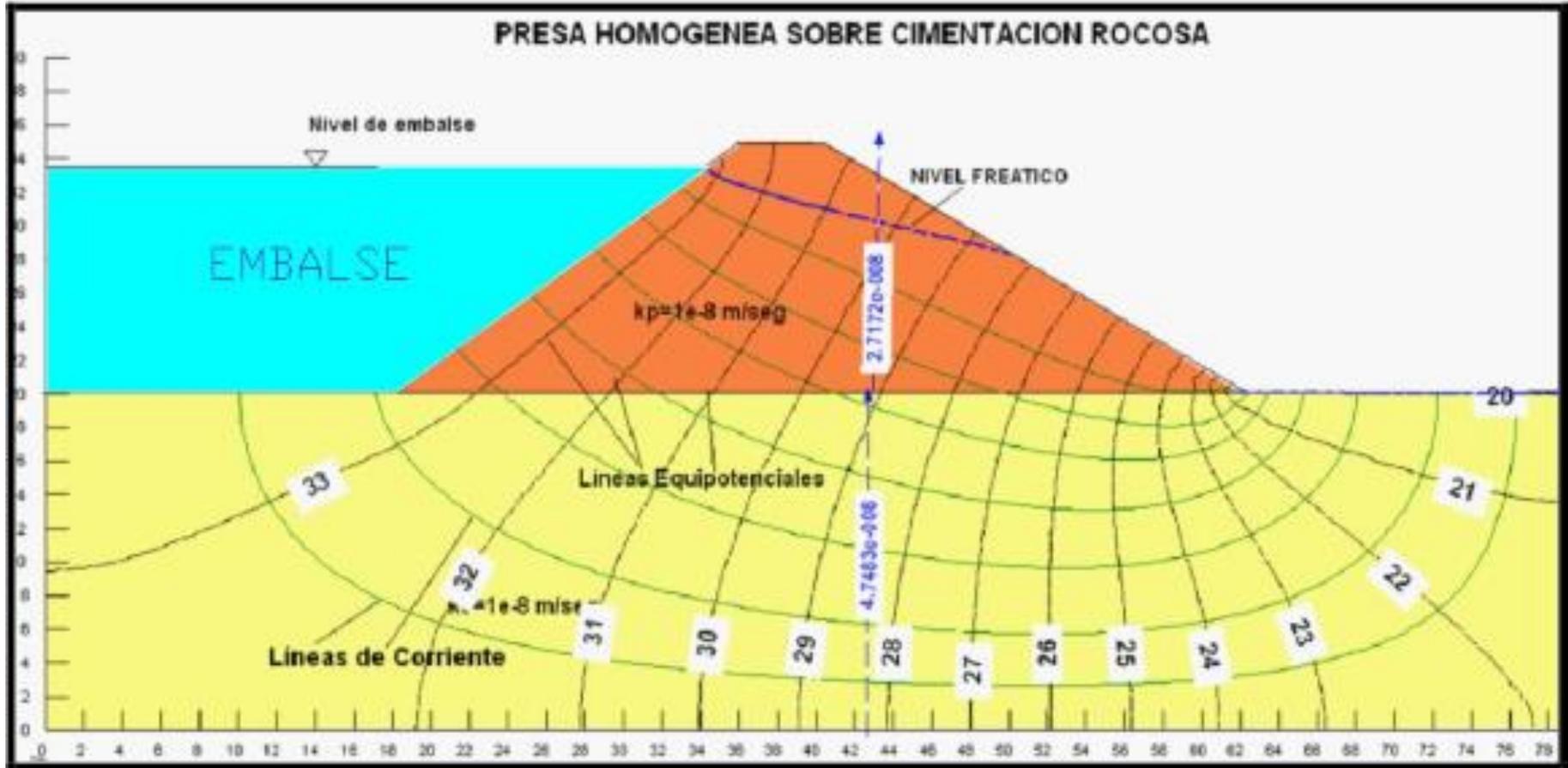
REDES DE FILTRACION

Condiciones de Filtración.

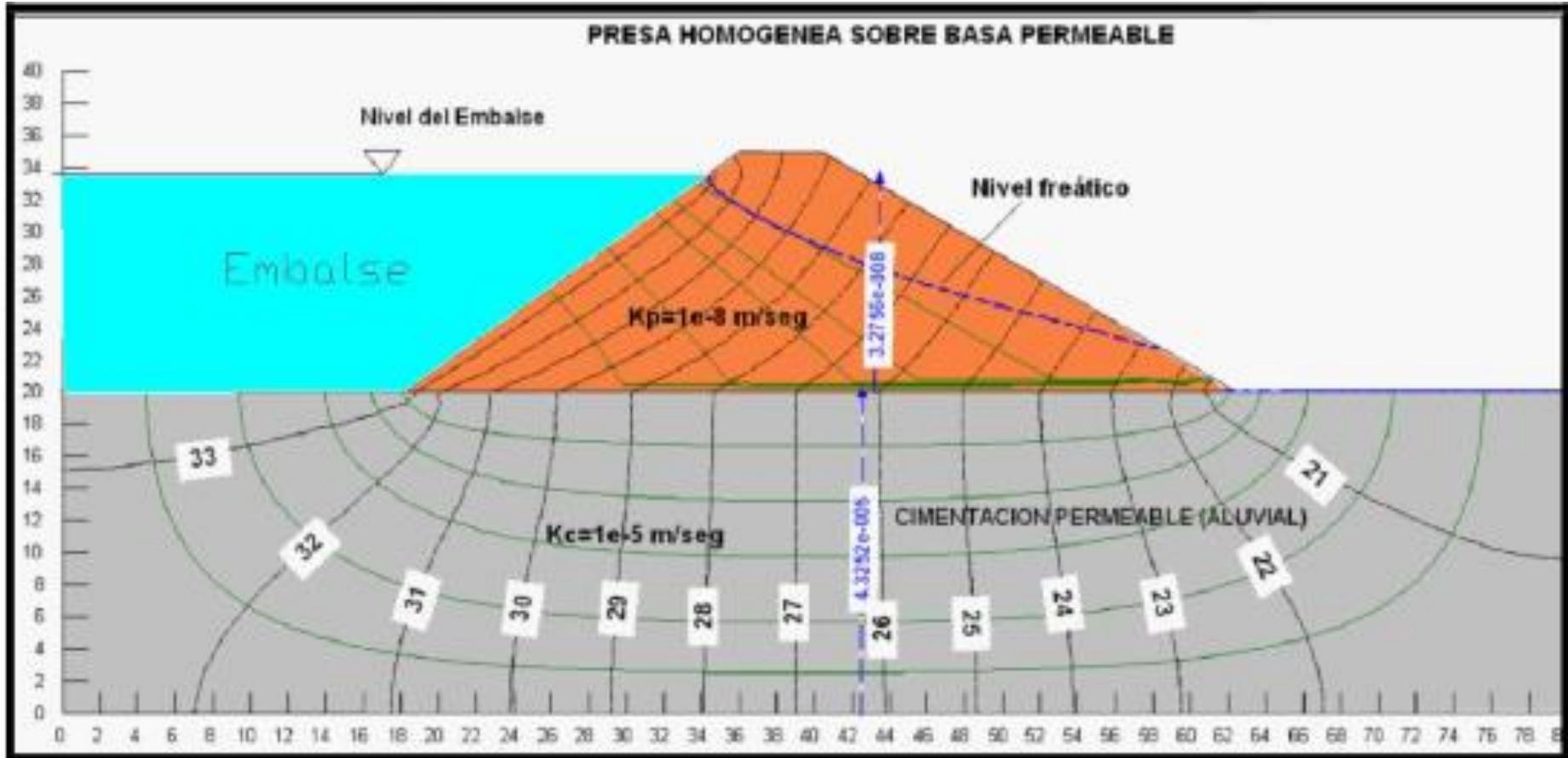




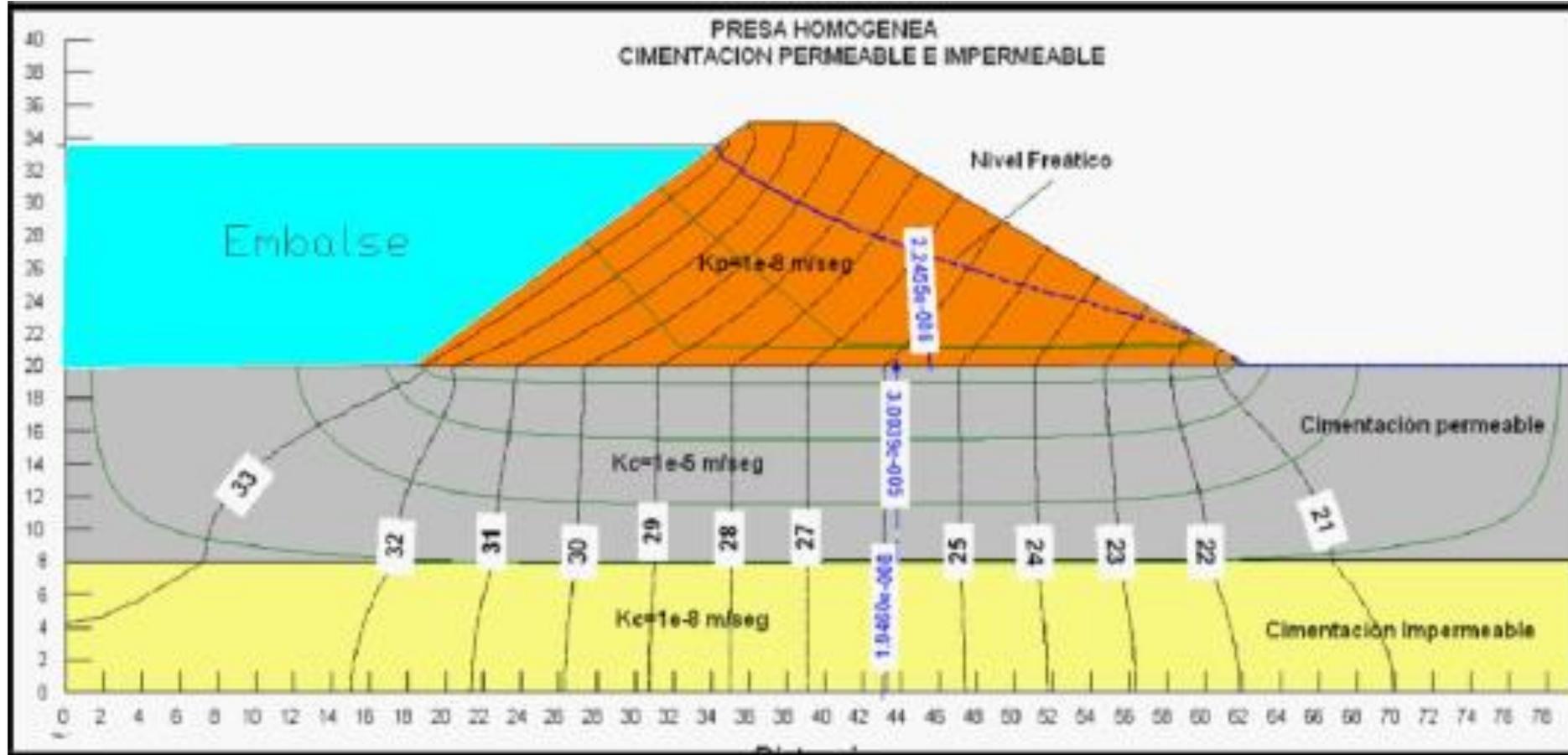
REDES DE FILTRACION



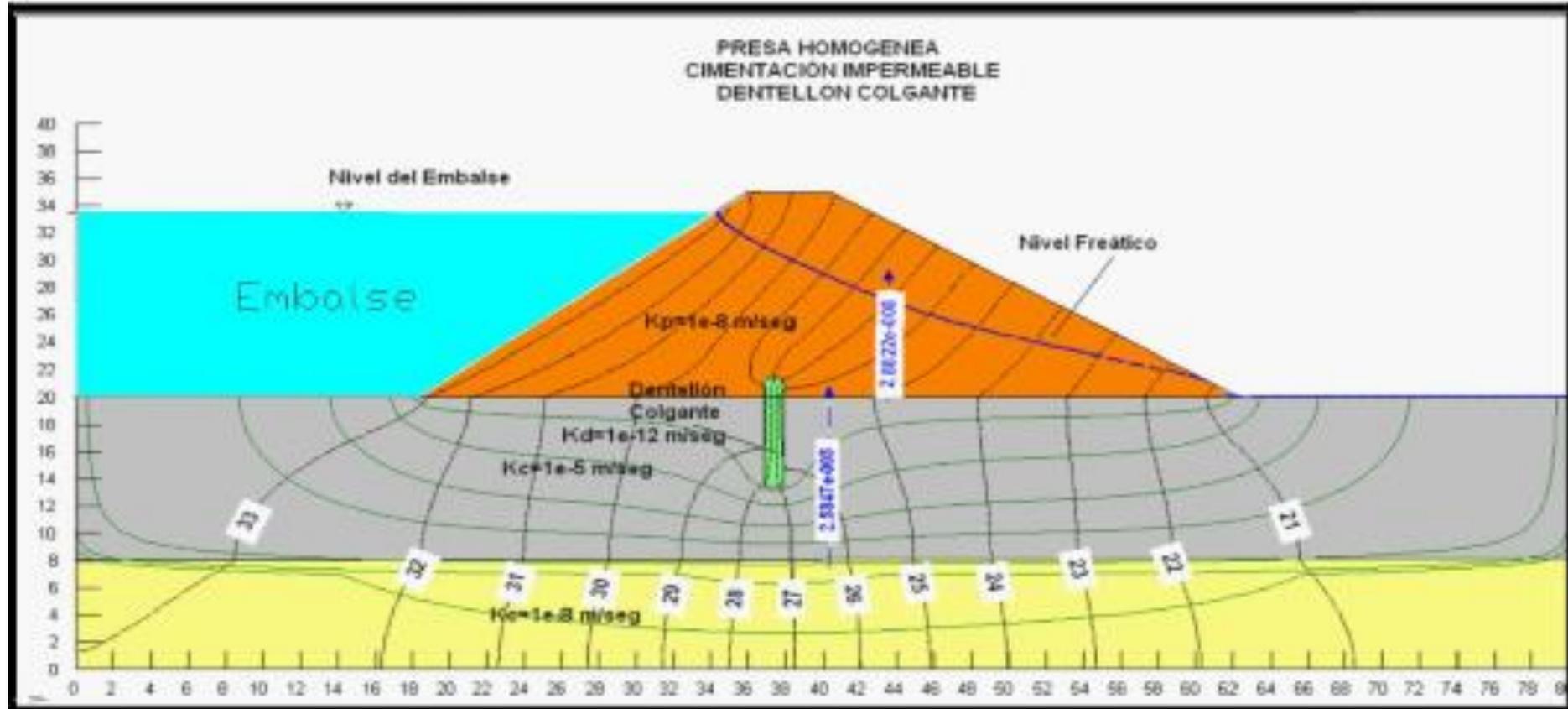
REDES DE FILTRACION



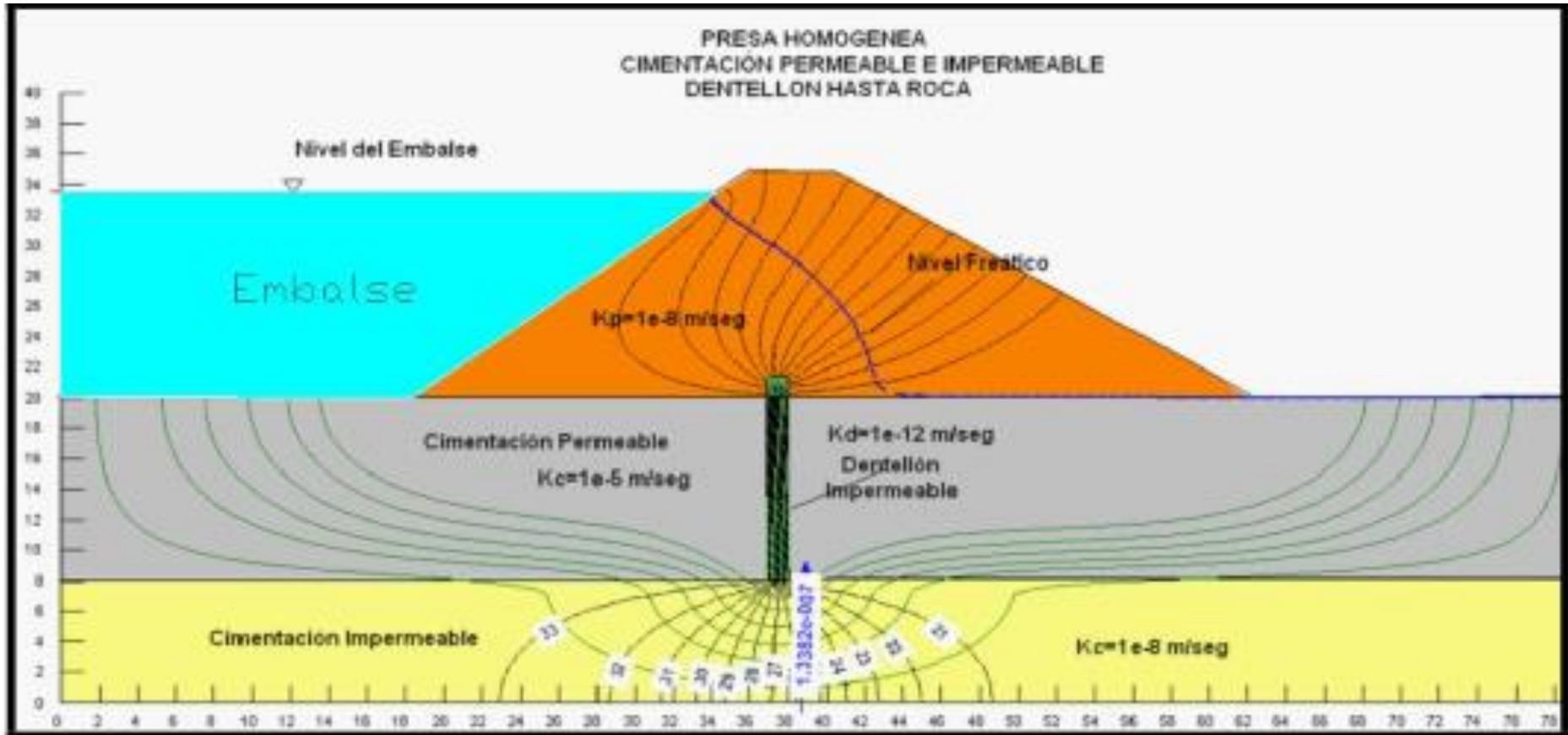
REDES DE FILTRACION



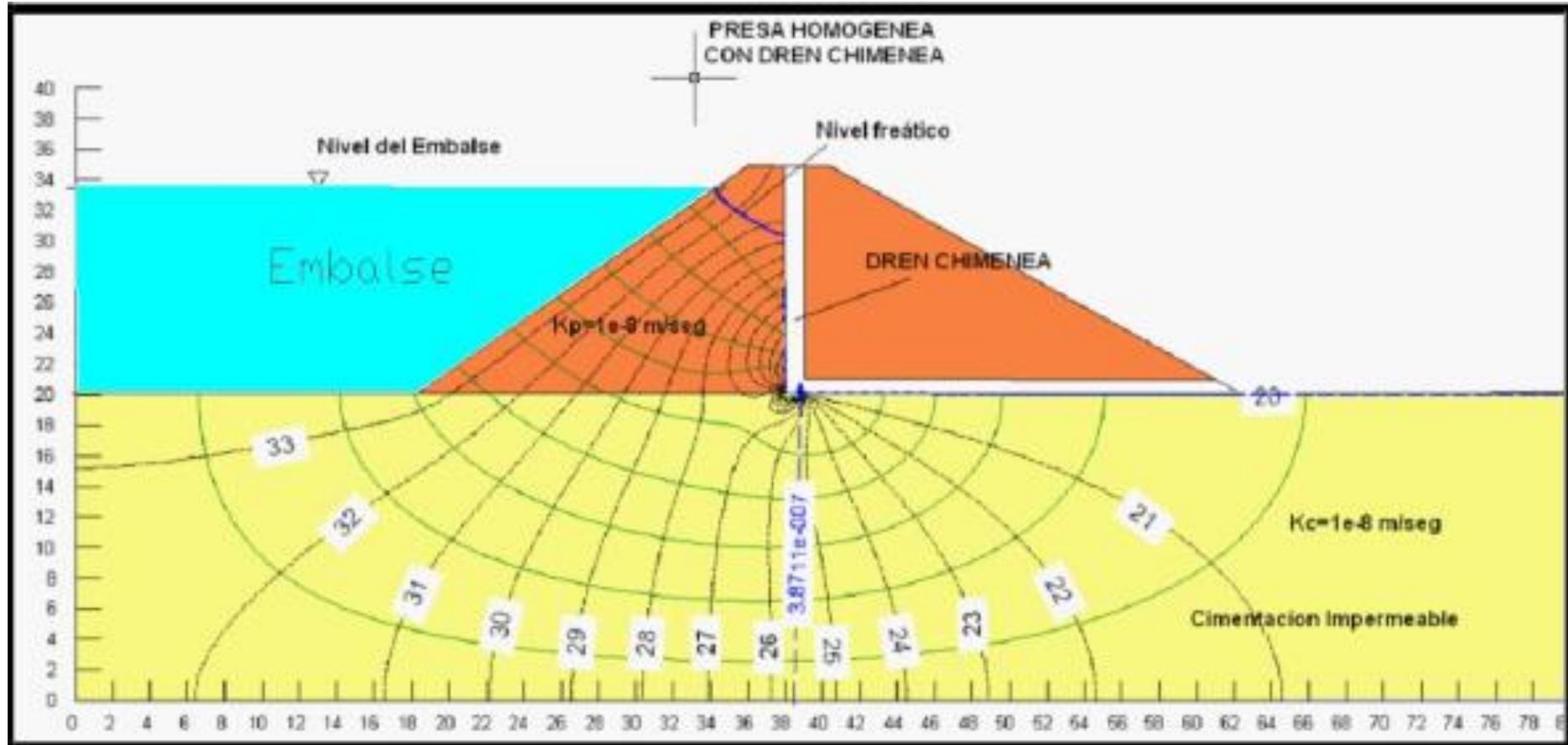
REDES DE FILTRACION



REDES DE FILTRACION



REDES DE FILTRACION

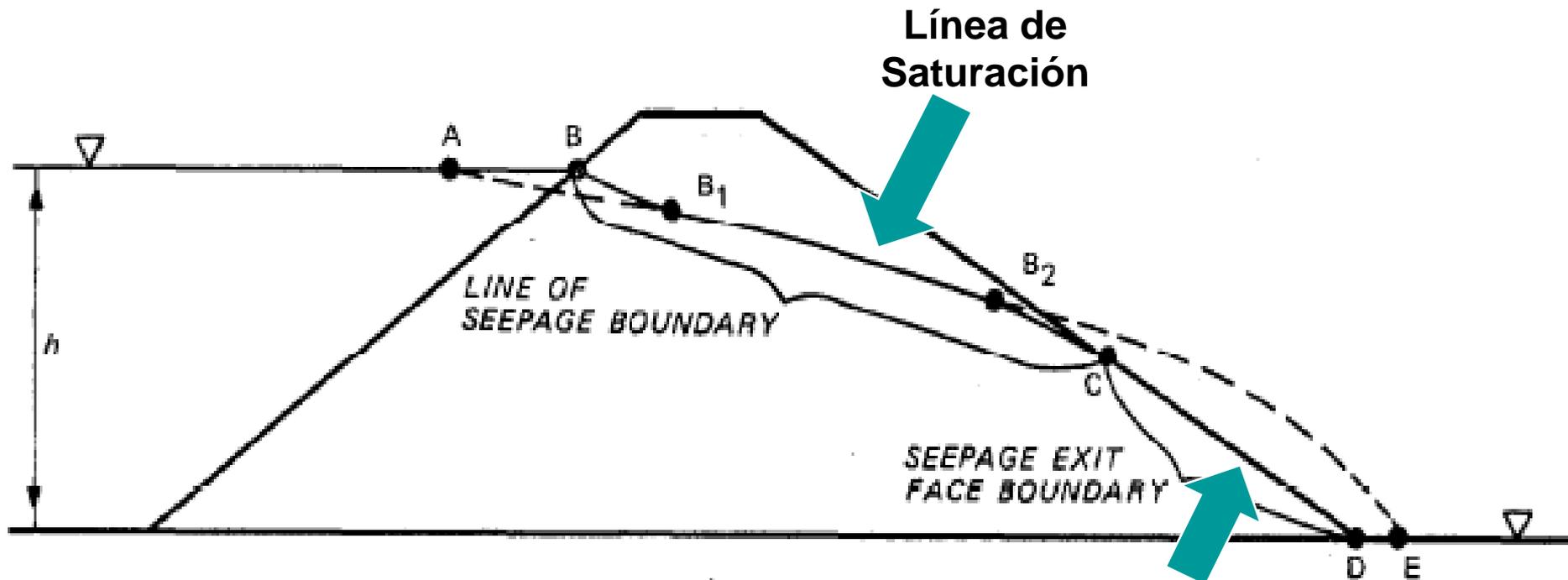




REDES DE FILTRACION

Redes de Flujo en el Cuerpo de Presa

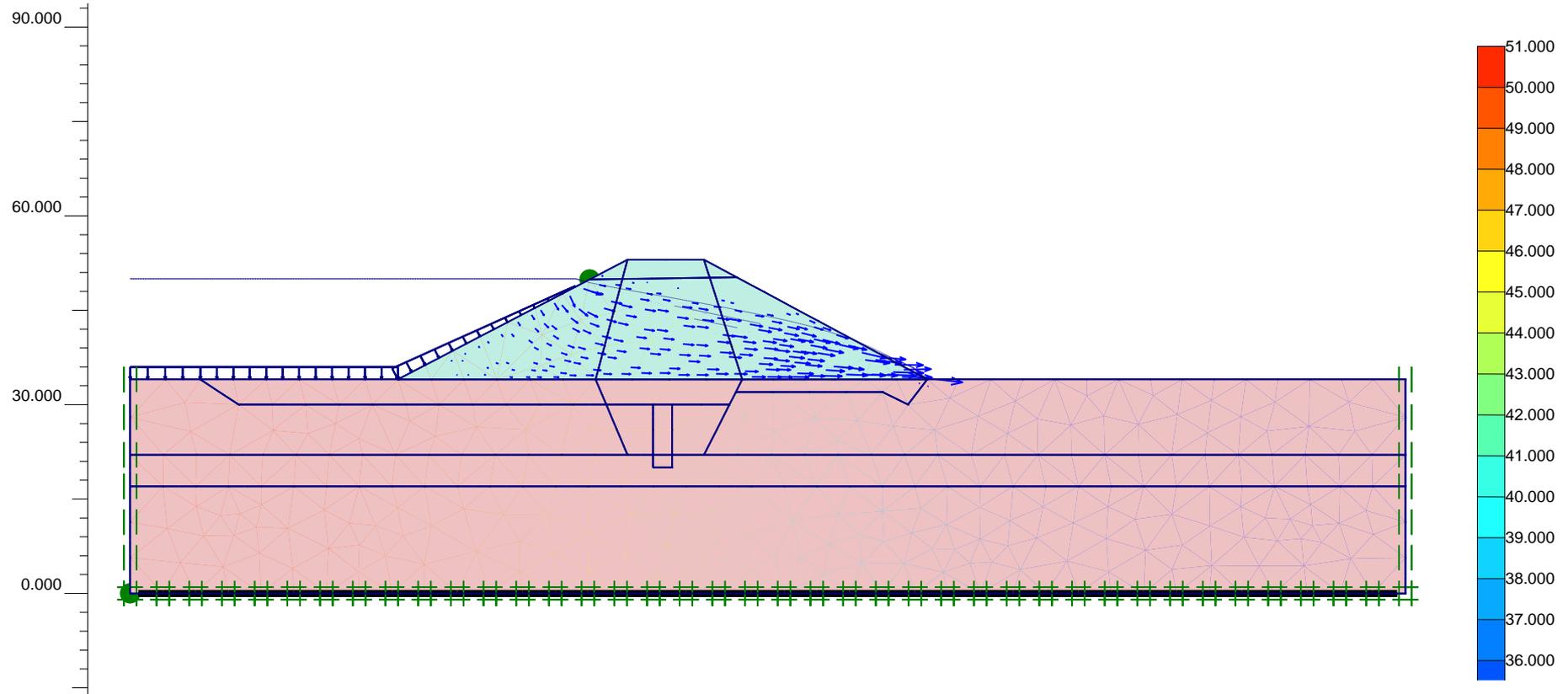
Método de diseño de red flujo según Casagrande



Sector singular:

La presión de movimiento del agua, entre C y D, puede superar a la presión entre partículas

REDES DE FILTRACION



Condiciones de Trazado:

Redes de Flujo. Ejemplo 2. Fundación menos permeable



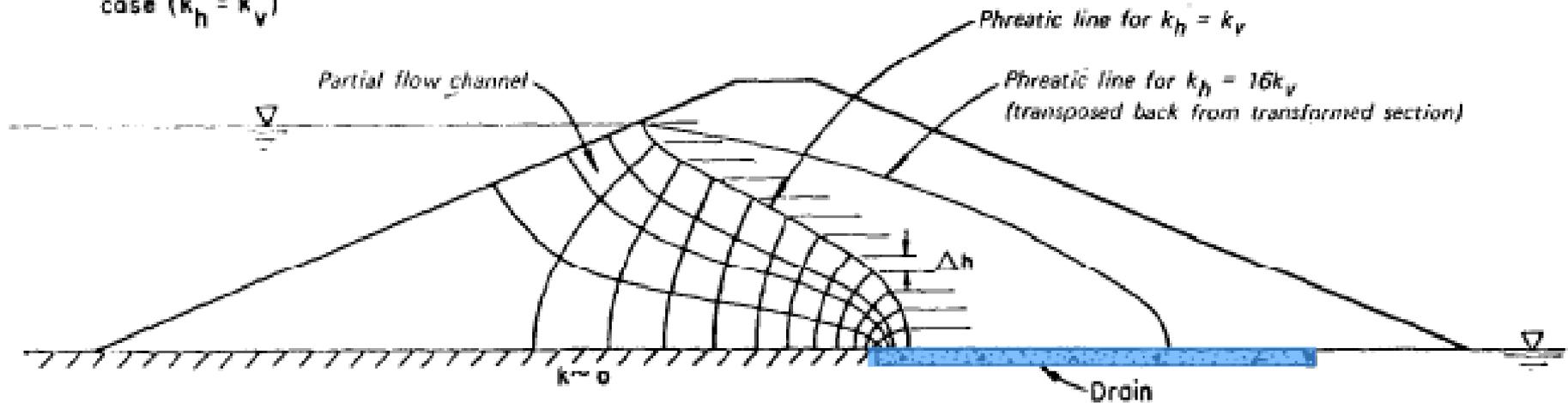
REDES DE FILTRACION

DREN PARA MODIFICAR POSICION DE LINEA DE SATURACION

Redes de Flujo en el Cuerpo de Presa.

Efectos de los Drenes Horizontales

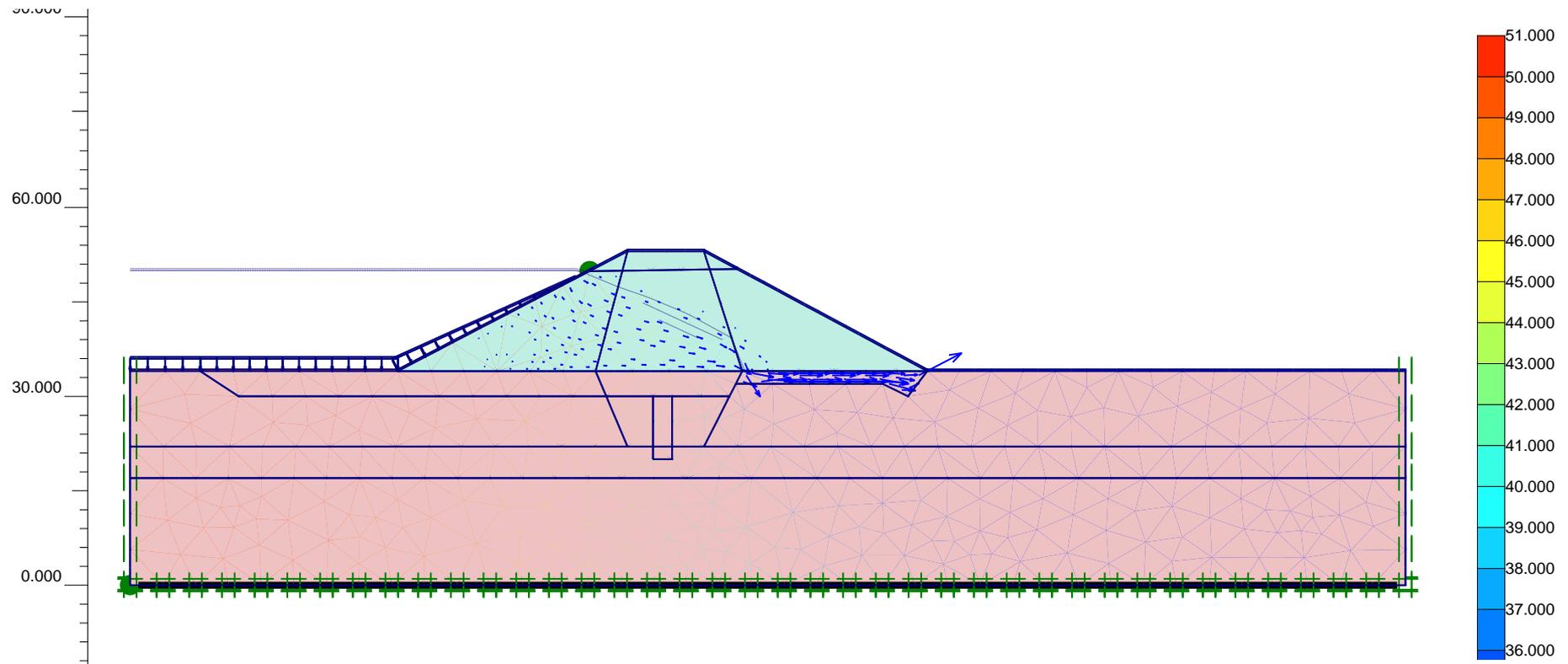
Note: Flow net is for isotropic case ($k_h = k_v$)





FILTROS Y DRENES

Modelo Numérico



Redes de Flujo en el Cuerpo de Presa.

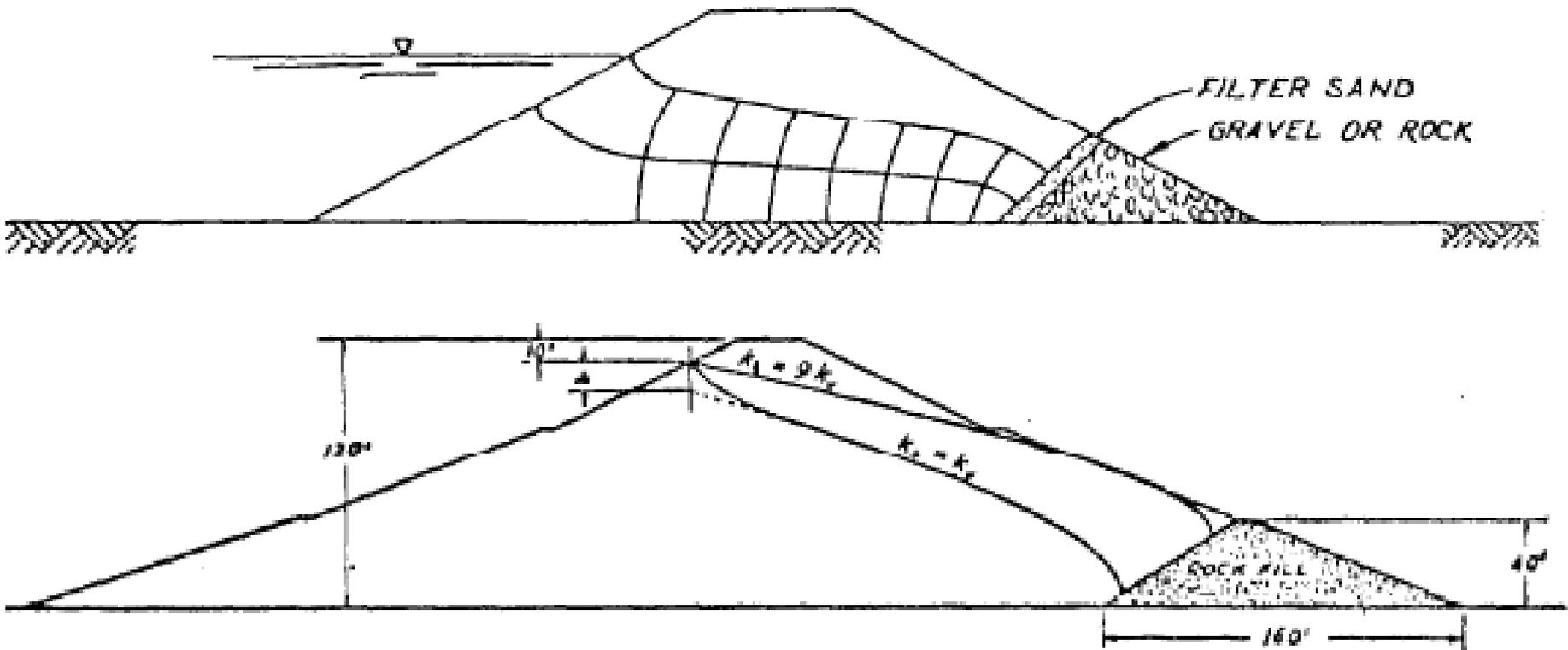


REDES DE FILTRACION

DREN PARA MODIFICAR POSICION DE LINEA DE SATURACION

Redes de Flujo en el Cuerpo de Presa.

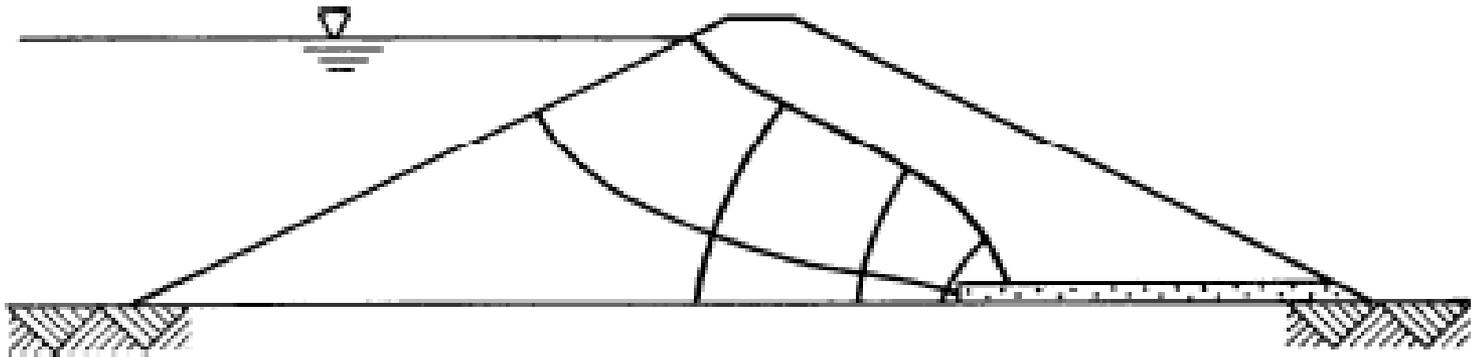
Efectos de los Drenes de Pie



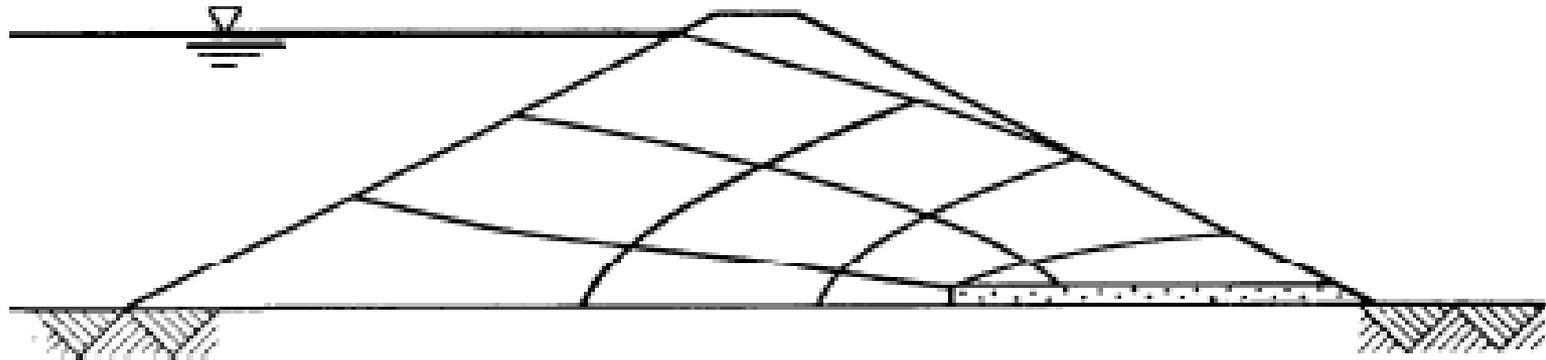
REDES DE FILTRACION

DREN PARA MODIFICAR POSICION DE LINEA DE SATURACION

Sistemas de drenes – Efecto de la Anisotropía



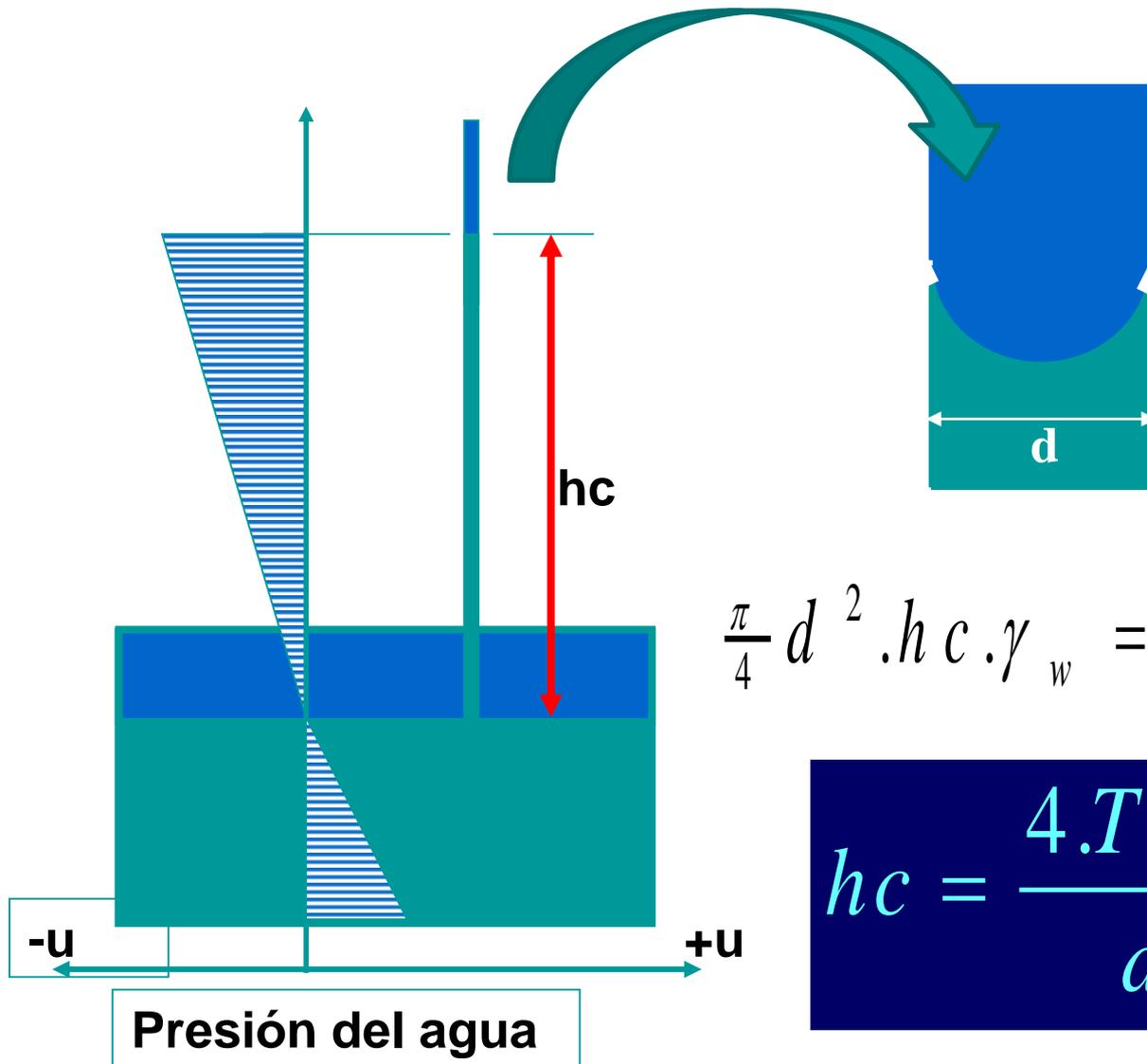
$$K_H = K_V$$



$$K_H = 9K_V$$



REDES DE FILTRACION



$$\frac{\pi}{4} d^2 \cdot hc \cdot \gamma_w = \pi \cdot d \cdot T \cdot \cos \alpha$$

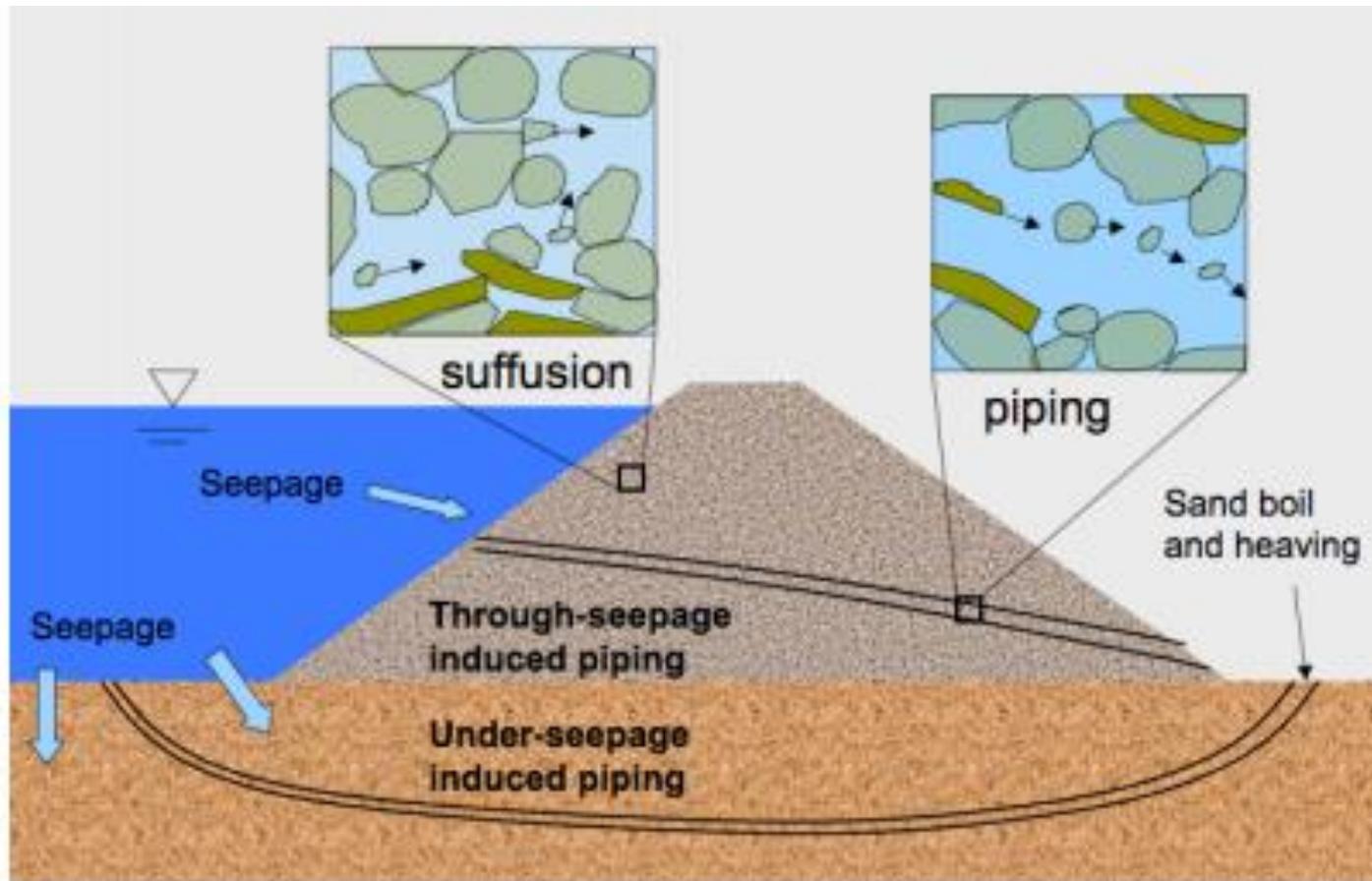
$$hc = \frac{4 \cdot T \cdot \cos \alpha}{d \cdot \gamma_w}$$



INESTABILIDAD POR FILTRACION

INESTABILIDAD DE FLUJO EN SUELO:

- Erosión (Tubificación)
- Erodabilidad (Inestabilidad interna del suelo)





FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

Objetivo:

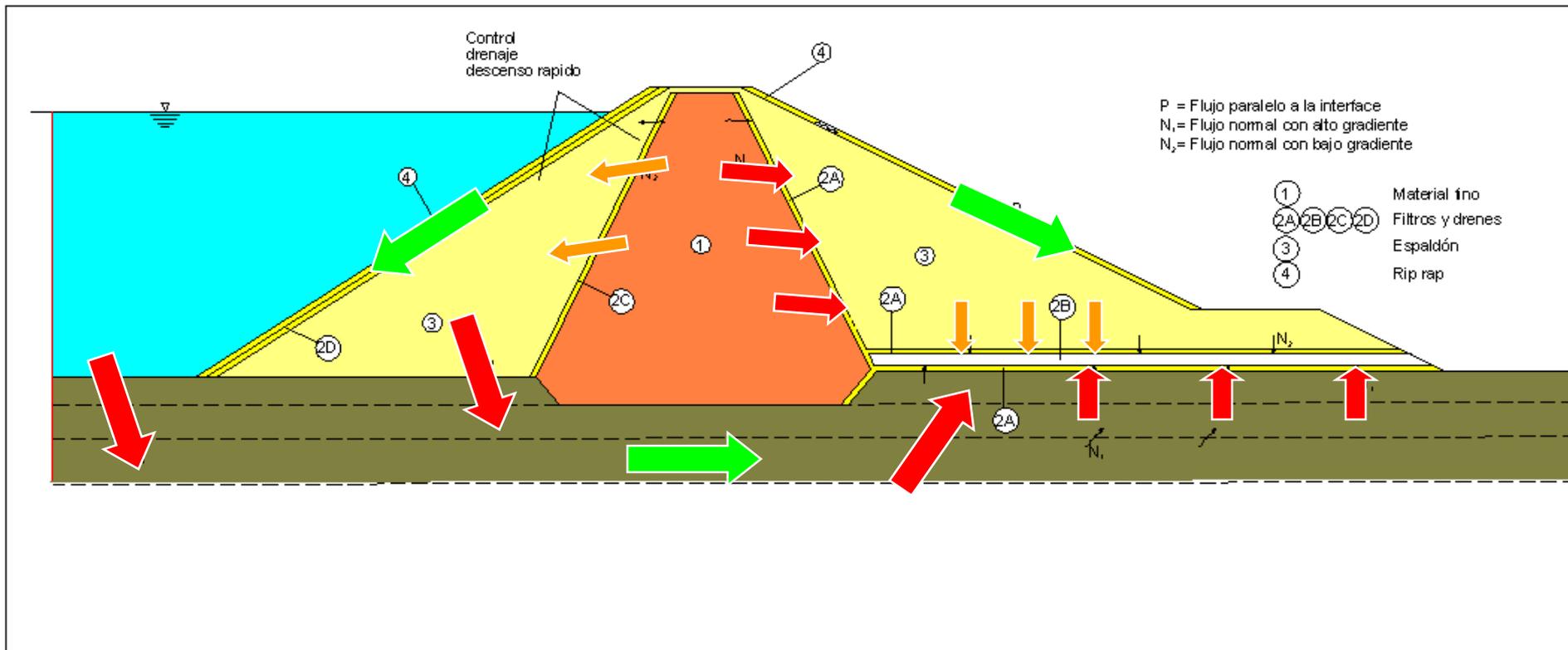
Eficiente control del movimiento del agua en el interior del cuerpo de presa

Requerimientos:

- Capacidad de trabajo durante la totalidad de la vida útil de la obra.
- Requerimiento de mantenimiento mínimo.
- **ESTABILIDAD.** Capacidad de retención de materiales finos.
- **PERMEABILIDAD.** Permitir el movimiento “libre” del agua.

FILTROS Y DRENES

EJEMPLO DE FILTROS Y DRENES



DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

Localizacion de elementos de control de filtración



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

FILTROS:

- Debe tener la capacidad de evitar la migración del suelo que “protege”
- Debe tener una permeabilidad superior a la del suelo que protege
- La dirección de flujo es perpendicular a la interface suelo - filtro

DRENES:

- Debe tener una buena capacidad de descarga de las aguas que recoge.
- Facilidad de traslado a las zonas o puntos de descarga.



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

CRITERIOS BÁSICOS:

- El material del filtro **debe ser más abierto** y tener un tamaño de grano más grande que protegido suelo.
- La **migración de partículas hacia el filtro** pone en peligro el terraplén, destruyendo la estructura protegida.
- La **obtención del filtro** puede causar la pérdida de la capacidad de evacuación.
- Se basa en la **relación de tamaños** de partículas entre el suelo protegido y el filtro.



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

PASOS DE DISEÑO:

- 1. Definir la curva granulométrica del material a proteger (Suelo BASE).**
- 2. Si el suelo a proteger no contiene gravas, clasificar al suelo:**
 - Categoría 1. Más de 85% pasa tamiz 200**
 - Categoría 2. Pasa tamiz 200 entre 40 y 85%**
 - Categoría 3. Pasa tamiz 200 entre 15 y 39%**
 - Categoría 4. Pasa tamiz 200 menos del 15%**



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

PASOS DE DISEÑO:

3. Si el suelo contiene gravas (retenido #4):
 - a. Factor de corrección $f = \text{pasa } \#4 / 100$
 - b. Multiplicar cada pasante por f
 - c. Graficar la nueva granulometría.
 - d. Usar la curva ajustada para la definición del pasa 200



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

PASOS DE DISEÑO:

- Definir el D_{15} del filtro según **condición de retención (estabilidad)**:

Categoría 1 $D_{15} \leq 9 \times d_{85} \quad d_{85} > 0.2 \text{ mm}$

Categoría 2 $D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$

Categoría 3 $D_{15} \leq \left(\frac{40 - A}{40 - 15} \right) [(4 \times d_{85}) - 0.7 \text{ mm}] + 0.7$

$$d_{85} > 0.7 \text{ mm}$$

Categoría 4 $D_{15} \leq 4 \text{ to } 5 \times d_{85}$



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

PASOS DE DISEÑO:

5. Condición de **eficiencia de permeabilidad**:

$$D_{15} > 3 \text{ a } 5 d_{15}$$

nunca inferior a 0.1 mm

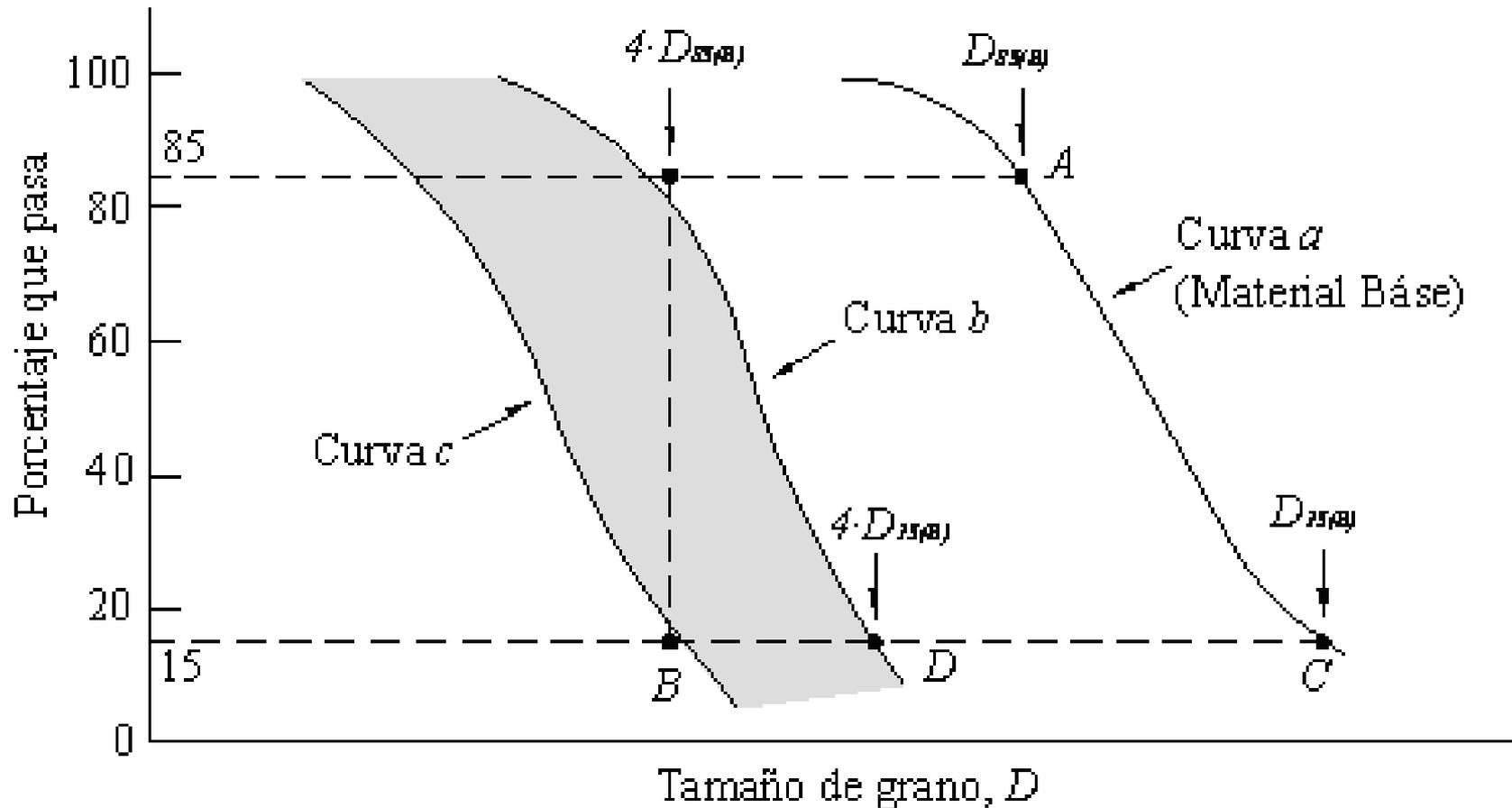
Condiciones Complementarias

6. Tamaño máximo de las partículas no superior a 75 mm
7. Pasante del tamiz 200 inferior a 5%
8. Pasante del tamiz 40 → NO PLASTICO
9. Identificar los límites antes indicados con el entorno dentro del cual debe ubicarse el filtro.



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES





FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES

PASOS DE DISEÑO:

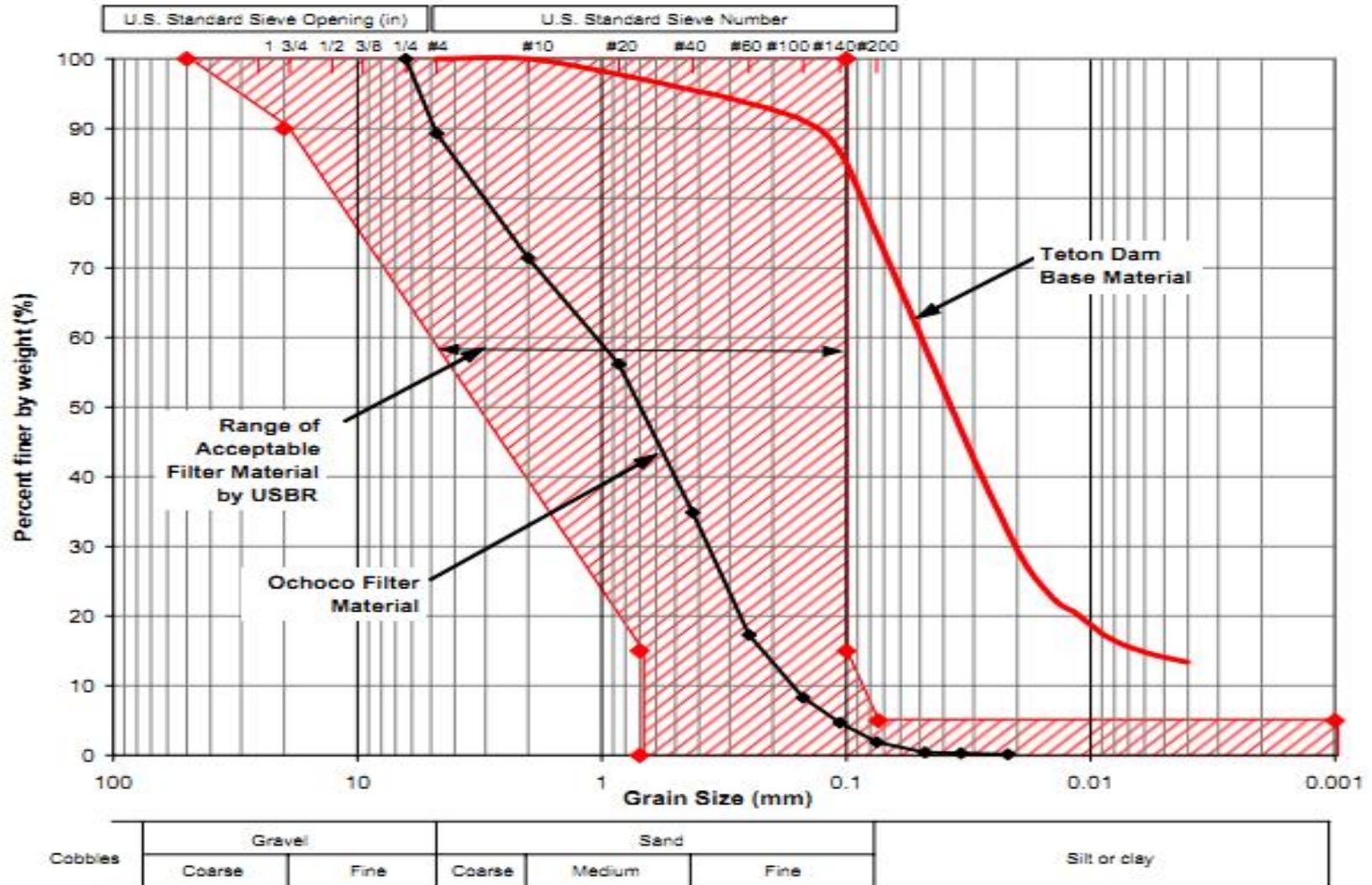
10. Para minimizar la segregación de materiales, el filtro debe tener una granulometría similar a la del suelo a proteger

D_{10}	Máximo D_{90}
< 0.5	20
0.5 – 1.0	25
1.0 – 2.0	30
2.0 – 5.0	40
5.0 – 10.0	50
10.0 – 50.0	60



FILTROS Y DRENES

DISEÑO DE FILTROS Y DRENES





EJERCICIOS PARTE 2